

# **ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА**

**СПРАВОЧНИК**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**



# ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

---

## СПРАВОЧНИК

### АВТОРЫ:

К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин,  
И.В. Автономова, А.Т. Александрова, А.В. Ан드로сов,  
В.А. Бурмистров, Д.В. Быков, Е.А. Деулин,  
Г.Ф. Ивановский, А.В. Исаев, Д.А. Калинин,  
Е.Н. Капустин, В.Н. Кеменов, В.И. Куприянов,  
О.К. Курбатов, В.Е. Минайчев, В.П. Михайлов,  
С.Б. Нестеров, В.В. Одинокоев, В.С. Петров,  
Ю.М. Пустовойт, Г.Л. Саксаганский, С.В. Сажнев,  
С.И. Саликеев, И.В. Творогов, Е.С. Фролов, А.Б. Цейтлин



МОСКВА  
МАШИНОСТРОЕНИЕ  
2009

# ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

---

## СПРАВОЧНИК

Под общей редакцией  
К.Е. ДЕМИХОВА, Ю.В. ПАНФИЛОВА

*3-е издание, переработанное  
и дополненное*



МОСКВА  
МАШИНОСТРОЕНИЕ  
2009

УДК 621.52(035,5)  
ББК 31.77 я 2  
В 14

**Авторы:** К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин, И.В. Автономова, А.Т. Александрова, А.В. Андросов, В.А. Бурмистров, Д.В. Быков, Е.А. Деулин, Г.Ф. Ивановский, А.В. Исаев, Д.А. Калинин, Е.Н. Капустин, В.Н. Кеменов, В.И. Куприянов, О.К. Курбатов, В.Е. Мннайчев, В.П. Михайлов, С.Б. Нестеров, В.В. Одноков, В.С. Петров, Ю.М. Пустовойт, Г.Л. Саксаганский, С.В. Сажнев, С.И. Салнкеев, И.В. Творогов, Е.С. Фролов, А.Б. Цейтли

**Рецензент:** академик РАН, д-р техн. наук, проф. *Б.И. Каторгин*

**Вакуумная техника: справочник** / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.;  
В 14 под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп.  
М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.  
ISBN 978-5-94275-436-5

Содержит основные сведения по теории вакуума, расчету, конструированию и эксплуатации вакуумных систем и их элементов. Приведены физико-механические характеристики материалов, применяемых для изготовления элементов вакуумной аппаратуры, методы ее сборки и отладки, правила эксплуатации. Описаны приборы для измерения полного и парциального давления газа в вакуумных системах, методы и средства течеискания. Даны сравнительные характеристики отечественных и зарубежных образцов вакуумной техники.

3-е издание (2-е изд. в 1992 г.) дополнено разделами по вакуумным смазкам и герметикам, нераспыляемым газопоглотителям, элементам газовых систем вакуумного технологического оборудования, безмасляным форвакуумным насосам, а также сравнительными характеристиками отечественных и зарубежных средств для получения вакуума и других элементов вакуумных систем.

Для инженерно-технических работников и специалистов, занимающихся конструированием, изготовлением и эксплуатацией вакуумных систем, а также для студентов технических вузов.

УДК 621.52(035,5)  
ББК 31.77 я 2

ISBN 978-5-94275-436-5    © Издательство Машиностроение, 2009  
© Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. и др., 2009

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	9	Глава 3. Течение разреженных га- зов и проводимость элементов вакуумных систем (К.Е. Демихов, Н.К. Никулин, С.Б. Нестеров) .....	51
Раздел 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОС- НОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ .....	11	3.1. Основные понятия .....	51
Глава 1. Общие сведения (В.Е. Ми- найчев, К.Е. Демихов, Н.К. Никулин) .....	11	3.2. Основное уравнение ваку- умной техники .....	52
1.1. Понятие «вакуум» .....	11	3.3. Режимы течения газов .....	52
1.2. Термины и определения ..	12	3.4. Вязкостный режим течения .....	52
1.3. Условные проходы эле- ментов вакуумных систем .....	22	3.5. Молекулярный режим те- чения .....	56
1.4. Принципиальные вакуум- ные схемы .....	22	3.6. Переходный режим течения .....	62
1.5. Единицы физических ве- личин .....	28	3.7. Статистический метод опре- деления проводимости вакуум- ных систем .....	63
1.6. Соотношение единиц дав- ления и потока газа .....	30	3.8. Расчет централизованных вакуумных систем .....	66
1.7. Состав атмосферного воздуха .....	30	3.9. Процесс откачки газа из вакуумной системы .....	67
1.8. Некоторые физические константы .....	30	3.10. Пример расчета проводи- мости сложного трубопровода .....	69
1.9. Приведение массы тела в атмосфере к массе тела в ва- кууме .....	31	3.11. Определение проводимо- сти вакуумных систем методом угловых коэффициентов .....	71
1.10. Газокинетические пара- метры .....	32	Раздел 2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ .....	78
1.11. Основные области приме- нения вакуумной технологии ...	33	Глава 4. Материалы вакуумных систем .....	78
Глава 2. Основные сведения из мо- лекулярно-кинетической теории газов (К.Е. Демихов, Н.К. Никулин, С.Б. Нес- теров, Е.С. Фролов) .....	36	4.1. Общие сведения (А.Т. Алек- сандрова) .....	78
2.1. Давление газа .....	36	4.2. Чугун (А.Т. Александрова) .....	79
2.2. Законы идеального газа ...	38	4.3. Углеродистые стали (А.Т. Александрова) .....	79
2.3. Барометрическая формула .....	39	4.4. Легированные стали (А.Т. Александрова) .....	81
2.4. Скорость молекул газа. За- кон распределения молекул га- за по скоростям .....	40	4.5. Жаропрочные стали и сплавы (А.Т. Александрова) ...	81
2.5. Средняя длина свободного пути молекул газа .....	42	4.6. Коррозионно-стойкие ста- ли (А.Т. Александрова) .....	81
2.6. Теплопроводность газов ..	43	4.7. Стали и сплавы для работы при низких температурах (А.Т. Александрова) .....	83
2.7. Вязкость газов .....	44	4.8. Титан и его сплавы (А.Т. Александрова) .....	84
2.8. Диффузия в газах .....	45	4.9. Тугоплавкие металлы (А.Т. Александрова) .....	85
2.9. Законы взаимодействия молекул газа с поверхностью твердого тела .....	47		
2.10. Скольжение разреженных газов .....	48		
2.11. Температурный скачок ..	49		



4.10. Цветные металлы и сплавы (А.Т. Александрова) . . . . .	86	7.3. Высоковакуумные и форва- куумные клапаны . . . . .	177
4.11. Стекло, керамика, ситаллы (А.Т. Александрова) . . . . .	87	7.4. Высоковакуумные затворы с различными приводами . . . .	185
4.12. Пластмассы (А.Т. Алексан- дрова, Ю.В. Панфилов) . . . . .	90	7.5. Противоаварийные и напус- кные клапаны . . . . .	189
4.13. Резины (Ю.В. Панфилов) . . . .	91	7.6. Натекатели . . . . .	190
4.14. Клеи (А.Т. Александрова) . . . .	93	7.7. Элементы газовых систем вакуумного технологического оборудования (С.В. Сажнев) . . .	193
4.15. Легкоплавкие металлы и сплавы (А.Т. Александрова) . . . .	94		
4.16. Вакуумные смазки и гер- метики (Ю.В. Панфилов) . . . . .	96	<b>Глава 8. Конструкционные элемен- ты вакуумных установок . . . . .</b>	<b>213</b>
4.17. Геттерные материалы (Д.В. Быков, В.С. Петров) . . . . .	102	8.1. Вводы движений в вакуум (В.Е. Минайчев, Ю.В. Панфилов) . . .	213
4.18. Вакуумные свойства мате- риалов (Ю.В. Панфилов) . . . . .	117	8.2. Прецизионные манипуля- торы и приводы исполнитель- ных механизмов вакуумного оборудования (В.П. Михайлов, Е.А. Деулин) . . . . .	227
<b>Глава 5. Вакуумные герметичные соединения . . . . .</b>	<b>123</b>	8.3. Электрические вакуумные вводы (В.Е. Минайчев) . . . . .	239
5.1. Общие сведения и класси- фикация (А.Т. Александрова) . . . .	123	8.4. Вакуумные окна (В.Е. Ми- найчев) . . . . .	244
5.2. Сварные соединения (А.Т. Александрова) . . . . .	124	8.5. Загрузочные вакуумные устройства (В.В. Одинокоев) . . . .	252
5.3. Паяные соединения (А.Т. Александрова) . . . . .	128	8.5.1. Виды шлюзовых систем . . . . .	257
5.4. Вакуумно-плотные соеди- нения на основе глазурей, си- таллоцементов и эпоксидных смол (А.Т. Александрова) . . . . .	131	8.5.2. Использование шлю- зовых систем в вакуумном оборудовании . . . . .	263
5.5. Разъемные соединения (А.Т. Александрова, Ю.В. Пан- филов) . . . . .	133	8.6. Гибкие герметизирующие звенья (В.Е. Минайчев) . . . . .	269
5.6. Сверхвысоковакуумные разь- емные соединения с расплав- ляемыми уплотнителями (А.Т. Александрова) . . . . .	152	8.7. Заглушки (В.Е. Минайчев) . . . .	273
<b>Глава 6. Вакуумные камеры (Ю.М. Пустовойт) . . . . .</b>	<b>159</b>	8.8. Проектирование механиз- мов и компоновка вакуумного технологического оборудова- ния по критерию минимума привносимой дефектности (Ю.В. Панфилов) . . . . .	274
6.1. Классификация камер . . . . .	159	<b>Раздел 3. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ 281</b>	
6.2. Обечайки . . . . .	160	<b>Глава 9. Механические вакуумные насосы . . . . .</b>	<b>281</b>
6.3. Днища . . . . .	162	9.1. Поршневые насосы (К.Е. Де- михов, Н.К. Никулин, Е.С. Фро- лов) . . . . .	281
6.4. Крышки . . . . .	164		
6.5. Прогрев и охлаждение камер . . . .	164		
6.6. Расчет на прочность . . . . .	168		
<b>Глава 7. Запорно-регулирующая арматура (О.К. Курбатов) . . . . .</b>	<b>172</b>		
7.1. Классификация и предъяв- ляемые требования . . . . .	172		
7.2. Сверхвысоковакуумные кла- паны . . . . .	176		



9.2. Жидкостно-кольцевые насосы (И.В. Автономова) . . . . .	289	11.2. Классификация ловушек 436	
9.3. Двухроторные насосы (А.В. Бурмистров) . . . . .	304	11.2.1. Водоохлаждаемые ловушки . . . . .	437
9.3.1. Двухроторные насо- сы с внешним сжатием (типа Рутс) . . . . .	304	11.2.2. Умеренно охлажда- емые ловушки . . . . .	439
9.3.2. Двухроторные насо- сы с полным внутренним сжатием типа «Claw» . . . .	325	11.2.3. Криоловушки . . . .	440
9.4. Спиральные насосы (А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев) 330		11.2.4. Сорбционные ло- вушки . . . . .	444
9.4.1. Конструкция и принцип действия СПВН 330		11.2.5. Каталитические (хи- мические) ловушки . . . .	446
9.4.2. Расчет спирального насоса . . . . .	335	11.3. Примеры расчета высоко- вакуумных ловушек . . . . .	448
9.5. Пластинчато-роторные и пластинчато-статорные насосы (И.В. Автономова) . . . . .	338	11.3.1. Общие вопросы 448	
9.5.1. Общие вопросы . . . .	338	11.3.2. Расчет высоковаку- умных ловушек для диф- фузионных насосов . . . .	448
9.5.2. Основы теории и расчета . . . . .	342	11.4. Селективная откачка сме- сей разреженных газов . . . .	451
9.5.3. Характеристики вакуумных насосов . . . .	347	11.4.1. Изменение темпера- туры рабочих поверхностей 451	
9.6. Плунжерные насосы (И.В. Автономова) . . . . .	356	11.4.2. Изменение геомет- рии рабочих поверхностей 451	
9.6.1. Общие вопросы . . . .	356	11.4.3. Экспериментальное определение проводимо- сти водоохлаждаемой ло- вушки . . . . .	453
9.6.2. Расчет газобалласт- ных насосов . . . . .	361	<b>Глава 12. Геттерные и геттерно- ионные насосы (Г.Л. Саксаганский) 460</b>	
9.6.3. Рабочие жидкости для механических ваку- умных насосов . . . . .	362	12.1. Типы и важнейшие ха- рактеристики . . . . .	460
9.7. Турбомолекулярные насо- сы (К.Е. Демихов, Н.К. Нику- лин, Е.С. Фролов) . . . . .	362	12.2. Принципы оптимизаци- онного проектирования . . . .	469
<b>Глава 10. Струйные вакуумные насосы (Д.А. Калинин, В.Н. Кеменов, А.Б. Цейтлин, Е.Н. Капустин) . . . . .</b>	<b>404</b>	12.3. Средства откачки на ос- нове нераспыляемых геттеров 472	
10.1. Классификация. Основ- ные характеристики . . . . .	404	12.4. Испарительные геттер- ные и геттерно-ионные насосы 480	
10.2. Жидкостно-струйные насосы 405		12.5. Физические процессы в магнитных электроразрядных насосах . . . . .	487
10.3. Пароэжекторные насосы 407		12.6. Основы конструирования и эксплуатации разрядных на- сосов . . . . .	495
10.4. Бустерные насосы . . . .	415	<b>Глава 13. Криогенные средства от- качки (А.В. Исаев, В.И. Куприянов) . . 505</b>	
10.5. Диффузионные насосы 421		13.1. Высоковакуумные крио- насосы . . . . .	505
10.6. Вакуумные пароструйные агрегаты . . . . .	432	13.1.1. Классификация и опи- сание работы крионасосов 506	
<b>Глава 11. Вакуумные ловушки (С.Б. Нестеров, В.Н. Кеменов, А.В. Андросов) . . . . .</b>	<b>433</b>		
11.1. Основные понятия . . . .	433		



13.1.2. Способы охлаждения . . . . .	508	Глава 16. Испытания на герметичность (В.Е. Минайчев, К.Е. Демихов, Н.К. Никулин) . . . . .	553
13.1.3. Тепловые нагрузки . . . . .	508	16.1. Общие сведения . . . . .	553
13.1.4. Откачные характеристики . . . . .	511	16.2. Манометрический метод . . . . .	562
13.2. Низковакуумные конденсационные насосы . . . . .	512	16.3. Масс-спектрометрический метод . . . . .	563
13.3. Адсорбционные насосы . . . . .	513	16.4. Галогенный метод . . . . .	570
13.4. Криогенные комбинированные насосы . . . . .	520	16.5. Катарометрический метод . . . . .	571
<b>Раздел 4. ВАКУУМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ . . . . .</b>	<b>522</b>	16.6. Метод высокочастотного разряда . . . . .	571
<b>Глава 14. Вакуумметрия (И.В. Творогов, Д.А. Калинин, К.Е. Демихов, Н.К. Никулин) . . . . .</b>	<b>522</b>	16.7. Пузырьковый метод . . . . .	571
14.1. Классификация . . . . .	522	16.8. Аммиачный метод . . . . .	572
14.2. Жидкостные вакуумметры . . . . .	523	16.9. Люминесцентный метод . . . . .	572
14.3. Деформационные вакуумметры . . . . .	526	<b>Глава 17. Испытания вакуумных машин (В.Е. Минайчев, К.Е. Демихов, Н.К. Никулин) . . . . .</b>	<b>573</b>
14.4. Тепловые вакуумметры . . . . .	532	17.1. Общие сведения . . . . .	573
14.5. Радиометрический и вязкостный вакуумметры . . . . .	535	17.2. Испытания механических насосов (агрегатов) с масляным уплотнением . . . . .	574
14.6. Ионизационные вакуумметры . . . . .	536	17.3. Испытания двухроторных насосов (агрегатов) . . . . .	575
<b>Глава 15. Масс-спектрометрия (В.Е. Минайчев, К.Е. Демихов, Н.К. Никулин) . . . . .</b>	<b>543</b>	17.4. Испытания турбомолекулярных насосов (агрегатов) . . . . .	576
15.1. Общие сведения . . . . .	543	17.5. Испытания пароструйных насосов (агрегатов) . . . . .	576
15.2. Статические масс-спектрометры . . . . .	548	17.6. Испытания электрофизических средств откачки (насосов, агрегатов) и крионасосов . . . . .	577
15.3. Динамические масс-спектрометры . . . . .	549	17.7. Испытания адсорбционных насосов (агрегатов) . . . . .	578
		<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>579</b>
		<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>582</b>



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная вакуумная техника находит применение во многих областях науки и промышленности для создания технологической среды в производственных и исследовательских установках, электровакуумных приборах и устройствах, медицинской и бытовой технике. Вакуум является эффективной средой для нанотехнологии, наилучшим образом отвечает условиям формирования наноструктур.

В справочнике сохранены тематика и структура прежнего издания. С учетом современных данных и проведенных исследований внесены соответствующие дополнения и исправления. Переработан раздел «Теоретические основы вакуумной техники», включающий в себя основные положения молекулярно-кинетической теории газов, описание процессов течения разреженных газов и методов определения проводимости элементов вакуумных систем. Глава «Материалы вакуумных систем» дополнена сведениями о физико-механических свойствах современных вакуумных резин, в том числе зарубежных, появились два новых подраздела: по вакуумным смазкам, герметикам и геттерным материалам.

В главе «Вакуумные герметичные соединения» приведена методика расчета герметичности, рассмотрены особенности сварки, пайки и других технологических операций, применяемых в вакуумной технике. Даны рекомендации по конструированию вакуумных камер и запорно-регулирующей арматуры, представлены конструкционные элементы вакуумных установок.

Описаны элементы газовых систем вакуумного технологического оборудования. Приведены конструкции приводов исполнительных механизмов вакуумного оборудования, дополнены сведения о

шлюзовых загрузочных устройствах и методах их расчета. Даны рекомендации для проектирования механизмов и компоновке вакуумного технологического оборудования по критерию минимума привносимой дефектности.

В разделе «Вакуумные насосы» значительное место отведено основам теории, методам расчета и принципам действия различных средств получения вакуума: механических, струйных, электрофизических, криогенных вакуумных насосов; приведены примеры их расчета.

Расширена информация о методах расчета вакуумных насосов, представлены их основные характеристики, типовые конструкции и рекомендации по конструированию. Полностью переработан раздел «Двухроторные насосы», введен новый подраздел «Спиральные насосы». Приведены сравнительные характеристики отечественных и зарубежных образцов.

В главе «Струйные вакуумные насосы» наряду с традиционными схемами рассмотрены последние разработки, позволяющие значительно расширить рабочий диапазон давлений. Глава «Вакуумные ловушки» включает в себя сведения, которые дают возможность рассчитывать и конструировать ловушки для различных вакуумных систем.

В главе «Электрофизические средства откачки» изложены принцип действия насосов, физические основы протекающих в них процессов, методы расчета; даны рекомендации по конструированию и использованию материалов.

Глава «Низкотемпературные средства откачки (крионасосы)» дополнены современными данными по расчету и конструированию насосов.

Раздел «Вакуумные измерения и испытание» включает в себя описание методов и средств измерения полного и парци-



ального давления, испытания элементов вакуумных систем на герметичность, оценки работоспособности вакуумных машин. Приведены сведения о современных вакуумметрах, масс-спектрометрах и теченскателях.

Новая редакция справочника появилась во многом благодаря активному участию членов Российского вакуумного общества – преподавателей и научных работников вузов: Московского государст-

венного технического университета им. Н.Э. Баумана, Московского государственного института электроники и математики, Казанского государственного технического университета, сотрудников ведущих «вакуумных» предприятий: НИИ вакуумной техники им. С.А. Векшинского (г. Москва), НИИ точного машиностроения (г. Зеленоград), НИИ электрофизической аппаратуры (г. Санкт-Петербург), предприятия «ВакуумМаш» (г. Казань) и др.



# РАЗДЕЛ 1

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

### Глава 1

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

---

#### 1.1. ПОНЯТИЕ «ВАКУУМ»

*Вакуумом* (от лат. *vacuum* – пустота) называют состояние газа или пара при давлении ниже атмосферного. Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление. Вакууму обычно соответствует область давления ниже  $10^5$  Па.

*Вакуумная техника* – прикладная наука, изучающая проблемы получения и поддержания вакуума, проведения вакуумных измерений, а также вопросы разработки, конструирования и применения вакуумных систем и их функциональных элементов. Разреженные газы по своим свойствам практически не отличаются от идеальных. В технике вакуум создают с помощью вакуумных насосов различных принципов действия.

Интенсивность протекания физико-химических процессов в вакууме зависит от соотношения между числом столкновений молекул газа со стенками ограничивающего его сосуда и числом взаимных столкновений молекул, характеризующимся отношением средней длины  $\bar{\lambda}$  свободного пути молекул к характерному (определяющему) линейному размеру  $l$  сосуда; это отношение, называемое числом Кнудсена –  $Kn$ , положено в основу условного разделения областей вакуума на следующие диапазоны: низкий, средний, высокий и сверхвысокий.

Степень вакуума в откачиваемых сосудах определяется равновесным давле-

нием, устанавливающимся под действием противоположных процессов: откачки газа насосом и поступления газа в рабочий объем вследствие натекания через неплотности, а также технологического газовыделения.

*Низкий вакуум* характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пути молекул газа значительно меньше определяющего линейного размера сосуда, существенного для рассматриваемого процесса ( $\bar{\lambda} \ll l$ ). Низкому вакууму обычно соответствует область давлений  $10^5 \dots 100$  Па.

*Средний вакуум* характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пути молекул соизмерима с характерным линейным размером ( $\bar{\lambda} \approx l$ ). Среднему вакууму, как правило, отвечает область давлений  $100 \dots 0,1$  Па.

*Высокий вакуум* определяется давлением газа, при котором средняя длина свободного пути молекул значительно превышает характерный линейный размер ( $\bar{\lambda} \gg l$ ). Высокому вакууму обычно соответствует область давлений  $0,1 \dots 10^{-5}$  Па.

*Сверхвысокий вакуум* характеризуется давлением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для рабочего процесса. Сверхвысокому вакууму, как правило, свойственна область давлений  $< 10^{-5}$  Па.



## 1.2. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Основные термины, применяемые в вакуумной технике, соответствуют ГОСТ 5197–85; 26790–85 и 27758–88. Кроме того, приведены термины, широко распространенные в технической литературе.

### Общие понятия

*Газ* – состояние вещества, при котором движение молекул практически не ограничено межмолекулярными силами и вещество может занимать любое доступное пространство. В вакуумной технике этот термин широко применяют и к неконденсирующемуся газу, и к пару.

*Давление газа на ограничивающую поверхность* – отношение нормальной составляющей силы, действующей со стороны газа на ограничивающую поверхность, к площади этой поверхности.

*Давление в определенной точке газового пространства* – отношение скорости переноса нормальной составляющей количества движения, определяемое движением молекул в обоих направлениях через область на воображаемой плоскости, проходящей через рассматриваемую точку, к площади этой области (при наличии потока молекул газа указывают ориентацию плоскости по отношению к вектору этого потока).

*Откачка* – уменьшение молекулярной концентрации газа при помощи устройств, удаляющих или поглощающих газ.

*Время откачки* – время, необходимое для уменьшения давления в откачиваемом сосуде до определенного значения насосом конкретного типа или вида.

*Остаточный газ* – газ, оставшийся в вакуумной системе после откачки.

*Предельное остаточное давление* – наименьшее давление, которое может быть достигнуто в определенных условиях при использовании конкретных устройств для откачки.

*Форвакуум* – вакуум, создаваемый насосом более низкого вакуума при последовательной работе нескольких насосов.

*Абсолютное давление газа* – давление газа, отсчитываемое от нулевого.

*Атмосферное давление* – абсолютное давление атмосферы.

*Нормальное состояние газа* – состояние газа при нормальных условиях: давлении 101 325 Па и температуре 273 К.

*Разреженный газ* – газ, молекулярная концентрация которого меньше его концентрации при нормальных условиях.

*Парциальное давление* – давление определенного компонента газовой смеси.

*Полное давление* – сумма парциальных давлений компонентов газовой смеси.

*Количество газа* – масса газа, определенная в виде произведения объема, занимаемого газом, на его давление при данной температуре.

*Пар* – газ, температура которого ниже критической (газ, который можно перевести в конденсированную фазу только повышением давления).

*Насыщенный пар* – пар, находящийся в термодинамическом равновесии с одной из конденсированных фаз рассматриваемого вещества при данной температуре.

*Ненасыщенный пар* – пар, давление которого меньше давления насыщенного пара данного вещества при той же температуре.

*Степень насыщения* – отношение давления пара к давлению насыщенного пара.

*Молекулярная концентрация* – число молекул газа в единице объема.

*Плотность газа* – масса единицы объема газа.

*Плотность газа, приведенная к единице давления*, – отношение плотности газа к его давлению.

*Длина свободного пути молекулы* – длина пути молекулы между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами.

*Средняя длина свободного пути молекулы* – среднее арифметическое расстояний, которые молекула проходит между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами.



*Число столкновений в единицу времени* – среднее арифметическое числа столкновений молекулы с другими молекулами за единицу времени.

*Эффективная длина свободного пути молекул* – отношение средней длины свободного пути молекул к вероятности определенного процесса (явления) в результате одного столкновения (под вероятностью определенного процесса понимают отношение числа столкновений, при которых совершается этот процесс, например ионизация, к числу столкновений за достаточно большой промежуток времени).

*Диффузия газа* – движение газа в другой среде под влиянием градиента концентраций.

*Коэффициент диффузии* – отношение абсолютной скорости потока молекул через единицу поверхности к градиенту концентрации при условии, что поверхность нормальна к градиенту.

*Течение газа* – перемещение газа в трубопроводе под действием разности давлений или температур на его концах.

*Вязкостное течение* – течение газа в канале при условиях, когда средняя длина свободного пути молекул очень мала по сравнению с наименьшим внутренним поперечным размером канала.

*Ламинарное течение* – вязкостное течение газа, характеризующееся отсутствием перемешивания между соседними слоями газа.

*Турбулентное течение* – вязкостное течение газа, при котором молекулы совершают неустановившиеся беспорядочные движения по сложным траекториям.

*Пуазейлевское течение* – ламинарное течение в длинной трубе круглого сечения.

*Молекулярное течение* – течение газа в канале при условиях, когда средняя длина свободного пути молекул значительно превышает внутренний поперечный размер канала.

*Молекулярно-вязкостное течение* – течение газа в канале при условиях, промежуточных между условиями вязкостного и молекулярного течений.

*Эффузионное течение* – течение газа через отверстие при условиях, когда наибольший размер отверстия меньше средней длины свободного пути молекул.

*Температурная транспирация* – течение газа между соединенными сосудами под действием разности температур сосудов, результатом которой является образование градиента давлений.

*Поток молекул* – число молекул, проходящих через некоторое сечение в единицу времени.

*Результирующий поток молекул* – отношение потока молекул, определяемого разностью между числом молекул, пересекающих поверхность за заданный интервал времени в заданном направлении, и числом молекул, пересекающих эту поверхность в обратном направлении к этому времени.

*Плотность потока молекул* – отношение результирующего потока молекул к площади поверхности, которую он пересекает.

*Массовый поток газа* – масса газа, пересекающего определенную поверхность за единицу времени.

*Объемный поток газа* – объем газа при указанных температурах и давлении, пересекающего определенную поверхность за единицу времени.

*Молярный поток газа* – число молей данного газа, пересекающего определенную поверхность за единицу времени.

*Проводимость* – свойство элемента вакуумной системы проводить газ, определяется как отношение потока к разности средних давлений по обе стороны от элемента в предположении изотермического равновесия.

*Молекулярная проводимость* – свойство элемента вакуумной системы проводить газ, определяется как отношение результирующего потока молекул к разности средних чисел молекул в единице объема по обе стороны от отверстия или в двух поперечных сечениях канала.

*Сопротивление* – величина, обратная проводимости.



*Сорбция* – поглощение газа или пара твердым телом или жидкостью (сорбентом).

*Адсорбция* – поглощение газа или пара (адсорбата) поверхностью твердого вещества или жидкости (адсорбента).

*Абсорбция* – поглощение газа (абсорбата) объемом твердого тела или жидкости (абсорбента).

*Физическая сорбция* – сорбция под действием физических сил, при которой не образуются химических связей.

*Хемосорбция* – сорбция, при которой образуются химические связи.

*Коэффициент аккомодации* – отношение средней энергии, реально передаваемой поверхности налетающими частицами, к средней энергии, которая может быть передана поверхности налетающими частицами, если бы они отрывались от поверхности после достижения с нею полного теплового равновесия.

*Частота столкновений* – отношение числа молекул, сталкивающихся с поверхностью в заданный интервал времени, к этому интервалу времени и площади поверхности.

*Скорость конденсации* – число молекул, конденсирующихся на единице площади поверхности в единицу времени.

*Скорость прилипания* – число молекул, сорбирующихся на единице площади поверхности в единицу времени.

*Вероятность прилипания* – отношение скорости прилипания к частоте столкновений молекул.

*Время удержания* – среднее время, в течение которого молекулы удерживаются на поверхности в состоянии сорбции.

*Миграция* – движение молекул на поверхности.

*Десорбция* – освобождение газов или паров, сорбированных каким-либо материалом.

*Газовыделение* – самопроизвольное выделение газа из материала в вакуум.

*Обезгаживание* – принудительное удаление газа из материала.

*Скорость испарения* – число молекул вещества, испаряющегося с единицы площади поверхности в единицу времени.

*Проницаемость твердой перегородки* – отношение потока газа через перегородку к потоку через то же сечение при отсутствии перегородки, являющееся функцией от давлений по обе стороны от перегородки и ее структуры.

*Коэффициент проницаемости* – отношение произведения проницаемости на толщину перегородки к ее площади.

*Натекание* – проникновение газа из окружающей среды в откачиваемый (откачанный) сосуд.

*Быстрота откачки* – объем газа при фиксированном давлении, откачиваемого в единицу времени.

*Быстрота действия вакуумного насоса* – величина, характеризующаяся быстротой откачки во входном сечении насоса при его работе.

*Эффективная быстрота откачки* – быстрота откачки на конце трубопровода, присоединенного к откачиваемому сосуду.

*Производительность вакуумного насоса* – поток газа через входное сечение насоса.

*Наибольшее давление запуска вакуумного насоса* – наибольшее давление во входном сечении вакуумного насоса, при котором насос может начать работать.

*Наибольшее выпускное давление вакуумного насоса* – наибольшее давление в выходном сечении вакуумного насоса, при котором насос может осуществлять откачку.

*Наибольшее рабочее давление вакуумного насоса* – наибольшее давление во входном сечении насоса, при котором он длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

*Предельное остаточное давление насоса* – значение, к которому асимптотически стремится давление в стандартизованном испытательном объеме без впуска газа при нормально работающем насосе.

*Время выхода вакуумного насоса на рабочий режим* – время с момента включения насоса до момента, когда он может начать откачку при рабочем давлении.



### **Вакуумная система и ее элементы**

*Вакуумная система* – совокупность взаимосвязанных устройств для создания, повышения и поддержания вакуума; приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых сосудов и связывающих их вакуумных трубопроводов (к устройствам, обеспечивающим действие вакуумной системы, относятся, например, электродвигатель, аккумуляторы, печи).

*Вакуумная установка* – установка, состоящая из вакуумной системы и устройств, обеспечивающих ее действие.

*Вакуумный агрегат* – вакуумная установка, конструктивно выполненная как единое целое.

*Откачной пост* – вакуумная установка, предназначенная для откачки, наполнения и тренировки изделий.

*Элемент вакуумной системы* – прибор, сборочная единица или деталь, предназначенные для выполнения определенных функций в вакуумной системе (например, насос, манометрический преобразователь, ловушка и др.).

*Условный проход* – диаметр проходного сечения элемента вакуумной системы, определяющий присоединительные размеры по действующим стандартам.

*Откачиваемый сосуд* – сосуд, в котором создается вакуум.

*Предохранительный баллон* – сосуд, предназначенный для предохранения элементов вакуумной системы от попадания в них посторонних тел.

*Уравнительный вакуумный баллон* – сосуд, служащий для выравнивания колебаний давления в вакуумной системе.

*Вакуумное защитное устройство* – элемент вакуумной системы, предназначенный для быстрого отделения участка вакуумной системы, где произошел прорыв атмосферного воздуха, от остальной ее части.

*Вакуумный трубопровод* – трубопровод, по которому перемещается разреженный газ в вакуумной системе.

*Форвакуумный трубопровод* – вакуумный трубопровод, служащий для присоединения к форвакуумному насосу.

*Байпасный трубопровод* – вакуумный трубопровод, предназначенный для откачки сосуда, минуя высоковакуумный насос.

*Гребенка* – трубка с рядом отростков, рассчитанная на присоединение нескольких откачиваемых сосудов.

*Вакуумный шлюз* – устройство для введения в вакуумную систему или удаления из нее различных предметов без нарушения вакуума.

*Вакуумный смазочный материал* – уплотнитель в виде вязкого вещества с низким давлением пара, применяемый в подвижных соединениях вакуумных систем.

*Вакуумная замазка* – уплотнитель в виде пластичного вещества с низким давлением пара, используемый в разборных неподвижных соединениях вакуумной системы, а также для устранения течей.

*Шлиф* – совокупность двух пришлифованных поверхностей, обеспечивающая герметичное соединение элементов вакуумной системы (шлиф может быть подвижным и неподвижным).

*Вакуумный шланг* – гибкая не деформирующаяся под действием атмосферного давления трубка, служащая для соединения отдельных элементов вакуумной системы.

*Вакуумный клапан* – устройство, позволяющее регулировать или полностью перекрывать поступление газа в вакуумную систему.

*Вакуумный затвор* – вакуумный клапан, дающий возможность соединять и разобщать элементы вакуумной системы.

*Вакуумный напекатель* – напускной вакуумный клапан, предназначенный для напуска и регулирования малых потоков газа.

*Напускной вакуумный клапан* – вакуумный клапан, служащий для напуска воздуха или газа в вакуумную систему.



*Вакуумный ввод* – устройство для передачи в вакуумный сосуд механической или электрической энергии.

*Выхлопной фильтр* – устройство, расположенное на стороне выхода вакуумного насоса с масляным уплотнением и предназначенное для очистки выхлопного газа от масляного тумана.

*Ловушка* – устройство, в котором парциальное давление компонентов газопаровой смеси понижается механическим, физическим или химическим способом и уменьшается проникновение паров или газов из одной части откачной системы в другую.

*Конденсационная вакуумная ловушка* – ловушка, действие которой основано на конденсации паров и газов на внутренних охлаждаемых поверхностях (по способу охлаждения различают водяные, азотно-водяные, фреоновые, термоэлектрические и другие конденсационные ловушки, по месту расположения в вакуумной системе – конденсационные форвакуумные и высоковакуумные ловушки).

*Сорбционная вакуумная ловушка* – ловушка, действие которой основано на сорбции паров и газов поверхностью пористого сорбента (по применяемому сорбенту различают цеолитовые, угольные, силикагелевые и другие сорбционные ловушки, по месту расположения в вакуумной системе – сорбционные форвакуумные и высоковакуумные ловушки; сорбент может охлаждаться водой, жидким азотом и др.).

*Ионная вакуумная ловушка* – ловушка, в которой для удаления определенных компонентов газовой смеси используют их ионизацию.

*Маслоотделитель* – устройство, предназначенное для отделения газа от масла.

*Маслоочиститель* – устройство, служащее для удаления из вакуумного масла загрязняющих примесей.

### Оборудование для получения и поддержания вакуума

*Вакуумный насос* – устройство, предназначенное для создания, повышения и (или) поддержания вакуума.

*Низковакуумный насос* – вакуумный насос для понижения давления в откачиваемом объеме, начиная от атмосферного.

*Высоковакуумный насос* – вакуумный насос, работающий на ступени самого низкого давления откачной системы, которая состоит из двух или более последовательно соединенных насосов.

*Форвакуумный насос* – вакуумный насос, предназначенный для поддержания выпускного давления другого насоса.

*Бустерный вакуумный насос* – вакуумный насос, устанавливаемый между форвакуумным и высоковакуумным насосами для повышения скорости действия системы насосов при среднем вакууме либо для оптимизации давления в откачной системе и уменьшения объемного расхода, необходимого для форвакуумного насоса.

*Вакуумный насос предварительного разрежения* – вакуумный насос, предназначенный для понижения давления в откачиваемом объеме или откачной системе от атмосферного давления до значения, при котором может начать работу другая откачная система или вакуумный насос.

*Одноступенчатый вакуумный насос* – вакуумный насос, в котором перепад давления создается одной рабочей ступенью.

*Многоступенчатый вакуумный насос* – вакуумный насос, где перепад давления создается последовательно несколькими рабочими ступенями (ступени откачки нумеруют, начиная от ступени, создающей более высокий вакуум).

*Механический вакуумный насос* – газоперекачивающий вакуумный насос, откачивающее действие которого основано на перемещении газа вследствие механического движения рабочих частей насоса.



*Вакуумный насос объемного действия* – механический вакуумный насос, в котором объем, заполненный газом, периодически отсекается от входа, обеспечивая перемещение газа к выходу.

*Газобалластный вакуумный насос* – вакуумный насос с масляным уплотнением, снабженный устройством дозированной подачи неконденсирующегося газа для исключения конденсации откачиваемых паров в насосе.

*Поршневого вакуумный насос* – вакуумный насос объемного действия, где сжатие и нагнетание газа происходят под действием возвратно-поступательного движения поршня.

*Вращательный вакуумный насос* – вакуумный насос объемного действия, в котором сжатие и нагнетание газа осуществляют вращающиеся поверхности твердого тела.

*Пластинчато-роторный вакуумный насос* – вращательный вакуумный насос с эксцентрично установленным ротором, вращающимся тангенциально относительно неподвижной поверхности статора; при этом две или более пластины, скользящие в прорезях ротора и прижимающиеся к внутренней стенке статора, делят камеру статора на полости с изменяющимися объемами.

*Пластинчато-статорный вакуумный насос* – вращательный вакуумный насос, в котором эксцентрично установленный ротор вращается, скользя по внутренней стенке статора; при этом пластина, движущаяся относительно статора, прижимается к ротору и делит рабочую камеру на части с изменяющимися объемами.

*Плунжерный вакуумный насос* – это вакуумный насос, в котором эксцентрично установленный вал, вращающийся относительно внутренней поверхности ротора, вынуждает последний обкатывать поверхность статора; при этом плунжер совместно с ротором, на котором он жестко закреплен, делит рабочую камеру на полости с изменяющимися объемами. Плунжер скользит в золотнике, колеблющемся в соответствующем гнезде статора.

*Жидкостно-кольцевой вакуумный насос* – вращательный вакуумный насос, в котором эксцентрично установленный ротор с закрепленными на нем лопатками отбрасывает жидкость к стенке статора; жидкость принимает форму кольца, концентрично расположенного относительно статора, и вместе с лопатками ротора образует полости с изменяющимися объемами.

*Двухроторный вакуумный насос (насос Рутса)* – вращательный вакуумный насос, в котором два взаимно связанных ротора, по форме напоминающие восьмерки, синхронно вращаются в противоположных направлениях с очень малым зазором, не касаясь один другого и стенок корпуса.

*Трохоидный вакуумный насос* – вращательный вакуумный насос, у которого центр тяжести эллипсообразного ротора описывает окружность, а рабочая камера насоса имеет трохоидное поперечное сечение.

*Кинетический вакуумный насос* – механический вакуумный насос, где импульс движения передается молекулам газа таким образом, что газ непрерывно перемещается от входа к выходу насоса (различают струйные насосы, в которых откачка происходит вследствие захвата газа или молекул струей рабочего тела, и вращательные насосы, в которых импульс движения передается молекулам газа движущимися поверхностями насоса).

*Вакуумный турбонасос* – кинетический вакуумный насос, где импульс движения передается газу от вращающихся твердых поверхностей.

*Молекулярный вакуумный насос* – кинетический вакуумный насос, в котором молекулам газа в результате их соприкосновений с поверхностью высокоскоростного ротора сообщается импульс движения, заставляющий их перемещаться в направлении к выходу насоса.

*Турбомолекулярный вакуумный насос* – молекулярный вакуумный насос, на валу ротора которого закреплены диски с про-



резями или лопатками, вращающиеся между соответствующими дисками статора.

*Осевой вакуумный турбонасос* – вакуумный турбонасос, где импульс движения передается газу вдоль оси вращения.

*Центробежный вакуумный турбонасос* – вакуумный турбонасос, в котором импульс движения передается газу в радиальном направлении.

*Струйный вакуумный насос* – газоперекачивающий вакуумный насос, характеризующийся тем, что откачка в нем осуществляется путем захвата газа струей рабочего тела (жидкости, пара или газа).

*Эжекторный вакуумный насос* – пароструйный низковакуумный насос, в котором происходит турбулентно-вязкостный захват газа струей.

*Жидкостно-струйный вакуумный насос* – струйный вакуумный насос, где в качестве рабочего тела используют струю жидкости (обычно воду).

*Газоструйный вакуумный насос* – струйный вакуумный насос, в котором рабочим телом является струя газа.

*Пароструйный вакуумный насос* – струйный вакуумный насос, где в качестве рабочего тела используют струю пара.

*Диффузионный вакуумный насос* – пароструйный высоковакуумный насос, в котором захват газа струей происходит за счет диффузии газа в струю.

*Самоочищающийся диффузионный вакуумный насос* – диффузионный вакуумный насос, в котором летучие примеси не возвращаются в кипятильник, а направляются к выходу.

*Фракционный диффузионный вакуумный насос* – многоступенчатый вакуумный паромасляный насос, из ступени самого низкого давления которого откачивается газ более плотными компонентами рабочего вещества, представляющими собой струю пара низкого давления, а из ступеней более высокого давления – менее плотными компонентами с более высоким давлением пара.

*Диффузионно-эжекторный вакуумный насос* – пароструйный вакуумный

насос, в котором ступени (или ступеням), имеющей (имеющим) характеристики эжекторного вакуумного насоса, предшествует ступень или ступени с характеристиками диффузионного вакуумного насоса.

*Ионный вакуумный насос* – кинетический вакуумный насос, где молекулы газа ионизируются, а затем перемещаются к выходу насоса с помощью электрического и магнитного полей (или только электрического поля).

*Сорбционный вакуумный насос* – газоулавливающий вакуумный насос, в котором откачка происходит вследствие сорбции газа.

*Адсорбционный вакуумный насос* – сорбционный вакуумный насос, где откачка осуществляется в результате физической сорбции газа пористым сорбентом при низкой температуре.

*Геттерный вакуумный насос* – сорбционный вакуумный насос, в котором откачка происходит преимущественно вследствие хемосорбции газа геттером.

*Сублимационный вакуумный насос* – геттерный вакуумный насос, поглощающая поверхность которого обновляется при конденсации на ней термически испаряемого геттера.

*Геттерно-ионный вакуумный насос* – геттерный вакуумный насос, где наряду с хемосорбцией происходит ионизация газа с последующим внедрением ускоренных ионов в поверхность распыленного геттера.

*Испарительно-ионный вакуумный насос* – геттерно-ионный вакуумный насос, в котором ионизированный газ направляется к поверхности геттера, получаемой в результате непрерывного или периодического испарения.

*Магнитный электроразрядный вакуумный насос* – геттерно-ионный вакуумный насос, где для распыления геттера используют газовый разряд в магнитном поле.

*Вакуумный крионасос* – конденсационный или сорбционный насос с рабочими поверхностями, охлаждаемыми до низких температур.



### Средства для измерения и контроля вакуума

*Манометр* – прибор для измерения давления или разности давлений.

*Вакуумметр* – манометр для измерения давления разреженного газа или пара.

*Абсолютный вакуумметр* – вакуумметр, чувствительность которого одинакова для всех газов и может быть рассчитана по измеряемым физическим величинам.

*Дифференциальный вакуумметр* – вакуумметр для измерения разности давлений по обе стороны от разделительного чувствительного элемента.

*Вакуумметр полного давления* – вакуумметр для измерения суммарного давления, оказываемого всеми компонентами газовой смеси.

*Измерительный преобразователь давления* – первичный измерительный преобразователь, воспринимающий непосредственно измеряемое давление и преобразующий его в другую физическую величину.

*Открытый преобразователь давления* – преобразователь давления, в котором электродная система не имеет герметизированного корпуса и (или) проводимость между ее центром и входным сечением присоединительного патрубка  $\geq 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ .

*Закрытый преобразователь давления* – преобразователь давления, где электродная система заключена в герметизированный корпус и проводимость между ее центром и выходным сечением присоединительного патрубка  $< 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ .

*Измерительный блок вакуумметра* – часть вакуумметра, которая предназначена для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и содержит блок питания и все электрические цепи, необходимые для работы прибора.

*Отсчетное устройство вакуумметра* – часть измерительного блока вакуумметра, предназначенного для регистрации значений измеряемого параметра.

*Масс-спектрометр* – прибор для количественного и (или) качественного определения состава и структуры веществ, изучения физико-химических процессов и явлений по масс-спектрам этих веществ.

*Индикатор с разрядной трубкой* – прозрачная газоразрядная трубка, позволяющая по цвету и форме свечения разряда определить вид газа и его давление.

*Жидкостный вакуумметр* – вакуумметр полного давления, действие которого основано на уравнивании измеряемого давления или разности давлений давлением столба жидкости.

*U-образный вакуумметр* – жидкостный вакуумметр, состоящий из сообщающихся сосудов, давление в которых определяют по одному или нескольким уровням жидкости.

*Деформационный вакуумметр* – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления.

*Мембранный вакуумметр* – деформационный вакуумметр, где чувствительным элементом является мембрана или мембранная коробка.

*Компрессионный вакуумметр* – жидкостный вакуумметр, в котором для измерения давления разреженного газа последний предварительно сжимается.

*Вязкостный вакуумметр* – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости вязкости разреженного газа от скорости движения в нем твердого тела и измеряемого давления.

*Тепловой вакуумметр* – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления.

*Термопарный вакуумметр* – тепловой вакуумметр, где использована зависимость электродвижущей силы термопары от измеряемого давления.

*Вакуумметр сопротивления* – тепловой вакуумметр, действие которого основано на зависимости электрического со-



противления нагреваемого током элемента от давления газа.

*Термомолекулярный вакуумметр* – вакуумметр полного давления, действие которого основано на передаче чувствительному элементу суммарного импульса молекул газа, отражающихся от поверхностей с различными температурами.

*Ионизационный вакуумметр* – вакуумметр полного давления, где используется зависимость ионного тока, возникшего в газе при ионизации молекул разреженного газа, от давления.

*Радиоизотопный ионизационный вакуумметр* – ионизационный вакуумметр, в котором для ионизации газа применяют излучение радиоактивных источников.

*Магнитный электроразрядный вакуумметр* – ионизационный вакуумметр, действие которого основано на зависимости ионного тока электрического разряда в магнитном поле от измеряемого давления.

*Вакуумметр Пеннинга* – магнитный электроразрядный вакуумметр, в преобразователе которого один из электродов состоит из двух соединенных между собой пластин, а другой (обычно анод) помещен между ними и имеет форму замкнутой рамки; при этом направление магнитного поля перпендикулярно к плоскости анодной рамки.

*Электронный ионизационный вакуумметр* – ионизационный вакуумметр, в преобразователе которого газ ионизируется электронами, ускоряемыми электрическим полем.

*Электронный ионизационный вакуумметр с осевым коллектором* – электронный ионизационный вакуумметр с уменьшенным фоновым давлением благодаря использованию в качестве коллектора ионов тонкой проволоки, помещенной соосно с цилиндрической сеткой, и укрепленного снаружи сетки катода.

*Экстракторный вакуумметр* – электронный ионизационный вакуумметр, в преобразователе которого фоновый ток снижен путем применения в роли коллектора ионов короткой и тонкой проволоки,

находящейся на оси анода и выведенной из области ионизации.

*Электронный ионизационный вакуумметр с магнитным полем* – электронный ионизационный вакуумметр, преобразователь давления которого представляет собой цилиндрический магнетрон, где под действием магнитного поля увеличены траектория электронов и число образующихся ионов.

*Радиочастотный масс-спектрометр* – масс-спектрометр, в котором ионы разделяются в радиочастотном продольном электрическом поле, образованном последовательно расположенными сетчатыми электродами (радиочастотными каскадами); при этом к коллектору проходят только ионы, ускоренные в радиочастотных каскадах.

*Квадрупольный масс-спектрометр* – масс-спектрометр, в котором ионы разделяются в высокочастотном электрическом поле анализатора, образованного четырьмя параллельными цилиндрическими электродами.

*Монополярный масс-спектрометр* – масс-спектрометр, где ионы разделяются в высокочастотном электрическом поле анализатора, состоящего из двух электродов.

*Масс-спектрометр с магнитным отклонением* – масс-спектрометр, в котором ускоренные ионы, имеющие разные массы, под действием магнитного поля движутся по различным круговым траекториям.

*Циклоидальный масс-спектрометр* – масс-спектрометр, где ионы разделяются скрещенными электрическим и магнитным полями, в которых они следуют по различным циклоидным траекториям, в результате чего ионы фокусируются в разных точках в зависимости от отношения массы к заряду.

*Омегатронный масс-спектрометр* – масс-спектрометр, в котором ионы разделяются при движении по спиральным траекториям, в радиочастотном электрическом и постоянном магнитном полях, перпендикулярных одно к другому.



*Времяпролетный масс-спектрометр* – масс-спектрометр, где газ ионизируется электронным пучком с импульсной модуляцией и ускоряющиеся в пространстве дрейфа ионы разделяются по времени прибытия на коллектор в зависимости от отношения массы иона к заряду.

*Диапазон измерений вакуумметра* – область давлений, в который нормированы допускаемые погрешности измерений.

*Чувствительность вакуумметра* – отношение изменения сигнала на выходе вакуумметра к вызывающему его изменению давления.

*Эквивалентное азотное давление* – давление чистого азота, которое давало бы показание вакуумметра, равное показанию, вызванному воздействующим на него газом.

*Фоновое давление вакуумметра* – условное давление чистого азота, соответствующее такому же показанию ионизационного вакуумметра, как при остаточном токе, не зависящем от давления.

### Техника течеискания

*Герметичность* – свойство изделия или его элементов, исключающее проникновение через них газообразных и (или) жидких веществ.

*Течь* – канал или пористый участок изделия либо его элементов, нарушающий их герметичность.

*Степень негерметичности изделия* – характеристика герметизированного изделия, определяемая суммарным расходом вещества через течи.

*Норма герметичности изделия* – наибольший суммарный расход вещества через течи герметизированного изделия, обеспечивающий его работоспособное состояние и установленный нормативно-технической документацией.

*Натекание* – проникновение вещества через течи внутрь герметизированного изделия под действием перепада полного или парциального давления.

*Утечка* – проникновение вещества из герметизированного изделия через течи

под действием перепада полного или парциального давления.

*Течеискание* – процесс обнаружения течей.

*Техника течеискания* – область техники выявления нарушений герметичности, связанных с наличием течей.

*Локализация течи* – выделение негерметичного участка и (или) определение места расположения течи.

*Перекрытие течи* – прекращение или уменьшение потока вещества через течь вследствие ее закупорки или деформации.

*Контроль герметичности* – технический контроль с целью установления соответствия изделия норме герметичности.

*Рабочее вещество* – вещество, заполняющее герметизированное изделие при эксплуатации или хранении.

*Пробное вещество* – вещество, проникновение которого через течь обнаруживают при течеискании.

*Контрольная среда* – среда, содержащая определенное количество пробного вещества.

*Балластное вещество* – вещество, используемое для повышения полного давления с целью увеличения расхода пробного вещества через течь.

*Индикаторное средство* – индикатор, содержащий индикаторное вещество, его носитель и (или) технологические добавки.

*Вещество-носитель* – вещество, используемое для транспортирования пробного вещества к индикаторному средству.

*Индикаторное вещество* – вещество, в результате взаимодействия которого с пробным веществом формируется сигнал о наличии течи.

*Опрессовка* – выдержка изделия под избыточным давлением при течеискании и (или) подготовке к нему.

*Течеискатель* – прибор или устройство для обнаружения течей.

*Масс-спектрометрический течеискатель* – течеискатель, действие которого основано на обнаружении пробного



вещества разделением его ионов по отношению их массы к заряду.

*Галогенный течеискатель* — течеискатель, основанный на обнаружении галогенсодержащего пробного вещества по увеличению эмиссии положительных ионов нагретой металлической поверхностью.

*Катарометрический течеискатель* — течеискатель, действие которого состоит в регистрации изменения теплопроводности газовой среды при поступлении в нее пробного вещества.

*Электронно-захватный течеискатель* — течеискатель, действие которого основано на обнаружении пробных веществ, склонных к образованию отрицательных ионов.

*Манометрический течеискатель* — течеискатель, основанный на регистрации изменения давления.

*Электроразрядный течеискатель* — течеискатель, действие которого состоит в обнаружении течи по возбуждению разряда или изменению его характеристик.

*Радиоактивный течеискатель* — течеискатель, действие которого основано на регистрации интенсивности излучения радиоактивного вещества.

*Акустический течеискатель* — течеискатель, действие которого основано на регистрации упругих колебаний, возбуждаемых при перетекании веществ через течи в герметизированном изделии (при регистрации упругих колебаний ультразвукового диапазона допустимо применение термина «ультразвуковой»).

*Калиброванная течь* — устройство, воспроизводящее определенный расход вещества через течь.

*Обдуватель* — устройство для создания струи пробного газа или контрольной среды и подачи ее на поверхность герметизированного изделия при течеискании.

*Щуп течеискателя* — устройство для сканирования поверхности герметизированного изделия при течеискании.

*Чувствительность течеискателя* — отношение изменения сигнала течеискателя к вызывающему его изменению расхода пробного вещества через течи.

*Порог чувствительности течеискателя* — наименьший расход пробного вещества или наименьшее изменение давления, регистрируемые течеискателем.

*Постоянная времени натекания* — произведение объема изделия на отношение разности давлений по обе стороны от течи к расходу вещества через течь.

### 1.3. УСЛОВНЫЕ ПРОХОДЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Номинальные условные проходы установлены ГОСТ 18626–73, который распространяется на элементы вакуумного оборудования и вакуумных систем, работающих в диапазоне давлений  $10^5 \dots 10^{-5}$  Па.

1. Номинальные условные проходы для средств получения вакуума (насосов, агрегатов и др.), элементов вакуумных систем (клапанов, ловушек, натекателей и др.) и фланцевых соединений манометрических преобразователей, вакуумных вводов должны соответствовать ряду нормальных линейных размеров 0,1; 0,25; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300 мм.

Пример обозначения условного прохода 100 мм:  $D_y 100$ .

2. Для специальных технологических конструкций вакуумных установок, систем (например, фланцевых, штуцерных соединений и элементов трубопроводов) допускается применять номинальные условные проходы ряда R 10: 8; 12; 20; 32; 50; 80; 125; 200; 320; 500; 800; 1250; 2000; 3150; 5000 мм и 900 мм по ряду R 20 (ГОСТ 8032–84).

### 1.4. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВАКУУМНЫЕ СХЕМЫ

Правила выполнения принципиальных вакуумных схем регламентированы ГОСТ 2.797–81. На принципиальной схеме изображают все вакуумные элементы или устройства, необходимые для реализации и контроля в установке заданных

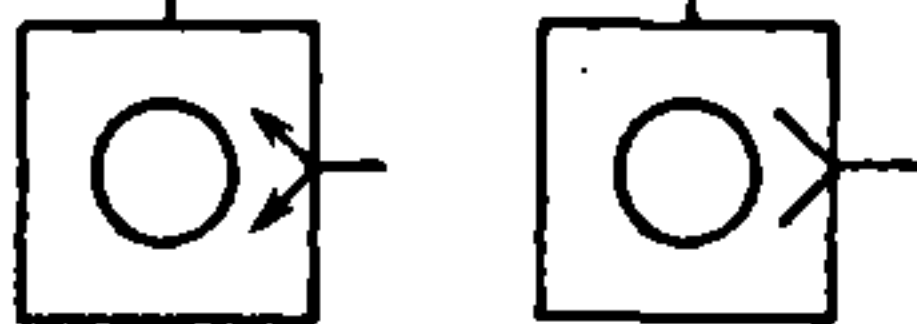
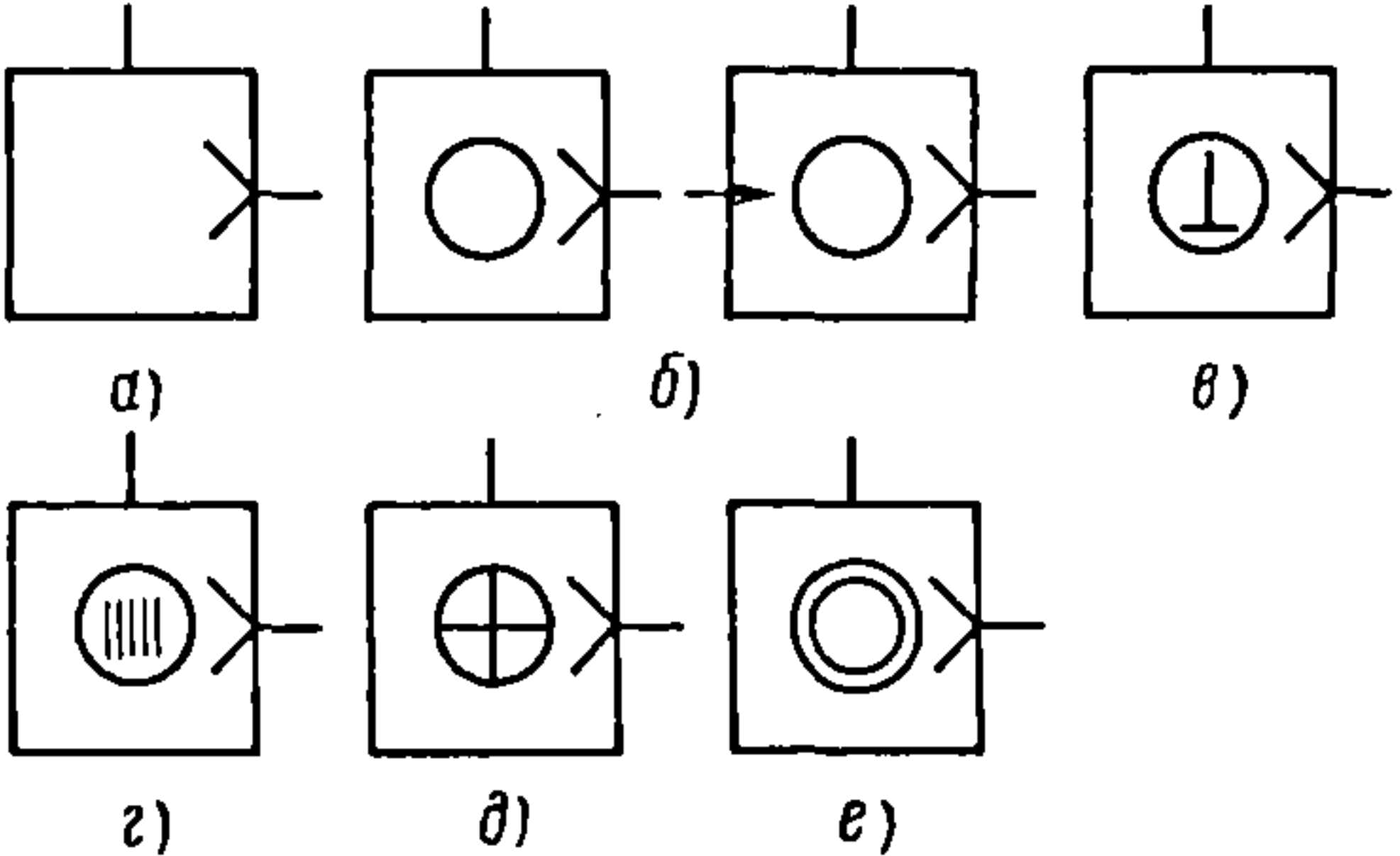
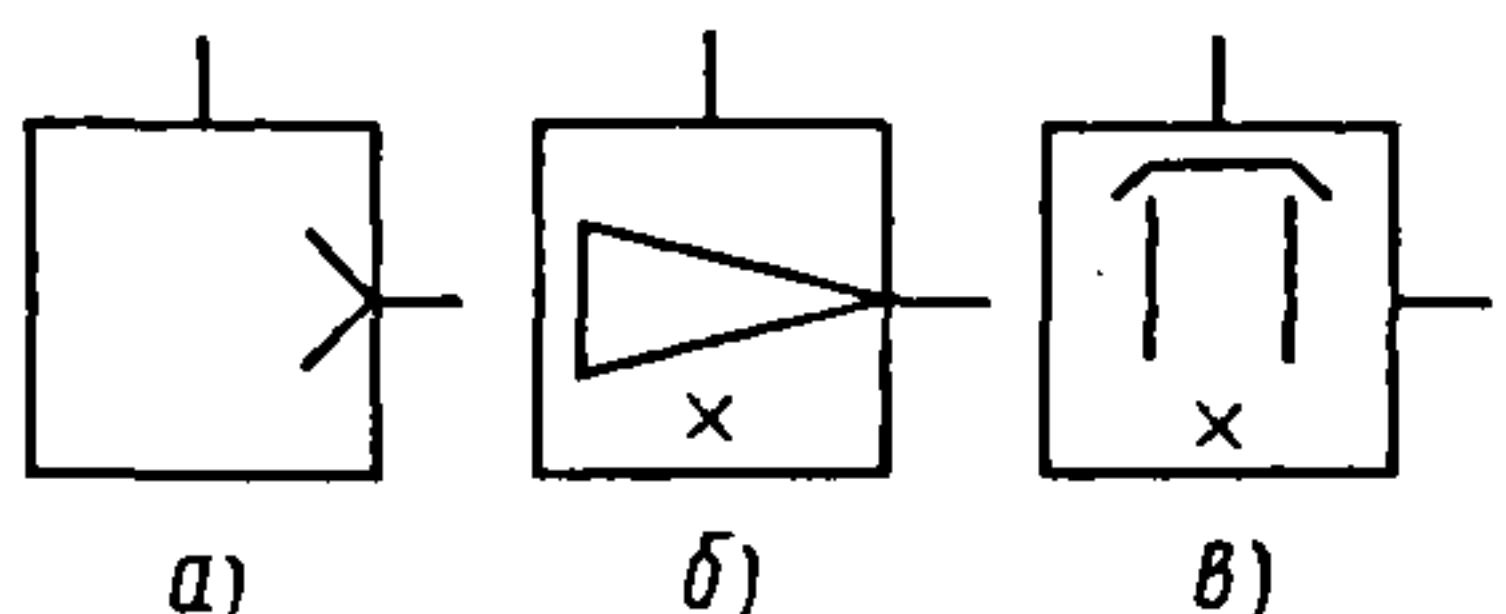
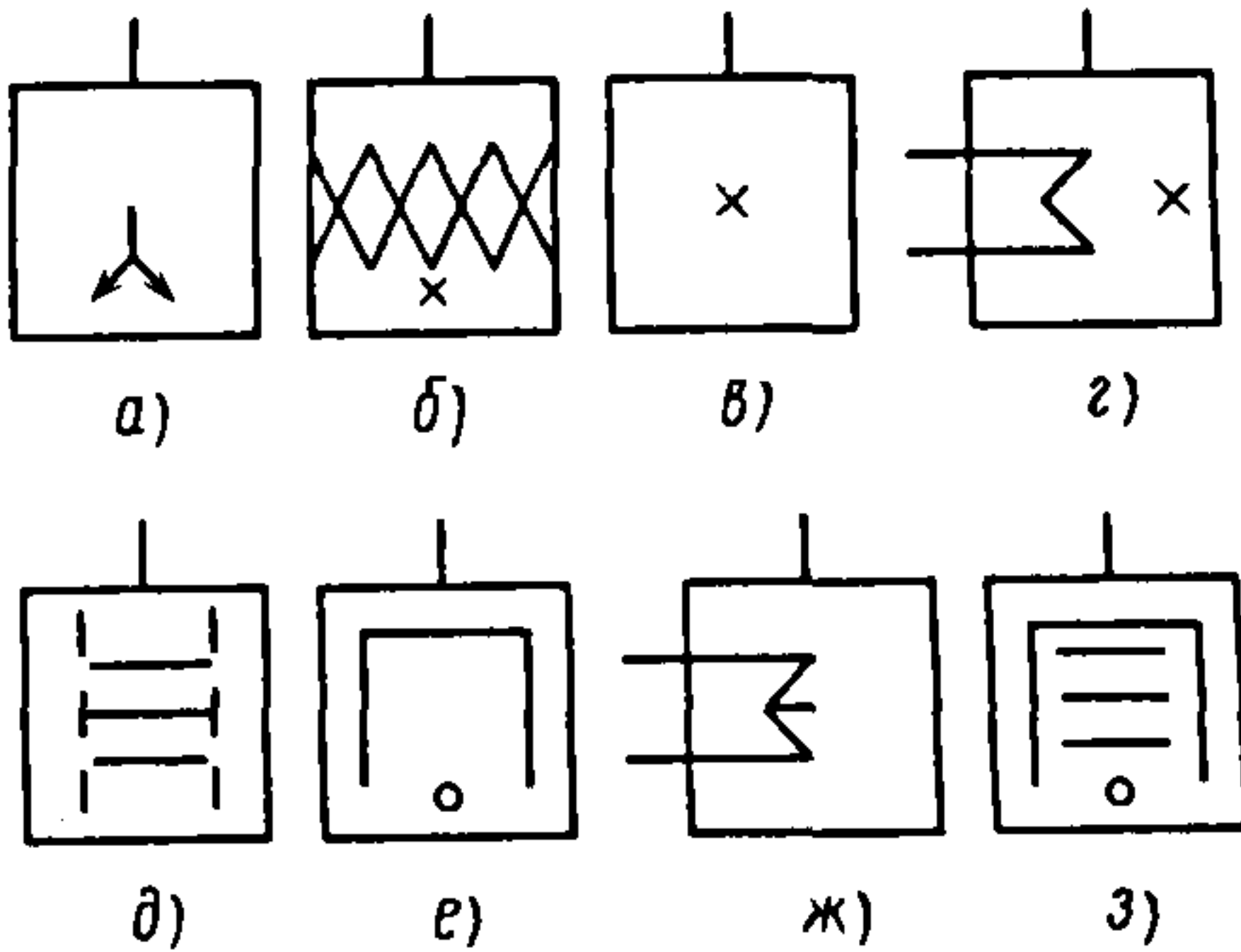


вакуумных процессов, и все вакуумные связи между ними.

Элементы и устройства на принципиальной вакуумной схеме изображают с

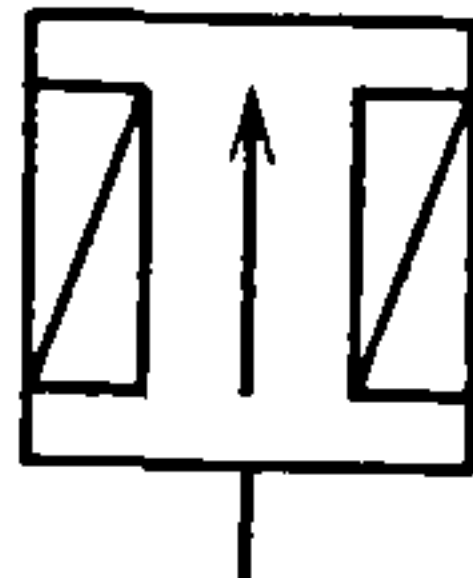
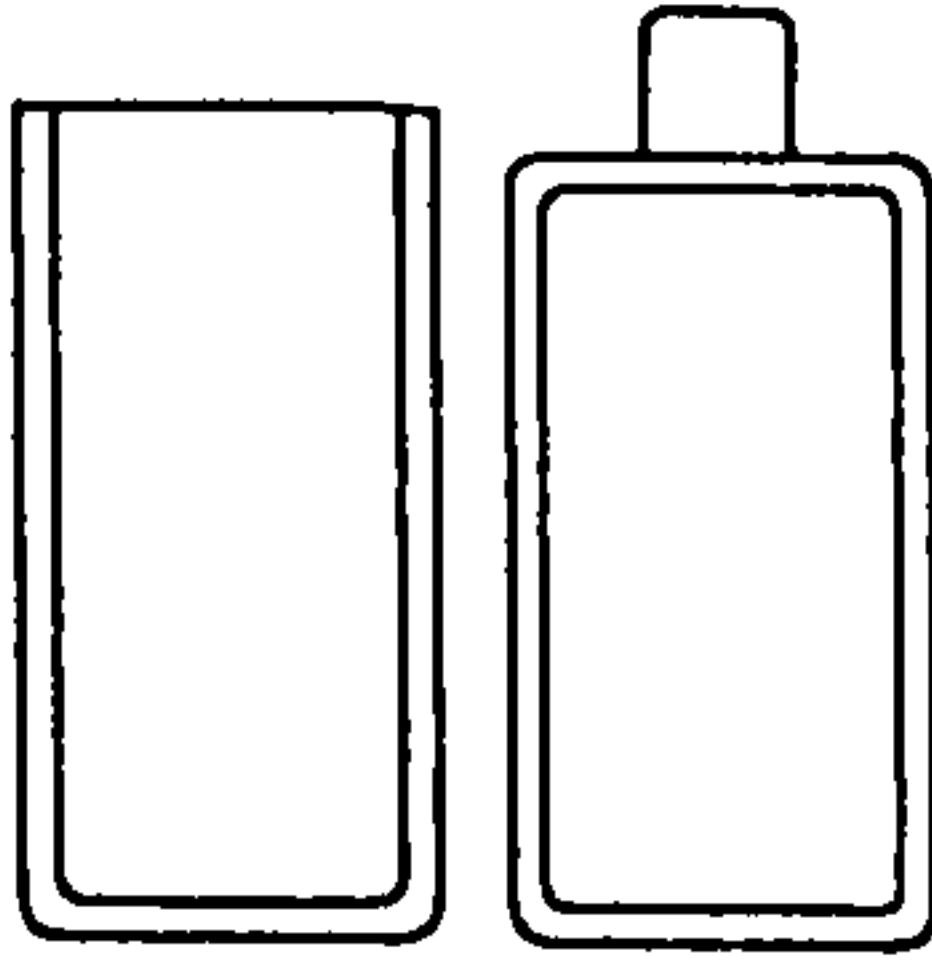
помощью условных графических обозначений в соответствии с ГОСТ 2.721-74, 2.784-96, 2.785-70, 2.787-71, 2.796-95 и 2.797-81 (табл. 1.1).

### 1.1. Графические обозначения элементов и устройств на принципиальных вакуумных схемах

Элемент вакуумной схемы	Условное графическое изображение
Насос вакуумный. Общее обозначение. Примечание. Стрелки можно не изображать, если это не приведет к неправильному пониманию обозначения	
Насос вакуумный механический: а – общее обозначение; б – вращательный объемный (пластинчато-роторный, пластинчато-статорный, плунжерный – без газобалласта и газобалластный; в – двухроторный (насос Рутса); г – турбомолекулярный; д – водокольцевой. Примечание. Одна окружность – одна ступень, две окружности – две ступени и больше, например, е – насос вращательный объемный, двухступенчатый	
Насос вакуумный струйный: а – общее обозначение; б – эжекторный; в – диффузионный. Примечание. Вместо значка х может быть указана химическая формула жидкости; например, вода – $H_2O$ , масло – $CH$ , ртуть – $Hg$ и т.д.	
Насос вакуумный сорбционный: а – общее обозначение; б – адсорбционный; в – сублимационный (испарительно-геттерный); г – криосорбционный; д – испарительный ионный; е – магнитный электроразрядный; ж – криогенный; з – комбинированный (комбинация геттерного и магнитного электроразрядного насосов, размещенных в едином корпусе). Примечание. Вместо значка х может быть указана химическая формула сорбента	


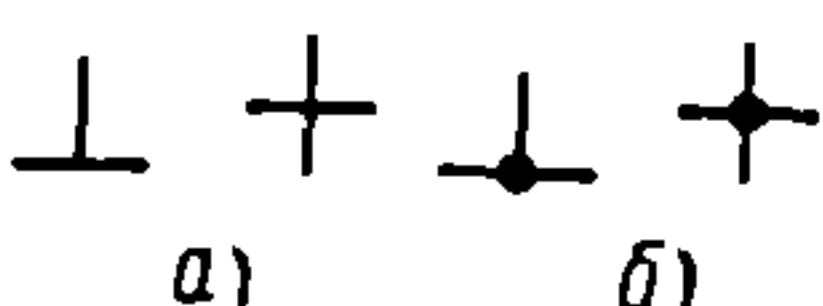
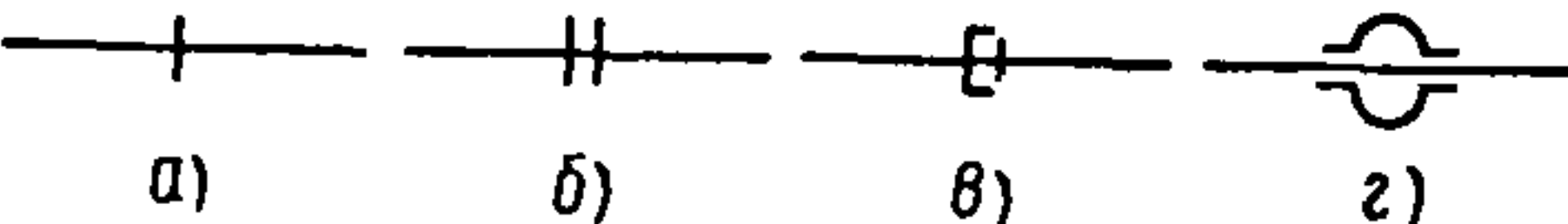
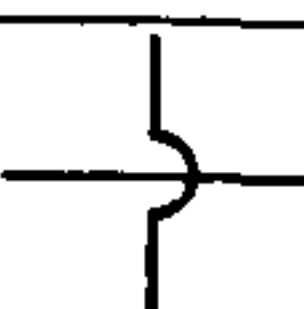
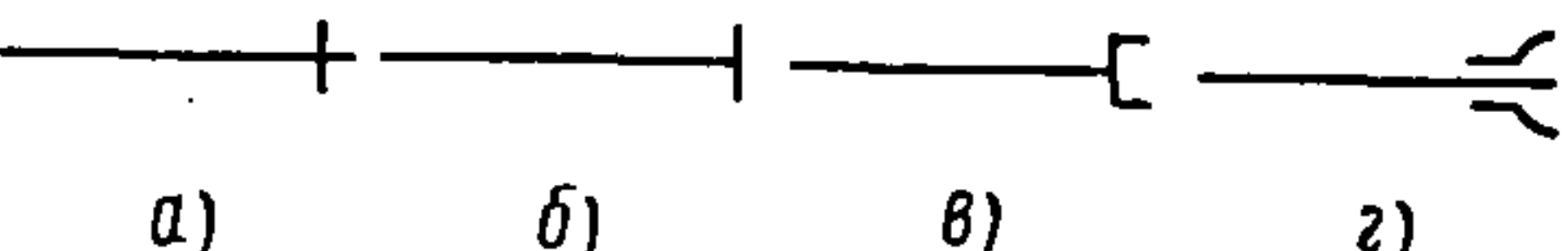
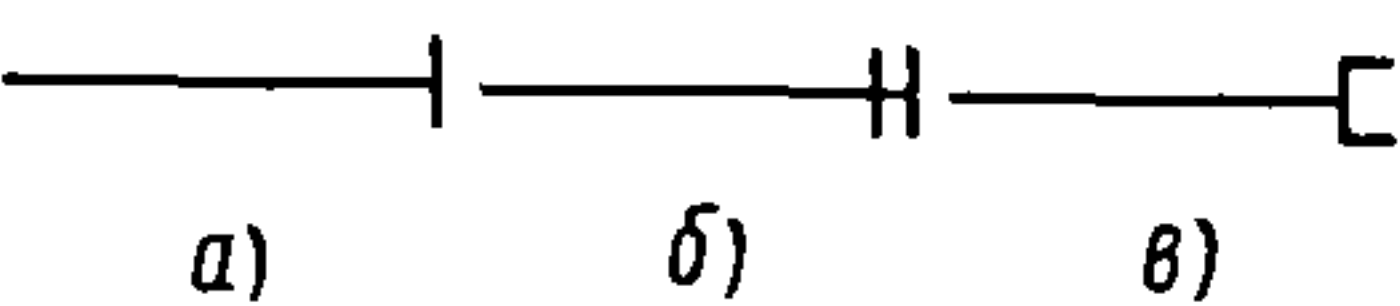
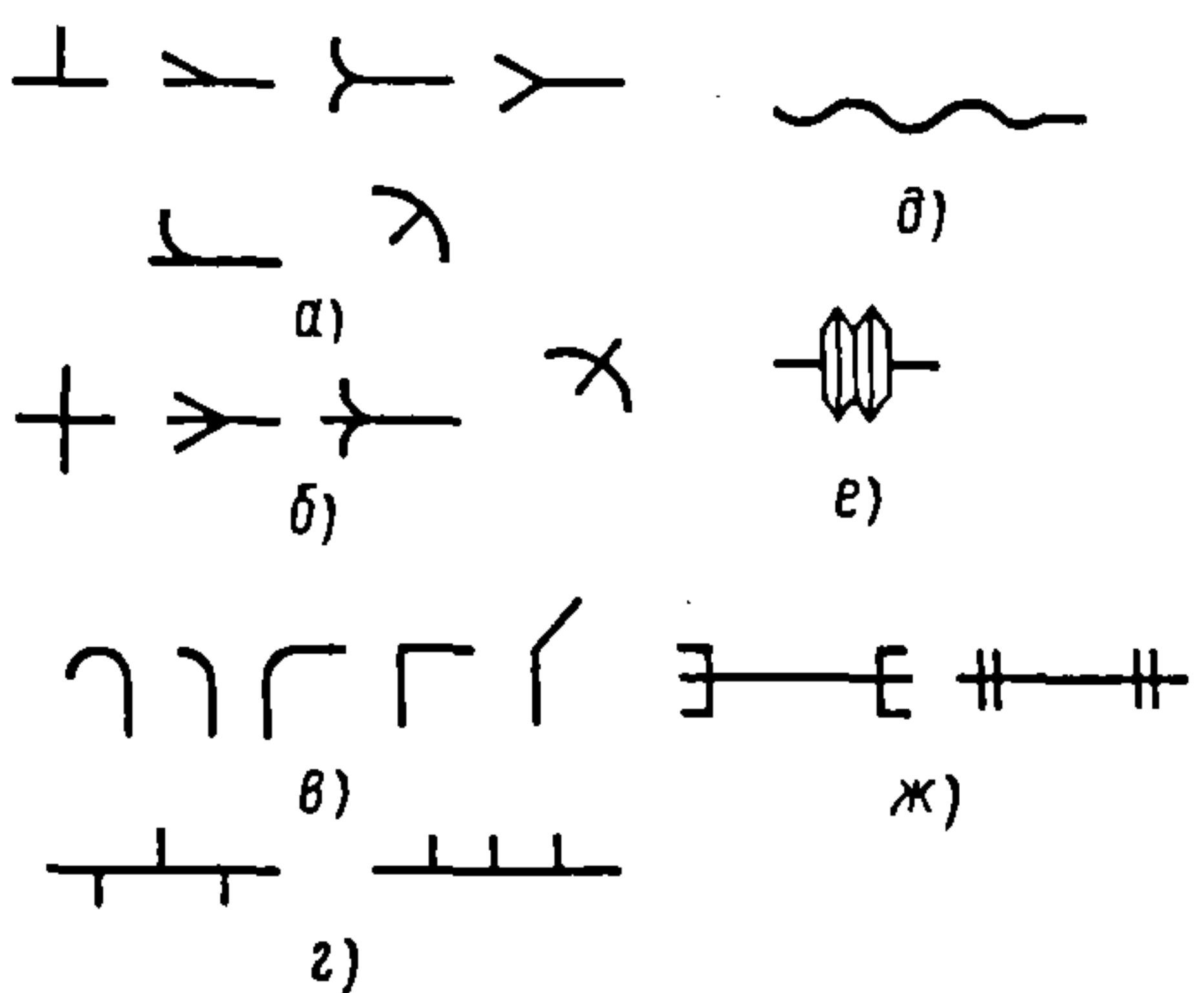


Продолжение табл. 1.1

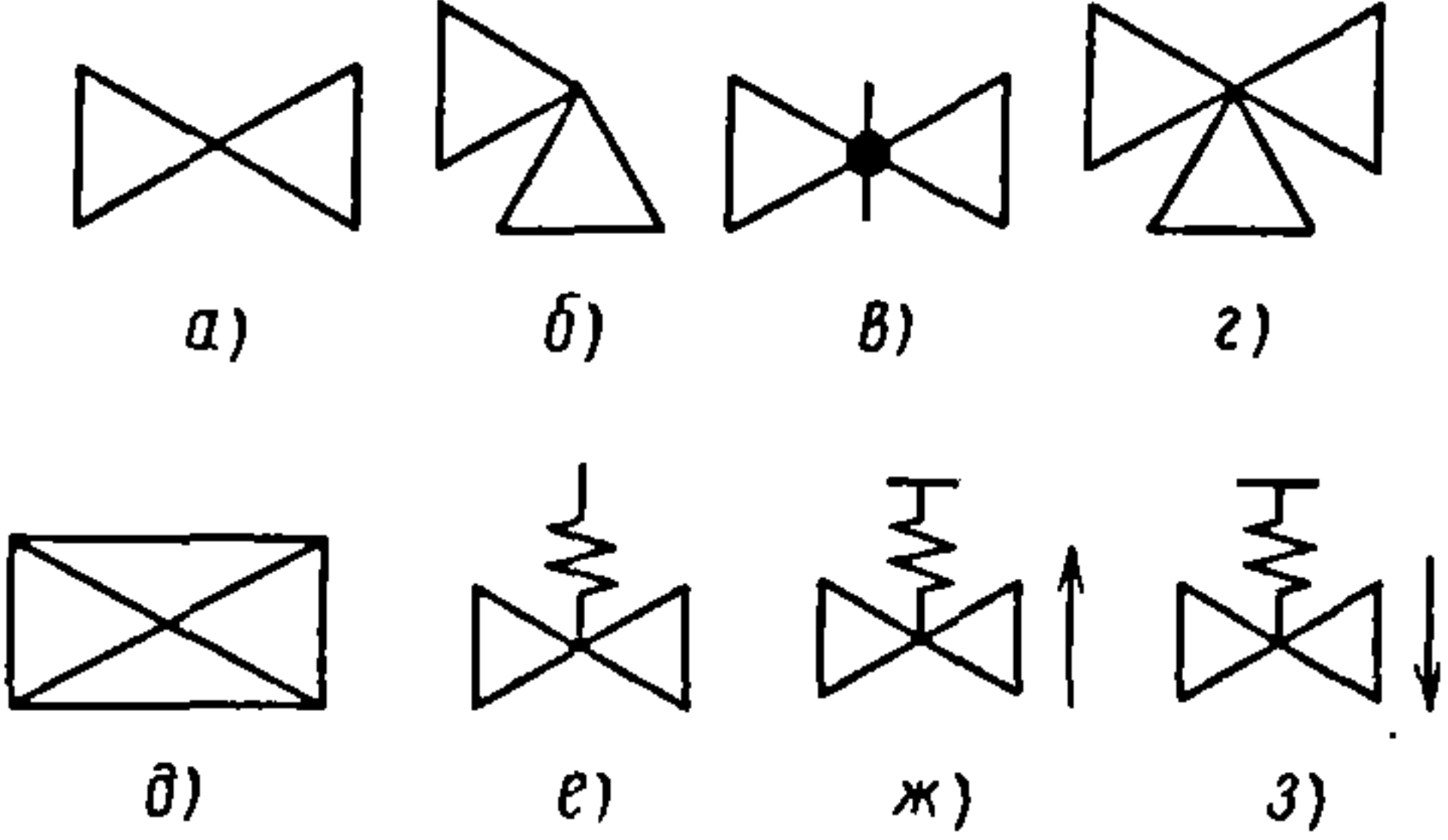
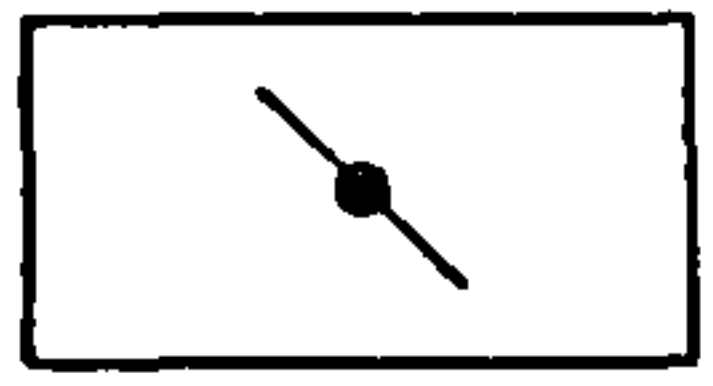
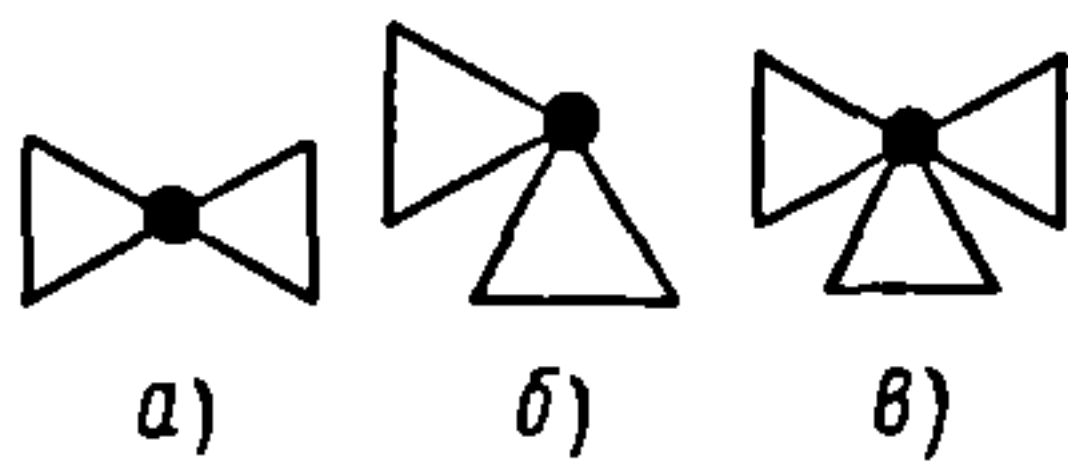
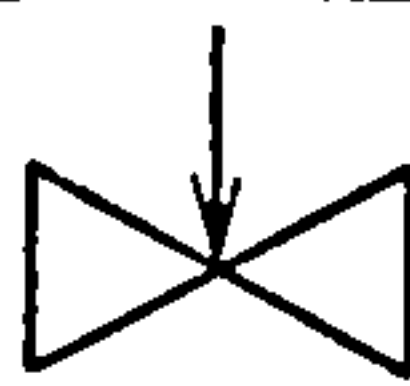

Элемент вакуумной схемы	Условное графическое изображение
<p>Ловушка (отражатель):</p> <p><i>а</i> – общее обозначение;</p> <p><i>б</i> – охлаждаемая циркулирующей жидкостью;</p> <p><i>в</i> – охлаждаемая воздухом;</p> <p><i>г</i> – охлаждаемая жидкостью, заливаемой в резервуар;</p> <p><i>д</i> – термоэлектрическая;</p> <p><i>е</i> – адсорбционная;</p> <p><i>ж</i> – ионная.</p> <p>Примечание. Вместо значка <i>х</i> может быть указана температура охлаждаемой поверхности</p>	 <p>а) б) в) г) д) е) ж)</p>
<p>Вакуумметр:</p> <p><i>а</i> – общее обозначение;</p> <p><i>б</i> – деформационный;</p> <p><i>в</i> – жидкостный;</p> <p><i>г</i> – ионизационный;</p> <p><i>д</i> – магнитный электроразрядный;</p> <p><i>е</i> – тепловой</p>	 <p>а) б) в) г) д) е)</p>
Теченскатель	
Масс-спектрометр	
<p>Камера вакуумная:</p> <p><i>а</i> – общее обозначение;</p> <p><i>б</i> – колпак вакуумный;</p> <p><i>в</i> – прогреваемая часть вакуумной системы</p>	 <p>а) б) в)</p>
<p>Сосуд Дьюара:</p> <p><i>а</i> – открытый;</p> <p><i>б</i> – закрытый</p>	 <p>а) б)</p>



Продолжение табл. 1.1

Элемент вакуумной схемы	Условное графическое изображение
Трубопровод вакуумный. Примечание. Направление газового потока при откачке в случае необходимости обозначается стрелкой	
Соединение вакуумных трубопроводов: а – общее обозначение; б – неразъемное (сварное, паяное, завальцованное)	
Соединение элементов вакуумных трубопроводов разъемное: а – общее обозначение; б – фланцевое; в – штуцерное; г – муфтовое эластичное	
Перекрещивание вакуумных трубопроводов (без соединения)	
Конец вакуумного трубопровода под разъемы соединения: а – общее обозначение соединения; б – фланцевое; в – штуцерное; г – муфтовое эластичное	
Конец вакуумного трубопровода с заглушкой (пробкой): а – общее обозначение; б – фланцевый; в – штуцерный	
Детали соединений вакуумных трубопроводов: а – тройники; б – крестовины; в – колена, отводы с различными углами; г – гребенка; д – шланг вакуумный; е – компенсатор сильфонный. Примечания. 1. При обозначении конструктивного оформления соединения элементов вакуумного трубопровода с сопрягаемыми деталями следует пользоваться обозначениями, установленными для разъемных соединений. 2. Обозначения элементов допустимо изображать в соответствии с их действительной конфигурацией, например, ж – патрубки со штуцерным и фланцевым соединениями	

Окончание табл. 1.1

Элемент вакуумной схемы	Условное графическое изображение
Вентили (клапаны): <i>а</i> – проходной; <i>б</i> – угловой; <i>в</i> – с задвижкой; <i>г</i> – трехходовой; <i>д</i> – дроссельный; <i>е</i> – предохранительный; <i>ж</i> – запорный быстродействующий на открытие; <i>з</i> – запорный быстродействующий на закрытие	
Затвор поворотный	
Кран вакуумный: <i>а</i> – проходной; <i>б</i> – угловой; <i>в</i> – трехходовой	
Натекатель, клапан регулирующий	
Шайба дроссельная, сужающее устройство расходомерное (диафрагма)	

Размеры основных графических обозначений элементов по схемам вакуумных систем приведены в табл. 1.2. Вакуумные связи изображают с помощью линий связи, трубопроводы на схеме показывают сплошными основными линиями независимо от функционального назначения.

Каждый элемент (устройство) вакуумной системы, изображенный на схеме, должен иметь буквенно-цифровое позиционное обозначение, состоящее из буквенного обозначения (кода), соответствующего виду элемента, и порядкового номера, проставляемого после буквенного кода. Буквенный код элемента (устройства) должен включать в себя одну прописную букву (общий буквенный код – обязательный) или несколько прописных букв латинского алфавита. Первая буква кода элемента (общий буквенный код) должна соответствовать виду группы эле-

ментов, к которой принадлежит данный элемент (например, клапан тарельчатый VT принадлежит к клапанам вида V).

#### Буквенные коды наиболее распространенных видов элементов устройств

Устройство (общее обозначение) ... А

Насос вакуумный N:

механический ..... NI  
 вращательный объемный без  
 газобалласта ..... NV  
 вращательный объемный  
 газобалластный ..... NL  
 двухроторный (насос Рутса) .... NZ  
 турбомолекулярный ..... NR  
 водокольцевой ..... NW  
 струйный ..... NB  
 эжекторный ..... NH  
 диффузионный ..... ND  
 сорбционный ..... NS  
 адсорбционный ..... NA  
 испарительный геттерный ... NG



кросорбционный . . . . . NC	магнитный электроразрядный PM
испарительный ионный . . . . . NE	тепловой . . . . . PT
магнитный электроразрядный NM	Течеискатель . . . . . G
криогенный . . . . . NK	Масс-спектрометр . . . . . S
комбинированный . . . . . NP	Камера С:
Ловушка (отражатель) В:	вакуумная . . . . . CV
охлаждаемая циркуляцией	колпак вакуумный . . . . . CN
жидкости . . . . . BW	прогреваемая часть вакуумной
охлаждаемая воздухом . . . . . BA	системы . . . . . CT
охлаждаемая жидкостью,	Клапан (затвор) V:
заливаемой в резервуар . . . . . BL	тарельчатый (диск) . . . . . VT
термоэлектрическая . . . . . BT	регулируемый, дозирующий VF
сорбционная . . . . . BS	с ручным приводом . . . . . VP
ионная . . . . . BE	с дистанционным управлением VA
Вакуумметр Р:	с пневмо- или гидроприводом VP
деформационный . . . . . PD	с электромагнитным приводом VE
жидкостный . . . . . PL	с электроприводом . . . . . VM
ионизационный . . . . . PA	

### 1.2. Размеры основных графических обозначений элементов по схемам вакуумных схем

Элемент вакуум-ной схемы	Обозначение	Элемент вакуумной схемы	Обозначение
Насос вращательный объемный (пластинчатороторный, пластинчатороторный, плунжерный)		Ловушка (отражатель) с резервуаром	
Насос эжекторный		Манометр. Общее назначение	
Насос диффузионный		Прогреваемая часть вакуумной системы	

Примечание. Размер  $a$  следует выбирать из ряда 14, 20, 28, 40, 56 мм. Размер  $h$  должен быть не менее 1,5 мм.

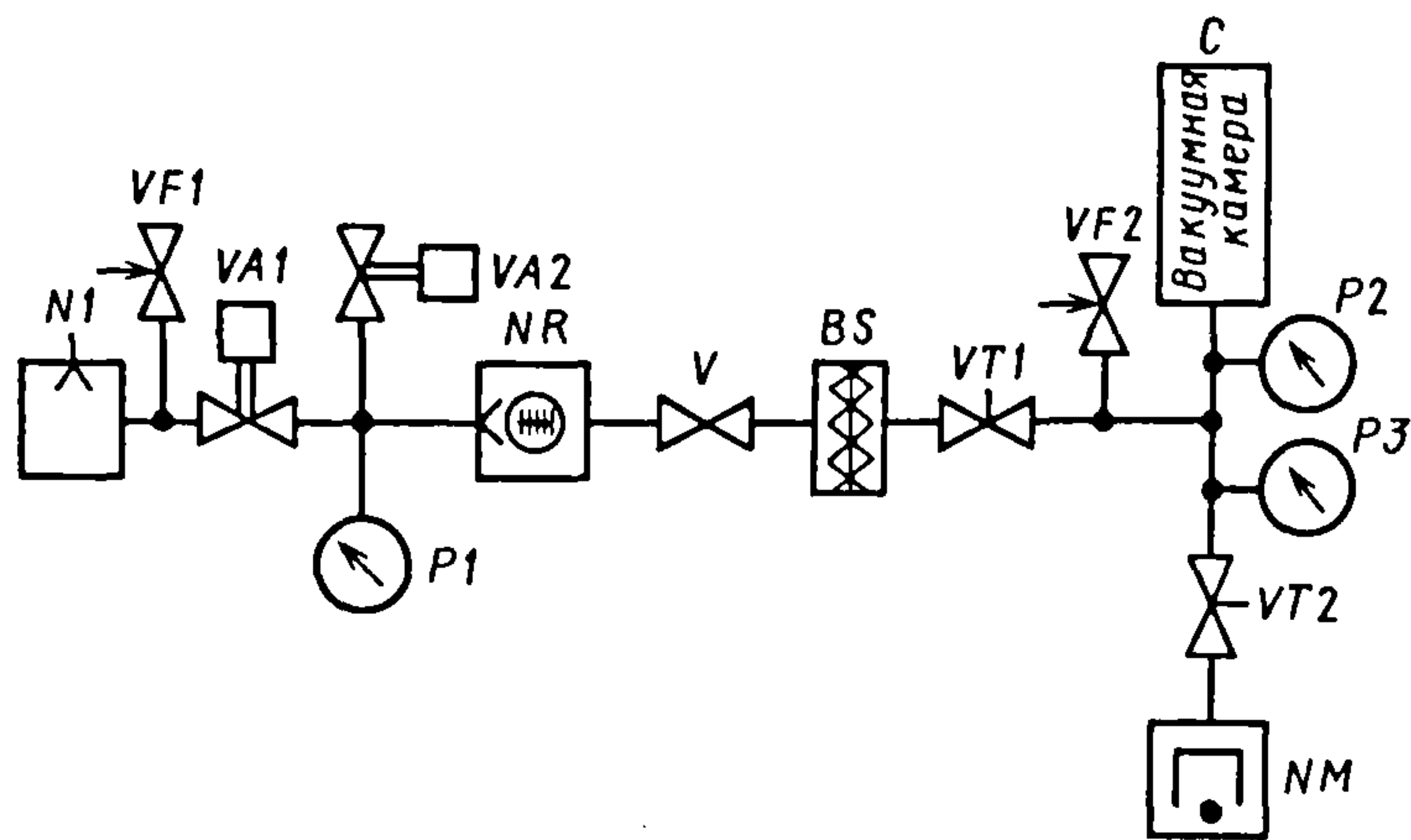


Рис 1.1. Пример выполнения принципиальной вакуумной схемы

Порядковый номер буквенно-цифрового позиционного обозначения элемента (устройства) записывают арабскими цифрами. Порядковые номера присваивают элементам в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо. Позиционные обозначения проставляют на схеме справа от условного графического обозначения элементов и (или) устройств либо над ним (рис. 1.1).

1.5. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В табл. 1.3 приведены основные, дополнительные и наиболее часто применяемые производные единицы СИ, внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ, в табл. 1.4 – множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц (ГОСТ 8.417–2002).

1.3. Основные, дополнительные и наиболее часто применяемые производные единицы СИ, а также допускаемые к применению внесистемные единицы

Параметр	Единица			Выражение через основные и дополнительные единицы СИ или соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Основные единицы				
Длина	метр	m	М	—
Масса	килограмм	kg	кг	—
Время	секунда	s	с	—
Сила электрического тока	ампер	A	А	—
Термодинамическая температура	кельвин	K	К	—
Количество вещества	моль	mol	моль	—
Сила света	кандела	cd	кд	—
Дополнительные единицы				
Плоский угол	радиан	rad	—	—
Телесный угол	стерадиан	sr	—	—



Окончание табл. 1.3

Окончание табл. 1.1

Параметр	Единица			Выражение через основные и дополнительные единицы СИ или соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Производные единицы				
Частота	герц	Hz	Гц	$\text{с}^{-1}$
Сила	ньютон	N	Н	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление	паскаль	Pa	Па	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия	джоуль	J	Дж	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность	ватт	W	Вт	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Количество электричества	кулон	C	Кл	$\text{с} \cdot \text{А}$
Электрическое напряжение	вольт	V	В	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Электрическая емкость	фарад	F	Ф	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
Электрическое сопротивление	ом	$\Omega$	Ом	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая проводимость	сиemens	S	См	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Поток магнитной индукции	вебер	Wb	Вб	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	T	Тл	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{а}^{-1}$
Индуктивность	генри	H	Гн	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{а}^{-2}$
Световой поток	люмен	lm	лм	кд·ср
Освещенность	люкс	lx	лк	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$
Внесистемные единицы				
Масса	атомная единица массы	u	а.е.м.	$1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ (приблизительно)
Время	минута	min	мин	60 с
	час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86 400 с
Объем, вместимость	литр	l	л	$10^{-3} \text{ м}^3$
Энергия	электрон-вольт	eV	эВ	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ (приблизительно)
Давление	бар	bar	бар	$10^5 \text{ Па}$
Частота вращения	оборот в секунду	г/	об/с	$1 \text{ с}^{-1}$
	оборот в минуту	г/min	об/мин	$0,016 \text{ с}^{-1}$

## 1.4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множи- тель	Приставка			Множи- тель	Приставка		
	Наимено- вание	Обозначение			Наиме- нование	Обозначение	
		русское	междуна- родное			русское	междуна- родное
$10^{18}$	экса	Э	E	$10^{-1}$	(деци)	А	d
$10^{15}$	пета	П	P	$10^{-2}$	(санти)	с	c
$10^{12}$	тера	Т	T	$10^{-3}$	милли	м	m
$10^9$	гига	Г	G	$10^{-6}$	микро	мк	μ
$10^6$	мега	М	M	$10^{-9}$	нано	и	n
$10^3$	кило	к	k	$10^{-12}$	пико	п	p
$10^2$	(гекто)	г	h	$10^{-15}$	фемто	ф	f
$10^1$	(дека)	да	da	$10^{-18}$	атто	а	a

Примечание. В скобках указаны приставки, которые допускается применять только в наименованиях кратных и дольных единиц, получивших широкое распространение (например, гектар, декалитр, дециметр, сантиметр).

### 1.6. СООТНОШЕНИЕ ЕДИНИЦ ДАВЛЕНИЯ И ПОТОКА ГАЗА

За единицу давления в вакуумной технике в СИ принят паскаль (ньютон на квадратный метр). В зарубежной литературе широко используют миллибар, а также мм рт.ст. (Торр). Коэффициенты перевода единиц давления приведены в табл. 1.5. Для быстрого приближенного определения переводных коэффициентов удобно пользоваться графическим изображением масштабных шкал (рис. 1.2).

### 1.5. Коэффициенты перевода единиц давления

Единица	Па	мбар	мм рт. ст.	ат
Па	1	$10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$
мбар	$10^2$	1	0,75	$9,87 \cdot 10^{-4}$
мм рт. ст.	$1,33 \cdot 10^2$	1,33	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
ат	$1,01 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^3$	760	1

За единицу газового потока принят  $\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Коэффициенты перевода единиц потока газа приведены в табл. 1.6.

### 1.6. Коэффициенты перевода единиц потока газа

Единица	$\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	$\text{Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	$\text{мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	$\text{мм рт. ст.} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	$\text{ат} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	1	103	10	7,5	9,87
$\text{Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	$10^{-3}$	1	$10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-3}$
$\text{мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	0,1	102	1	0,75	0,987
$\text{мм рт. ст.} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$	0,133	$1,33 \cdot 10^2$	1,33	1	1,32
$\text{ат} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	0,101	$1,01 \cdot 10^2$	1,01	0,76	1

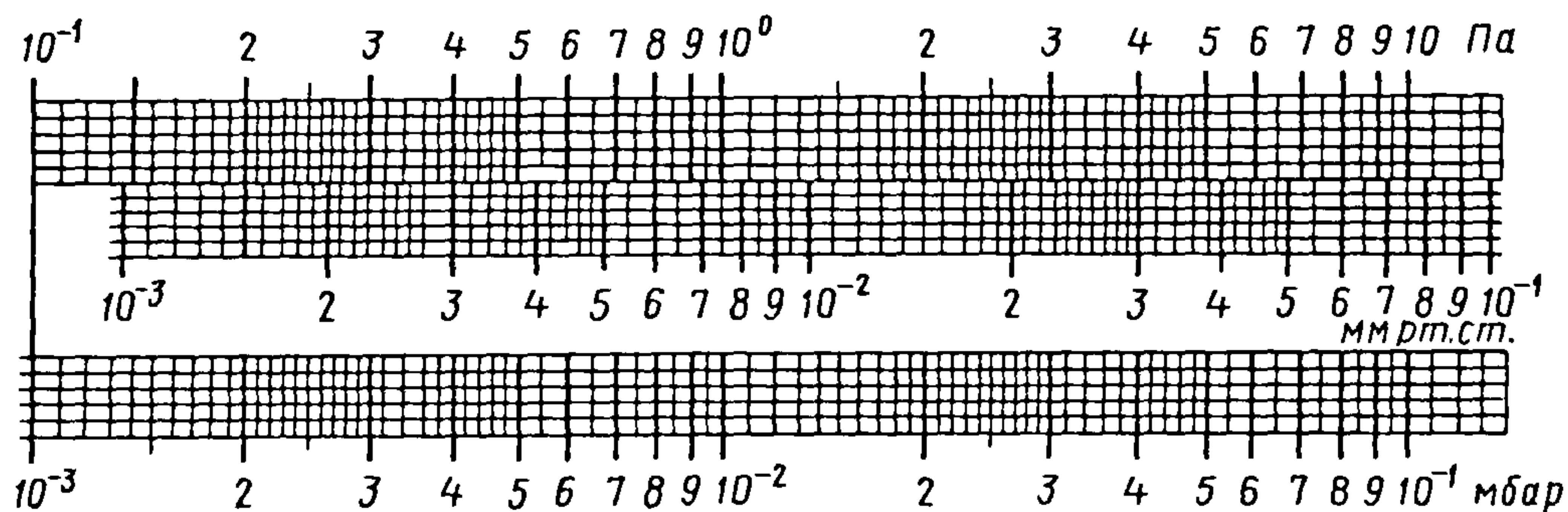


Рис. 1.2. Шкала перевода единиц давления

### 1.7. СОСТАВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

В табл. 1.7 приведены объемный и массовый составы атмосферного воздуха, а также парциальные давления его компонентов на уровне моря при  $T = 298 \text{ К}$  и относительной влажности 50 %.

Состав атмосферы Земли на различной высоте от ее поверхности не является однородным как в химическом отношении, так и по физическому состоянию (молекулы, атомы, ионы). Характеристи-

ка атмосферы Земли приведена в табл. 1.8 [10].

На расстоянии от поверхности Земли до 60 км газ состоит из нейтральных молекул. При дальнейшем увеличении расстояния возрастает концентрация электронов и ионов, а на расстоянии  $> 1000 \text{ км}$  газ состоит преимущественно из атомов. При удалении от поверхности Земли на несколько тысяч километров газовые частицы в основном ионизированы. С изменением по высоте давления и состава атмосферы меняются также ее температура и плотность.



### 1.7. Объемный и массовый составы атмосферного воздуха и парциальные давления его компонентов

Газ (пар)	Доля, %		Парциальное давление, Па
	объемная	массовая	
Азот	78,1	75,2	$7,9 \cdot 10^4$
Кислород	21,0	23,2	$2,1 \cdot 10^4$
Аргон	0,93	1,28	$9,3 \cdot 10^2$
Диоксид углерода	$33 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$	33
Неон	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1,8
Гелий	$5 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Метан	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Криптон	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Водород	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Гемииоксид	$5 \cdot 10^{-5}$	—	$5 \cdot 10^{-1}$
Ксенон	$9 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$
Озон	$7 \cdot 10^{-6}$	—	$7 \cdot 10^{-3}$
Водяной пар	1,6	—	$1,6 \cdot 10^3$

Примечание. Атмосферный воздух может иметь более высокую влажность, а также содержать до 0,1314 % диоксида и до  $2 \cdot 10^{-3}$  % метана, что приводит к некоторому количественному перераспределению составляющих воздушной среды.

### 1.8. Характеристика атмосферы Земли

Высота, км	Давление, Па	Число частиц в 1 см <sup>3</sup> объема	Состав
0	$10^5$	$2,5 \cdot 10^{19}$	N <sub>2</sub> ; O <sub>2</sub> ; Ar
11	$2,4 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{18}$	N <sub>2</sub> ; O <sub>2</sub> (O <sub>3</sub> ); Ar
20	$5,6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{18}$	
30	$10^3$	$4 \cdot 10^{17}$	
46	$10^2$	$3 \cdot 10^{18}$	
64	$10^1$	$10^{15}$	N <sub>2</sub> ; O <sub>2</sub> ; Ar
79	$10^0$	$10^{14}$	
102	$10^{-13}$	$10^{12}$	N <sub>2</sub> ; O <sub>2</sub> ; O
200	$10^{-4}$	$10^{10}$	N <sub>2</sub> ; N; O; O <sup>+</sup>
800	$10^{-7}$	$10^6$	O; O <sup>+</sup> ; H
6500	$10^{-10}$	$10^3$	H; H <sup>+</sup>
>22 000	$10^{-11}$	$10^1 \dots 10$	H <sup>+</sup> ; He <sup>2+</sup>

### 1.8. НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Число Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

Число Лошмидта  $N_L = 2,687 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>.

Постоянная Больцмана

$$k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Постоянная Стефана-Больцмана

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}.$$

Объем одного моля идеального газа при нормальных условиях

$$V_m = 22,413 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Универсальная газовая постоянная

$$R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Заряд электрона  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Масса покоящегося электрона

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Удельный заряд электрона

$$q_e = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Масса атома водорода (протона)

$$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Отношение массы протона к массе электрона  $m_p/m_e = 1836,151$ .

Скорость света в вакууме

$$c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Атомная единица массы (а.е.м.)

$$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Постоянная Планка

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{Гц}^{-1}.$$

Число молекул в 1 см<sup>3</sup> при нормальных условиях  $n = 2,687 \cdot 10^{19}$ .

### 1.9. ПРИВЕДЕНИЕ МАССЫ ТЕЛА В АТМОСФЕРЕ К МАССЕ ТЕЛА В ВАКУУМЕ

При точных экспериментальных работах, связанных с измерением массы тел, следует учитывать поправку на «потерю» массы тела в воздухе.

Действительная масса тела  $m_d$  в вакууме при взвешивании на воздухе связана с кажущейся массой  $m_k$  соотношением

$$m_d = m_k [1 + \rho_v (\rho_T^{-1} - \rho_p^{-1})],$$

где  $\rho_v$  — плотность сухого воздуха при нормальных условиях, равная  $0,001205 \text{ г/см}^3$ ;

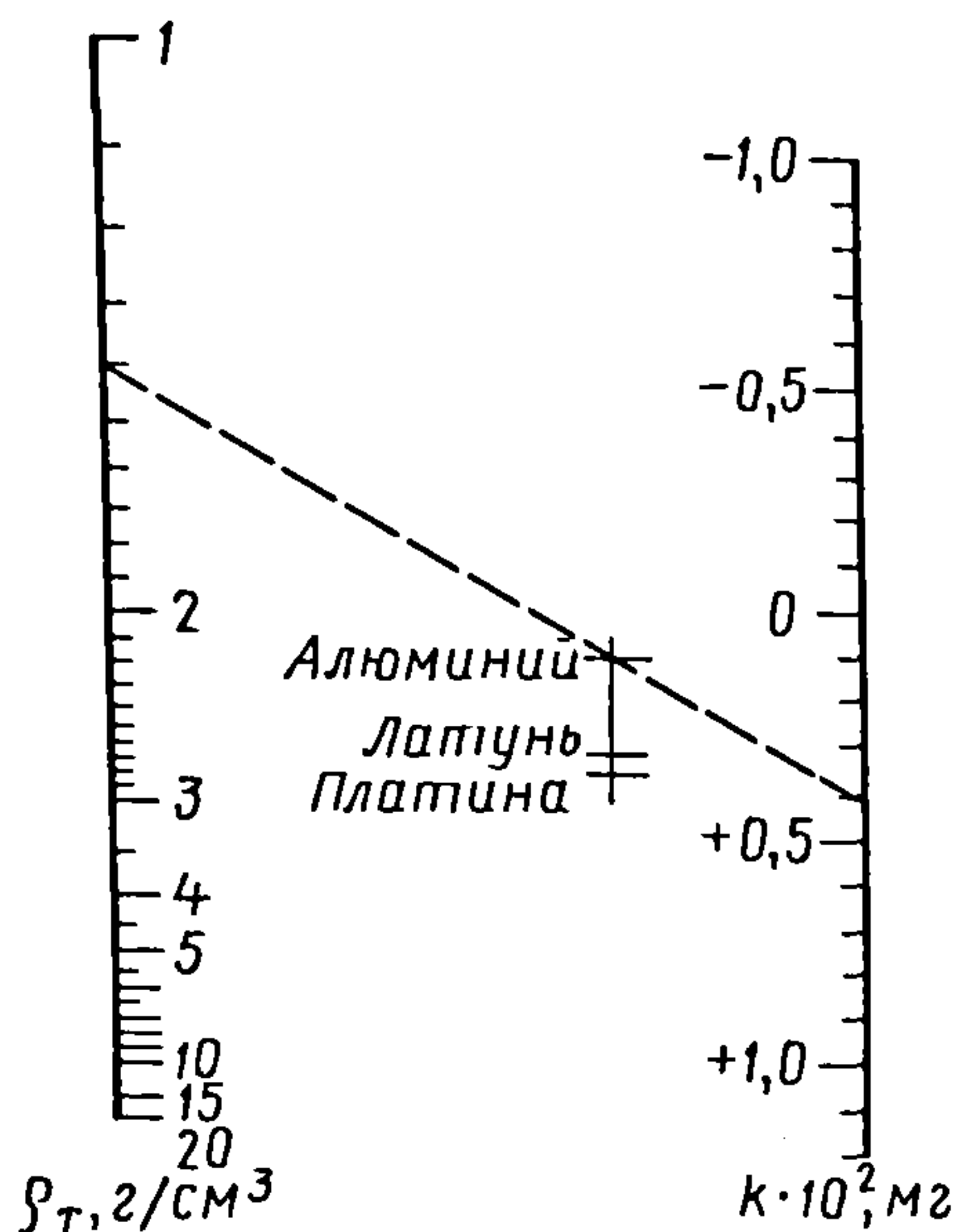


Рис. 1.3. Номограмма для определения поправочного коэффициента  $k$  на 1 г массы тела

$\rho_t$  — плотность взвешиваемого тела, г/см<sup>3</sup>;  
 $\rho_p$  — плотность материала разновеса, г/см<sup>3</sup>

(для латунных и хромоникелевых гирь она равна 8,40, алюминиевых — 2,70, для гирь из коррозионно-стойкой стали — 8).

Поправочный коэффициент на потерю массы тела в воздухе

$$k = \rho_v (\rho_t^{-1} - \rho_p^{-1}).$$

Для быстрого и приближенного определения действительной массы можно пользоваться номограммой (рис. 1.3) [75].

**Пример.** Для вещества плотностью  $\rho_t = 1,4$  г/см<sup>3</sup>, взвешенного на весах с алюминиевыми гирями, на 1 г показаний должна быть сделана поправка +0,42 мг.

### 1.10. ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

При практических инженерных расчетах параметров газов по соотношениям молекулярно-кинетической теории за исходные данные можно принимать ориентировочные газокинетические параметры некоторых наиболее распространенных в технике газов (табл. 1.9). Эти данные соответствуют температуре 298 К и давлению 0,1 МПа.

### 1.9. Ориентировочные газокинематические параметры наиболее распространенных в технике газов

Газ	Химическая формула	Среднее арифметическое скоростей молекул, м/с	Средняя длина свободного пути молекул $\lambda \cdot 10^6$ , см	Среднее число столкновений $n \cdot 10^{-9}$ одной молекулы за 1 с	Диаметр молекул $\sigma \cdot 10^8$ , см	Число молекул $N \cdot 10^{-20}$ , ударяющихся в 1 см <sup>2</sup> поверхности за 1 с при $T = 273$ К и $p = 133$ Па	Число молекул $N_m \cdot 10^{-15}$ , образующих на поверхности мономолекулярный слой	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Азот	N <sub>2</sub>	474	5,92	7,97	3,70	4,015	0,81	1,251
Аргон	Ar	397	6,67	5,7	3,67	3,363	0,85	1,783
Водород	H <sub>2</sub>	1770	12,20	14,45	2,75	14,97	1,52	0,089
Воздух	—	467	6,69	6,98	3,74	3,95	0,82	1,293
Гелий	He	1256	19,36	7,16	2,18	10,63	2,41	0,178
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	378	4,40	8,61	4,65	3,204	0,53	1,429
Кислород	O <sub>2</sub>	444	7,10	6,26	3,64	3,758	0,87	1,429
Криптон	Kr	274	5,34	6,48	4,15	2,324	0,66	3,74
Ксенон	Xe	219	3,93	5,71	4,91	1,856	0,47	5,85
Метан	CH <sub>4</sub>	627	4,70	1,68	5,19	5,308	1,72	0,716
Неон	Ne	559	13,75	—	2,60	4,733	—	0,90
Оксид углерода	CO	474	5,90	7,99	3,70	4,016	0,81	1,25



### 1.11. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Вакуумную технологию впервые использовали в промышленных масштабах в производстве ламп накаливания, а затем и электровакуумных радиоламп.

Особенности протекания физических и физико-химических процессов в вакууме (по сравнению с процессами при атмосферном давлении): увеличение в десятки – сотни раз скорости испарения материалов, интенсификация в десятки раз выделения растворенных в них газов; значительный сдвиг равновесия в системах газ – материал; снижение в несколько раз температуры кипения жидкостей; уменьшение в десятки – сотни раз скорости окисления; рост скорости диффузии; электросопротивления и уменьшения теплопроводности разреженных газов; взаимодействие нейтральных и заряженных частиц в вакууме и др.

Эти особенности открыли огромные возможности в интенсификации многих технологических процессов, в повышении качества получаемых материалов и создании новых материалов с новыми свойствами, в создании новых приборов, аппаратов и машин, в проведении научных исследований.

В настоящее время трудно назвать отрасль промышленности, науки и техни-

ки, на развитие которой не оказало прогрессивного влияния использование вакуума. Важно отметить, что вакуумная технология по своей сущности относится к наиболее экологически чистым. В качестве примера можно привести вакуумную технологию регенерации минеральных масел после использования в двигателях, редукторах, трансформаторах, турбинах и др.

В отличие от способа регенерации нефтепродуктов с помощью концентрированной серной кислоты, связанного с известными технологическими проблемами смол, разработан экологически чистый вакуумный метод. Сущность метода заключается в следующем. Отработанные масла фильтруют, обезвоживают и освобождают от низкокипящих компонентов. Далее масла перемешивают с небольшим количеством натрия, в реакцию с которым вступают примеси, образуя осадок. Молекулярной дистилляцией этот осадок отгоняют от масла и сжигают (например, в отопительной установке) для получения тепловой энергии.

О важности метода можно судить по тому, что только в промышленно развитых странах Западной Европы ежегодно потребляется более 4 млн т смазочных материалов.

В табл. 1.10 указаны области применения вакуумной техники и диапазоны рабочих давлений.

1.10. Области применения вакуумной техники и диапазоны рабочих давлений

Метод	Область применения	Давление, Па
Нанесение тонких пленок	Электронная промышленность (тонкопленочные элементы микросхем, жидкокристаллические индикаторы, кварцевые стабилизаторы частот)	$10^{-1} \dots 10^{-6}$
	Оптическая промышленность (интерференционные фильтры, лазерные и полупрозрачные зеркала, просветленная оптика: очки, линзы, микроскопы, бинокли)	$10^{-4} \dots 10^{-6}$
	Энергетика (солнечные элементы гелиотехники)	$10^{-3}$
	Электротехническая промышленность (конденсаторные, резистивные и проводящие пленки)	$10^{-2}$
	Инструментальное производство (нанесение упрочняющего покрытия режущих инструментов)	$10^{-2}$

Продолжение табл. 1.10

Метод	Область применения	Давление, Па
Нанесение тонких пленок	Автомобильная промышленность (фары, фонари, арматура)	$10^{-2} \dots 10^{-4}$
	Производство бытовых зеркал, игрушек, сувениров, украшений, пуговиц, зубных протезов, отражающих стекол для зданий, декоративных тканей, фольги, бумаги, защитных и износостойких покрытий	$10^{-2} \dots 10^{-3}$
Вакуумная металлургия	Получение чистых материалов (плавка и очистка высококачественных сталей и тугоплавких металлов; электронно-лучевая плавка и сварка, изготовление монокристаллов и тугоплавких оксидов: гранатов, сапфиров, рубинов)	$10^{-1} \dots 10^{-3}$
Пропитка в вакууме	Электротехническая промышленность (электроизоляционные материалы, обмотки трансформаторов и электродвигателей, кабелей)	$10^2$
	Изготовление упаковочных и асбестовых материалов, цветных грифелей, материалов с волокнистой основой, рыболовных сетей	$10^3$
Обезгаживание, вакуумирование (откачка)	Электротехническая промышленность (подготовка изолирующих пластмасс для кабелей, масел для конденсаторов и трансформаторов)	$10^2$
	Электронная промышленность (производство электровакуумных приборов всех видов, поддержание вакуума при работе мощных выпрямителей)	$10^{-4} \dots 10^{-8}$
	Изготовление восков, красителей, термометров с заполненными жидкостью капиллярами, заполнение духами небольших пузырьков, упаковка продуктов питания	$10^3$
	Научное аппаратостроение (создание ускорителей элементарных частиц, электронных и позитронных спектрометров, анализаторов газов в металлах, установок имитации космического пространства для испытания материалов космических летательных аппаратов и их отдельных узлов на надежность, а также испытаний внутри летательных аппаратов)	$10^{-6} \dots 10^{-8}$
Сушка вымораживанием (сублимационная сушка)	Фармацевтическая промышленность (препараты, антибиотики, кровяная плазма, сыворотки, вакцины, витамины гормональные, гистологические, цитологические препараты)	$10 \dots 1$
	Пищевая промышленность (сушка мяса, молока, рыбы, дрожжей, белка, яичных и молочных продуктов, изготовление сыров, фруктовых и овощных соков, чайного экстракта, кофе, консервирование овощей и фруктово-ягодных продуктов)	$200 \dots 5$



Окончание табл. 1.10

Метод	Область применения	Давление, Па
Вакуумная тепло- и электроизоляция	Холодильная и криогенная техника (теплоизоляция емкостей для хранения низкотемпературных жидкостей, сосудов Дьюара, бытовых термосов)	$10 \dots 10^{-1}$
	Электротехническая промышленность (изготовление вакуумных выключателей, реле и конденсаторов, вакуумных микросхем)	$10^{-1} \dots 10^{-2}$
Дистилляция в вакууме	Химическая промышленность (изготовление восков, сложных эфиров, смолообразных веществ, регенерация отработанных машинных масел); медицина (изготовление витаминов и фармацевтических препаратов); парфюмерия (изготовление ароматических веществ и растительных экстрактов); металлургия (выделения кадмия, свинца, цинка из металлов и сплавов)	$10 \dots 10^{-1}$

## Глава 2

# ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

### 2.1. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА

Под идеальным газом в молекулярно-кинетической теории понимают газ, состоящий из мельчайших частиц (атомов и молекул), находящихся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействующих между собой или с окружающей их поверхностью по законам упругого удара, причем объем собственно частиц газа исчезающе мал по сравнению с занимаемым им объемом.

При столкновении молекул газа со стенкой между ними происходит обмен импульсом количества движения и кинетической энергией. В результате соударений молекул газа с элементом поверхности площадью  $\Delta s$  ему за время  $\Delta t$  передается суммарный импульс количества движения  $\Delta K$ , т.е. на элемент поверхности действует сила  $F$ , равная отношению суммарного импульса  $\Delta K$ , полученного элементом за время  $\Delta t$ , ко времени  $\Delta t$ :

$$F = \Delta K / \Delta t.$$

Отношение силы  $F$  к площади  $\Delta s$  элемента поверхности, на которую она воздействует, определяет давление газа на элемент поверхности:  $p = F / \Delta s$ .

Направления хаотического движения молекул равновероятны, в противном случае давление газа на стенки сосуда в разных точках было бы различным. Скорости  $v$  движения молекул также различаются. При столкновении молекул скорость каждой молекулы может изменяться, но их суммарная кинетическая энергия при этом остается постоянной.

Для определения давления газа на стенку с учетом различия скоростей и углов падения молекул необходимо знать число молекул, летящих в направлении телесного угла  $d\omega$ . Вследствие равновероятности всех направлений движения молекул полный телесный угол, внутри которого движется молекула,  $4\pi$  (поверхность сферы единичного радиуса), т.е. в единице объема, содержащей  $n$  молекул, внутри телесного угла  $d\omega$  движется  $nd\omega/4\pi$  молекул.

Телесный угол (рис. 2.1)

$$d\omega = \sin\vartheta d\vartheta d\varphi. \quad (2.1)$$

Каждая из молекул массой  $m$ , движущихся в телесном угле, сообщает элементарной площадке  $ds$  импульс в направлении нормали, равный  $2mvc\cos\vartheta$ .

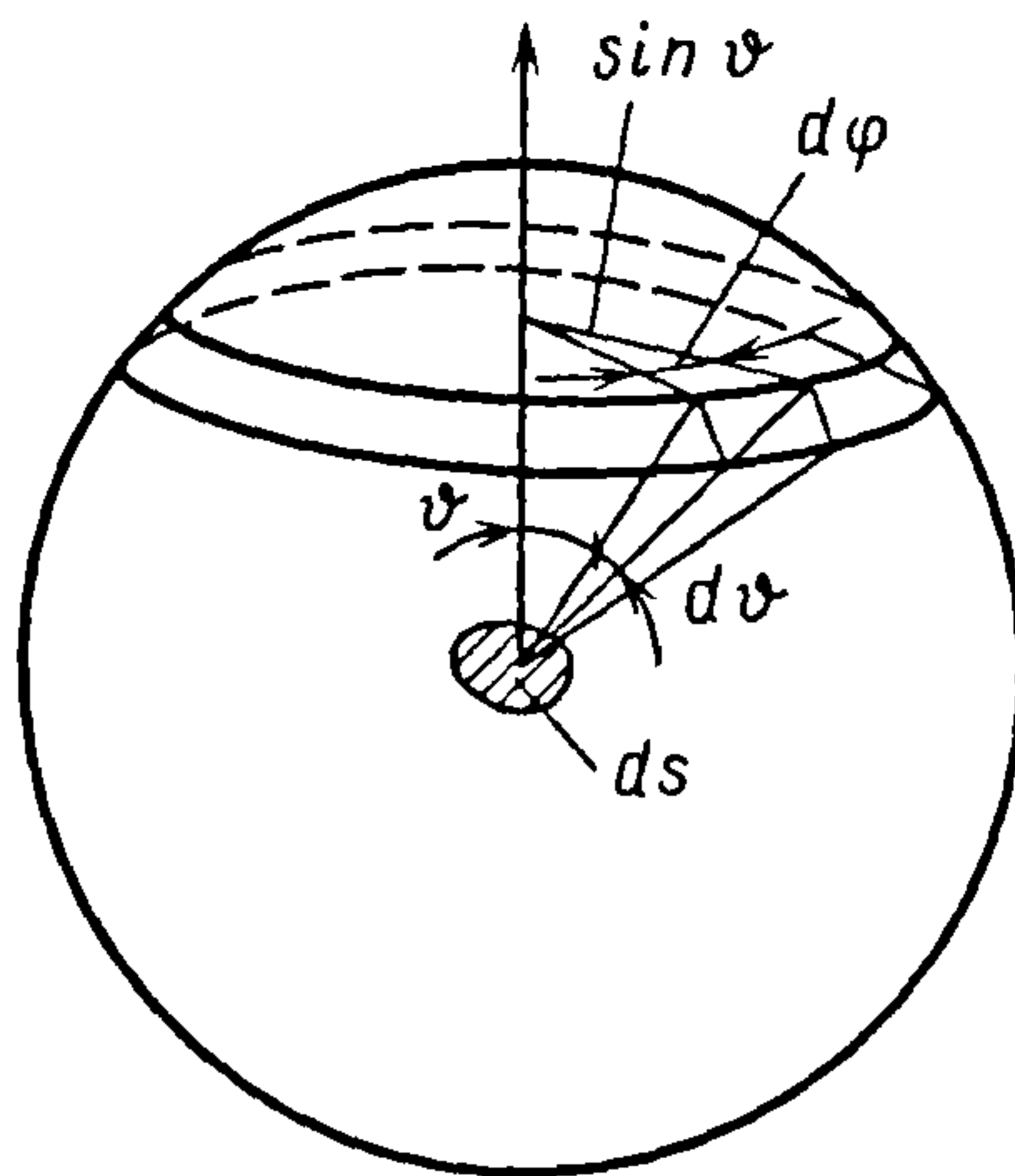


Рис. 2.1. Схема к определению телесного угла



В единицу времени на поверхность площадью  $ds$  под углом  $\vartheta$  попадают все молекулы, движущиеся в цилиндре с основанием  $ds$  и высотой  $v_i \cos \vartheta$  (рис. 2.2).

Для известного распределения молекул газа по скоростям движения, т.е. когда  $n_1$  молекул в единице объема имеют скорость  $v_1$ ,  $n_2$  — скорость  $v_2$  и т.д., причем  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$  в направлении телесного угла  $d\omega$  в единице объема движется

$$n \frac{d\omega}{4\pi} = \sum_{i=1}^{i=k} n_i \frac{\sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} \text{ молекул.}$$

Число молекул, движущихся со скоростью  $v_i$  и находящихся внутри выделенного цилиндра, составляет

$$ds \frac{n_i v_i \cos \vartheta d\omega}{4\pi} = n_i v_i \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} ds.$$

В единицу времени на площадку  $ds$  под углом  $\vartheta$  попадает

$$\sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} ds \quad (2.2)$$

молекул газа.

Для определения общего числа молекул, попадающих на площадку  $ds$  под углом  $\vartheta$ , выражение (2.2) интегрируют

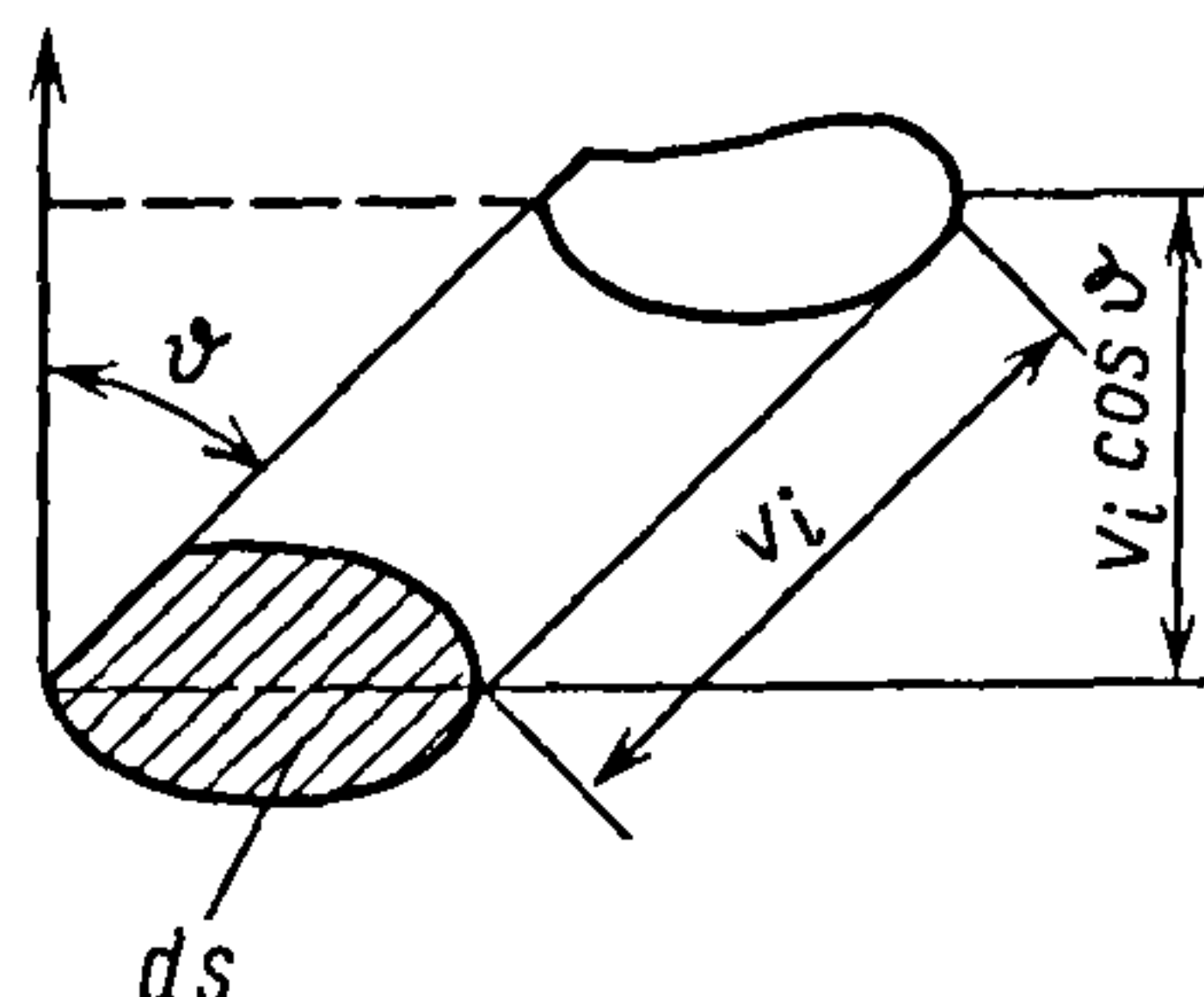


Рис. 2.2. Схема к определению давления газа

по всему диапазону значений углов  $\varphi$  и  $\vartheta$  соответственно от 0 до  $2\pi$  и от 0 до  $0,5\pi$ :

$$ds \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta}{4\pi} d\vartheta \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i = 0,25 \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i ds,$$

т.е. число соударений молекул в единицу времени с единичной площадкой

$$\nu = 0,25 n \bar{v}, \quad (2.3)$$

так как  $\sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i / n = \bar{v}$  — средняя арифметическая скорость.

Зная число молекул, попадающих на площадку под углом  $\vartheta$  (каждая сообщает площадке  $ds$  импульс  $2mv_i \cos \vartheta$ ), можно определить давление, оказываемое ими на поверхность площадью  $ds$ :

$$\begin{aligned} 2mv_1 \cos \vartheta n_1 v_1 \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} + 2mv_2 \cos \vartheta n_2 v_2 \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} + \dots = \\ = m \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i^2 \frac{\cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi}{2\pi}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Проинтегрировав выражение (2.4) по  $\vartheta$  и  $\varphi$  соответственно от 0 до  $0,5\pi$  и от 0 до  $2\pi$ , получим полное давление, оказываемое газом на единичную площадку:

$$\begin{aligned} p = m \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{0,5\pi} \frac{\cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta}{2\pi} = \\ = \frac{1}{3} m \sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i^2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

С учетом того, что  $\sqrt{\sum_{i=1}^{i=k} n_i v_i^2 / n} = \sqrt{\bar{v}^2}$  —

средняя квадратическая скорость движения, выражение (2.5) можно переписать в виде

$$p = mn\bar{v}^2 / 3. \quad (2.6)$$

Так как  $m\bar{v}^2 / 3 = \bar{E}$  — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул, то

$$p = 2n\bar{E} / 3. \quad (2.7)$$

Согласно основному в молекулярно-кинетической теории газов уравнению (2.7) давление равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, заключенных в единице объема.

## 2.2. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Основное уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона–Менделеева) устанавливает зависимость между давлением, объемом и температурой:

$$pV = MR_iT, \quad (2.8)$$

где  $p$  – давление газа плотностью  $\rho$  при температуре  $T$ ;  $M$  – масса газа, содержащегося в объеме  $V$ ;  $T$  – абсолютная температура газа;  $R_i$  – газовая постоянная  $i$ -го газа.

В уравнении (2.8) газовая постоянная  $R_i$  зависит от рода газа. Если в качестве меры массы газа выбрать единицу массы, число молекул в которой не зависит от рода газа, то газовая постоянная будет иметь одно и то же значение для всех газов. Согласно закону Авогадро, в одинаковых объемах при одинаковых давлениях и температурах число молекул различных газов одинаково. За меру количества газа принят моль.

Молекулярная масса есть безразмерная величина, равная отношению массы  $m$  молекулы данного газа к  $1/12$  массы атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , равной  $19,63 \cdot 10^{-24}$  г. Число молекул в 1 моле одинаково для всех веществ и определяется числом Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ . Соответствующий объем 1 моля при нормальных условиях (давление 101 325 Па, температура 273 К)  $V_m = 22\,415$  см $^3$ ·моль $^{-1}$  =  $22,4$  дм $^3$ ·моль $^{-1}$ , объем 1 кмоля  $V_m = 22,4$  м $^3$ /кмоль.

Таким образом, для 1 моля любого газа уравнение (2.8) имеет вид

$$pV_m = RT \quad (2.9)$$

или для  $q$  молей газа (уравнение Клапейрона–Менделеева)

$$pV = qRT, \quad (2.10)$$

где  $V$  – объем  $q$  молей газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Введя в уравнение (2.9) число Авогадро, получим

$$p = \frac{N_A}{V_m} \frac{R}{N_A} T.$$

Так как  $N_A/V_m = n$  – концентрация молекул газа (число частиц в единице объема), а  $R/N_A = k$  – постоянная Больцмана, то

$$p = nkT. \quad (2.11)$$

Из уравнения (2.11) следует, что при заданной температуре  $T$  давление определяется только числом  $n$  молекул в единице объема или при данной концентрации  $n$  молекул – только температурой  $T$  газа.

При постоянном значении одного из параметров ( $p$ ,  $V$  или  $T$ ) уравнение состояния (2.10) преобразуется в законы Бойля–Мариотта и Гей–Люссака.

При постоянной температуре для данной массы давление газа обратно пропорционально его объему:

$$pV = \text{const.}$$

Это уравнение выражает закон Бойля–Мариотта.

По закону Гей–Люссака объем газа данной массы при постоянном давлении линейно зависит от температуры

$$V = \alpha V_0 T,$$

где  $\alpha = 1/273,2$  К $^{-1}$  – коэффициент пропорциональности;  $V_0$  – объем газа при  $T = 273,2$  К и данном давлении.

При постоянном объеме данной массы газа его давление линейно зависит от температуры:

$$p = \alpha p_0 T,$$

где  $p_0$  – давление газа при  $T = 273,2$  К в данном объеме.

Давление смеси газов при той же температуре

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_k = \sum_{i=1}^{i=k} p_i, \quad (2.12)$$



где  $p_i$  – парциальное давление  $i$ -го газа, т.е. давление, обусловленное молекулами  $i$ -го газа, число молекул которого в данном объеме равно числу молекул в смеси.

Уравнение (2.12) выражает закон Дальтона, согласно которому давление смеси идеальных газов равно сумме пар-

циальных давлений газов, образующих смесь.

Приведенные зависимости описывают поведение реальных газов тем точнее, чем меньше плотность.

Значения основных физических констант газов приведены в табл. 2.1.

### 2.1. Основные физические константы газов

Газ	Масса молекулы $m \cdot 10^{-27}$ , кг	Диаметр молекулы $\sigma \cdot 10^{-10}$ , м	Молекулярная масса	Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	Показатель адиабаты
H <sub>2</sub>	3,4	2,7	2	0,09	16,78	28,83	1,405
He	6,7	2,2	4	0,18	14,30	20,79	–
H <sub>2</sub> O	29,9	4,7	18	–	2,40	33,56	–
Ne	33,5	2,6	20	0,90	4,58	20,79	–
N <sub>2</sub>	46,5	3,7	28	1,25	2,40	29,12	1,401
O <sub>2</sub>	53,1	3,6	32	1,43	2,41	29,36	1,396
Ar	66,2	3,7	40	1,78	1,63	20,79	1,670
CO	46,5	3,8	28	1,25	2,14	29,15	1,401
CO <sub>2</sub>	73,1	4,7	44	1,98	1,45	37,12	1,294
Воздух	48,1	3,7	29	1,29	0,76	29,30	1,402

Примечание. Значение плотности и удельной теплоемкости приведены при  $T = 273 \text{ К}$  и  $p = 101\,325$ .

### 2.3. БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

Атмосферное давление  $p$  на некоторой высоте  $h$  над поверхностью Земли, соответствующей началу отсчета ( $h_0 = 0$ ;  $p_0$ ), зависит от массы расположенного выше «столба» газа. С увеличением высоты  $h$  давление уменьшается.

Разность давлений на высоте  $h + dh$  и  $h$  (рис. 2.3) определяется массой столба газа, имеющего плотность  $\rho$ , с основанием, равным единице площади поверхности (1 м<sup>2</sup>), и высотой  $dh$ :

$$-dp = (p - dp) - p = \rho g dh,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

С учетом уравнения (2.11), а также того, что  $\rho = mn$ , получим  $dp/p =$

$$= -\frac{mg}{kT} dh \text{ или после интегрирования}$$

$$p = p_0 e^{-mgh/(kT)}, \quad (2.13)$$

где  $p_0$  – давление на поверхности земли.

Зависимость (2.13) называют барометрической формулой.

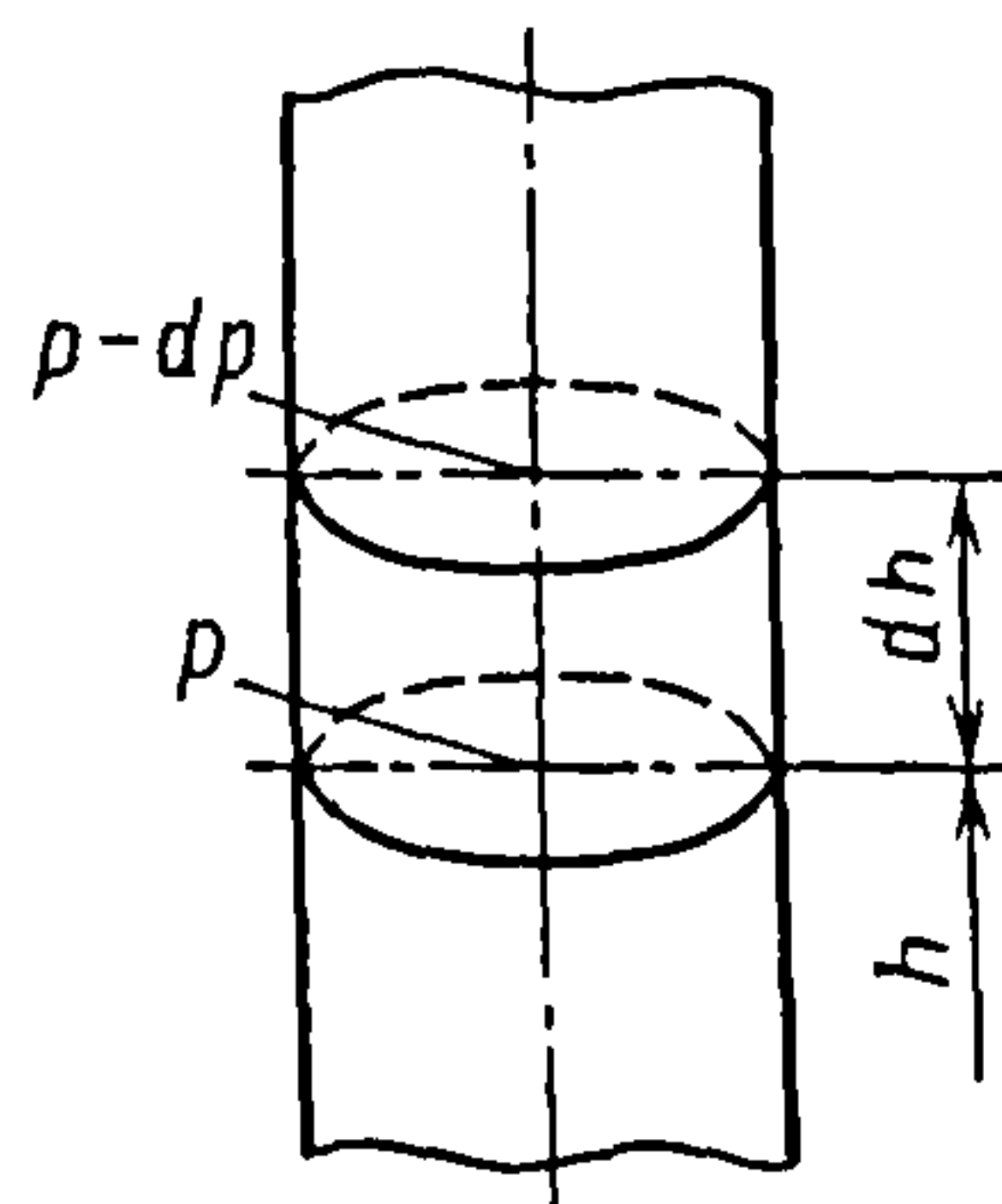


Рис. 2.3. Схема к определению давления газа по высоте

## 2.2. Результаты расчетов при постоянных молекулярной массе, температуре и ускорении

$h$ , км	$p$ , кПа		$T$ , К	$g$ , м/с <sup>2</sup>	$\lambda \cdot 10^{-5}$ , м
	эксперимент	расчет [уравнение (2.13)]			
0	101,3	101,0	288,15	9,81	6,37
1	89,9	89,8	282,65	9,80	6,98
2	79,5	79,0	275,14	9,80	7,66
3	70,1	69,2	268,64	9,80	8,42
4	61,6	60,1	262,13	9,79	9,27
5	54,0	51,9	255,63	9,79	10,24
10	26,5	23,5	233,25	9,77	13,26
15	12,1	9,6	216,66	9,76	36,75
20	5,5	4,4	216,66	9,74	80,15
30	1,2	1,2	230,35	9,72	407,9
40	0,3	0,535	257,66	9,69	1890,0
50	0,085	0,217	274,00	9,66	7159,0
60	0,006	0,002	219,15	9,60	77 433,0

По уравнению (2.13) выполнены расчеты при постоянных молекулярной массе газа ( $M = 29$ ), температуре и ускорении (табл. 2.2).

Используя уравнения (2.11) и (2.13), можно определить зависимость концентраций газа от высоты:

$$n = n_0 e^{-mgh/(kT)}, \quad (2.14)$$

где  $n_0$  — число молекул газа в единице объема при  $h = 0$ .

Так как на высоте  $h$  потенциальная энергия молекул  $E = mgh$ , уравнение (2.14) можно представить в виде  $n = n_0 e^{-E/(kT)}$ .

Распределение частиц газа по энергиям справедливо в любом потенциальном поле сил для частиц, находящихся в состоянии теплового хаотического движения.

## 2.4. СКОРОСТЬ МОЛЕКУЛ ГАЗА. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ

Рассмотрим движение газа в неподвижной декартовой системе координат  $x, y, z$ . В каждый момент времени  $t$  состояние одной молекулы определяется ее по-

ложением и скоростью. В этот же момент времени в элементарном объеме  $dx dy dz$  можно выделить  $dN$  молекул, составляющие скорости  $v$  которых соответствуют диапазону от  $v_x, v_y, v_z$  до  $v_x + dv_x, v_y + dv_y, v_z + dv_z$ :

$$dN = NF(x, y, z, t, v_x, v_y, v_z) \times \\ \times dx dy dz dv_x dv_y dv_z,$$

где  $F = F(x, y, z, t, v_x, v_y, v_z)$  — функция от распределения молекул по скоростям.

По заданной функции распределения можно найти концентрацию  $n$  молекул, т.е. их среднее число в единице объема,

$$n = \iiint_{-\infty}^{+\infty} NF(x, y, z, t, v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z$$

и среднее значение любой характеристики, зависящей от координат, времени и скорости,  $\varphi = \varphi(x, y, z, t, v_x, v_y, v_z)$ . Например, в точке с координатами  $x, y, z$  в данный момент

$$\bar{\varphi} = \frac{\iiint_{-\infty}^{+\infty} \varphi F dv_x dv_y dv_z}{\iiint_{-\infty}^{+\infty} F dv_x dv_y dv_z}.$$



При однородном и стационарном состоянии газа, когда внешние силы отсутствуют, т.е. когда состояние газа не зависит ни от его положения, ни от момента времени, функция распределения молекул по скоростям определяется только тремя параметрами:  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ . Такая функция распределения получена Максвеллом в 1860 г.

Функции распределения Максвелла для абсолютного значения скорости

$$F(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1,5} v^2 \exp \left( -\frac{mv^2}{2kT} \right). \quad (2.15)$$

Например, вдоль оси  $x$

$$F(v_x) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{0,5} \exp \left( -\frac{mv_x^2}{2kT} \right).$$

На рис.2.4 показаны функции распределения молекул по скоростям движения молекул.

Приведем различные выражения закона распределения Максвелла для разных температур газа  $T_2 > T_1$ :

в сферических координатах

$$dW(v, \vartheta, \varphi) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1,5} \times \\ \times \exp \left( -\frac{mv^2}{2kT} \right) v^2 \sin \vartheta dv d\vartheta d\varphi;$$

в цилиндрических координатах

$$dW(v_r, \vartheta_z, \varphi) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1,5} \times \\ \times \exp \left( -\frac{m(v_r^2 + v_z^2)}{2kT} \right) v_r dv_r dv_z d\varphi;$$

распределение модуля скорости

$$dW(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1,5} \exp \left( -\frac{mv^2}{2kT} \right) v^2 dv;$$

распределение модуля скорости в безразмерной форме

$$dW(c) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-c^2} c^2 dc,$$

где  $c = \frac{v}{v_H}$ ;

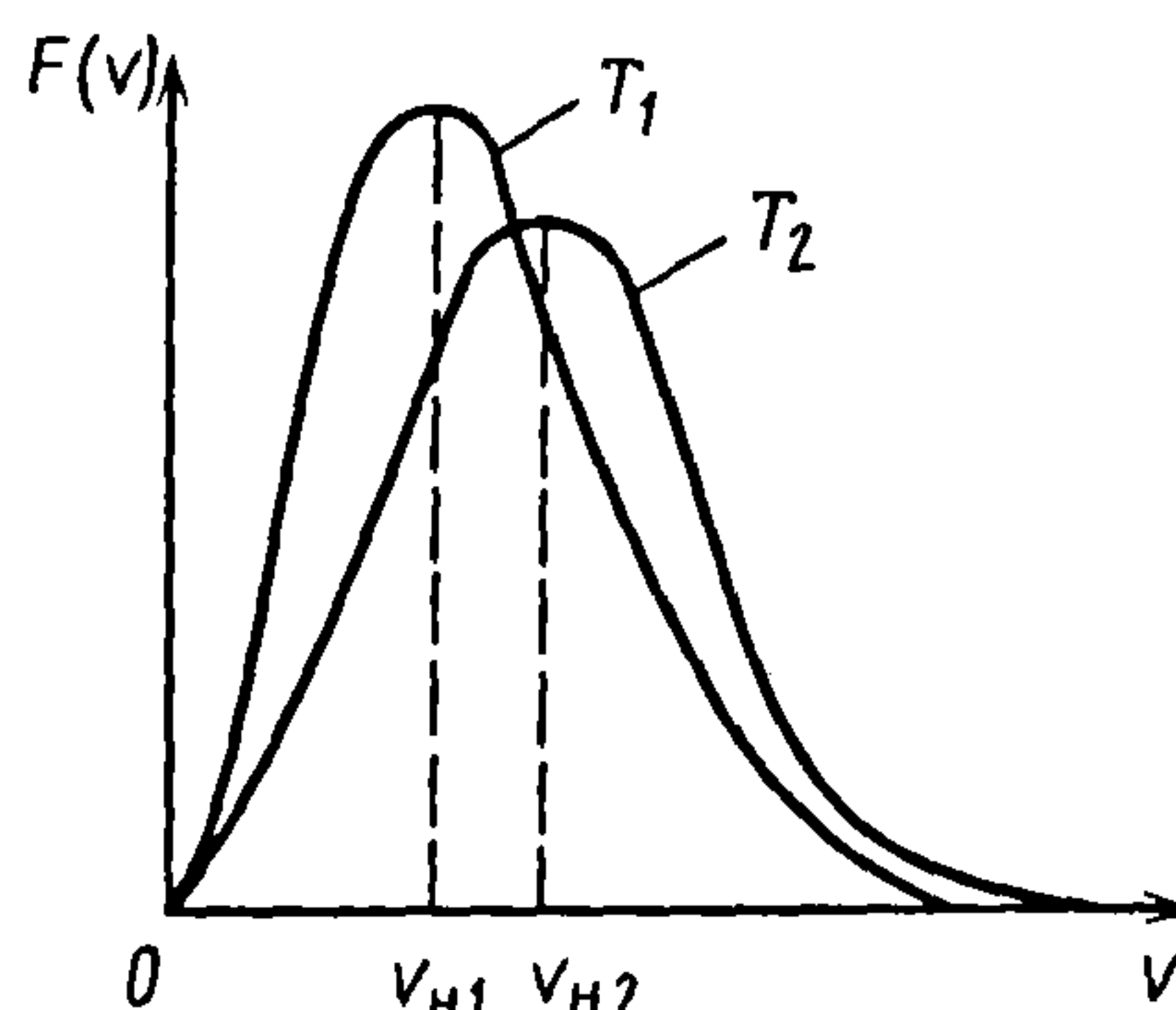


Рис. 2.4. Функция распределения молекул по скоростям

распределение скорости в безразмерной форме в пучке

$$dW(c) = 2e^{-c^2} c^2 dc;$$

распределение модуля скоростей центров масс сталкивающихся молекул массами  $m_1$  и  $m_2$

$$dW(v_m) = \frac{4(m_1 + m_2)}{\sqrt{\pi}(2kT)^{1,5}} \times \\ \times \exp \left[ -\frac{(m_1 + m_2)v_m^2}{2kT} \right] v_m^2 dv_m;$$

распределение модуля относительной скорости молекул

$$dW(v_r) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1,5} \exp \left( -\frac{mv_r^2}{2kT} \right) v_r^2 dv_r,$$

где  $v_r = |v_1 - v_2|$ ;  $m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ .

Наиболее вероятную скорость можно найти, приравняв нулю производную функции распределения по скорости  $dF(v)/dv = 0$ ;

$$v_H = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 129 \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2.16)$$

Таким образом, с повышением температуры газа от  $T_1$  до  $T_2$  наиболее вероятная скорость возрастает пропорцио-

нально  $\sqrt{T_2/T_1}$ , т.е. увеличивается доля молекул с большими скоростями движения и кривая распределения (см. рис. 2.4) смещается в область больших значений скоростей при температуре газа  $T_2$ .

Функция распределения позволяет найти среднюю арифметическую  $\bar{v}$  и среднюю квадратическую скорости движения молекул газа:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 145,5 \sqrt{\frac{T}{M}}; \quad (2.17)$$

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 158 \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2.18)$$

Сравнив полученные характерные скорости движения газа, можно записать

$$\sqrt{\bar{v}^2} : \bar{v} : v_n = 1,22 : 1,13 : 1.$$

В табл. 2.3 приведены значения наиболее вероятной, а также средней арифметической и средней квадратической скоростей теплового движения молекул газов при температуре 293 К.

**2.3. Наиболее вероятные средние арифметические и средние квадратические скорости теплового движения молекул газов**

Газ	M	$v_n$ , м/с	$\bar{v}$ , м/с	$\sqrt{\bar{v}^2}$ , м/с
H <sub>2</sub>	2	1554,0	1752,0	1902,0
He	4	1104,0	1245,0	1351,0
Ne	20	491,3	554,1	601,4
N <sub>2</sub>	28	417,3	470,1	510,8
O <sub>2</sub>	32	390,3	440,3	477,8
Ar	40	349,1	393,8	427,4
CO	28	417,3	470,7	510,8
CO <sub>2</sub>	44	332,9	375,5	407,5
Воздух	29	410,0	462,5	501,9

## 2.5. СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПУТИ МОЛЕКУЛ ГАЗА

За единицу времени (1 с) молекула проходит путь, равный в среднем  $\bar{v}$ . Если за это время молекула испытала  $\nu$  столкновений с другими частицами, то средняя длина ее свободного пути  $\bar{\lambda} = \bar{v}/\nu$ .

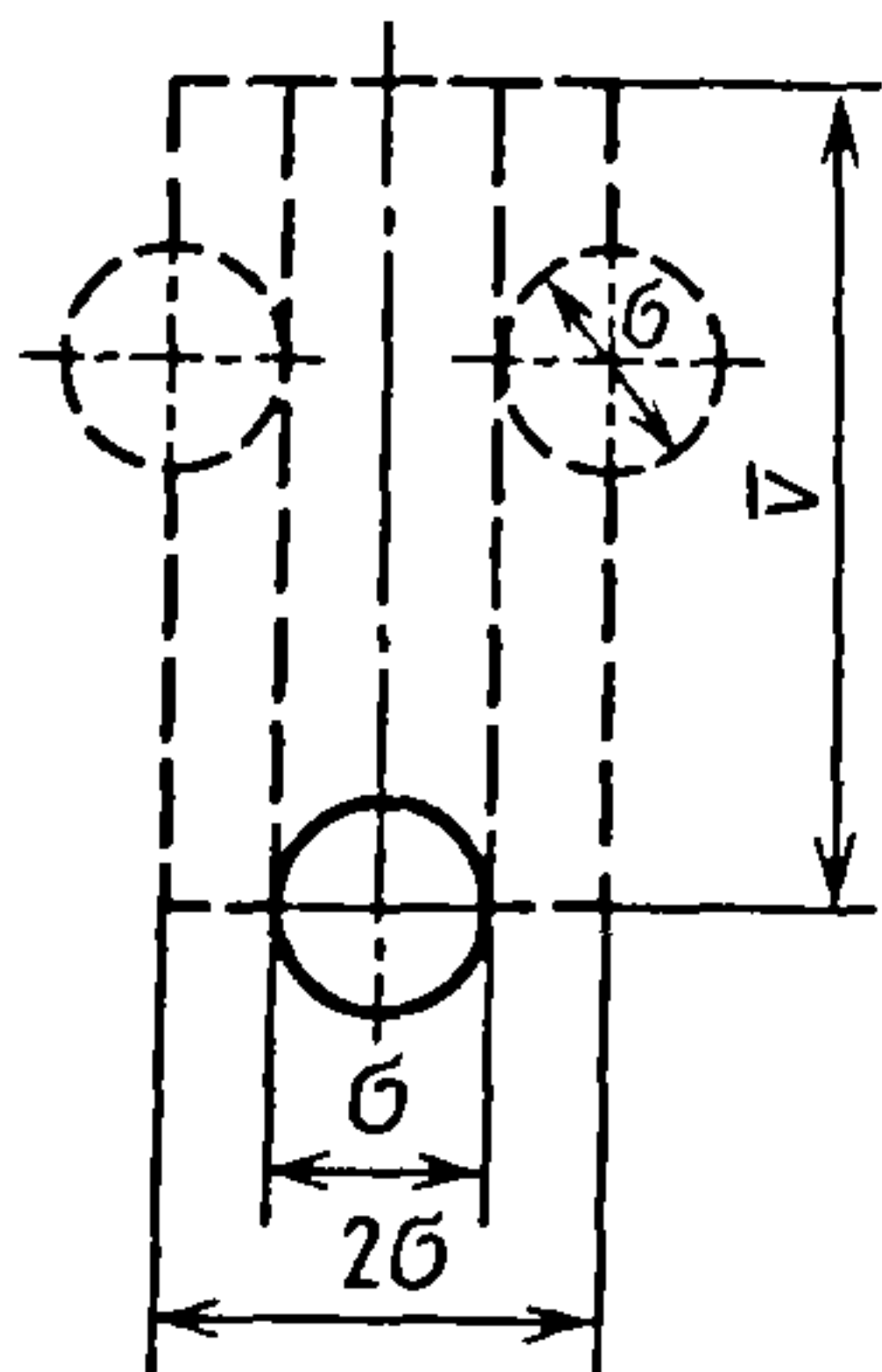


Рис. 2.5. Схема к определению числа столкновений молекул

Если предположить, что только рассматриваемая молекула движется со скоростью  $\bar{v}$ , а все остальные неподвижны, то число столкновений равно числу частиц в цилиндре с основанием  $\pi\sigma^2$  и высотой  $\bar{v}$  (рис. 2.5), так как все неподвижные молекулы, центры которых расположены внутри цилиндра, обязательно столкнутся с движущимися, т.е.  $\nu = n\pi\sigma^2\bar{v}$ , где  $n$  — число молекул в единице объема.

Тогда средняя длина свободного пути

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n\pi\sigma^2}$$

или

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{p\pi\sigma^2}. \quad (2.19)$$



$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{v} = \frac{1}{n\pi\sigma^2\sqrt{2}} = \frac{kT}{p\pi\sigma^2\sqrt{2}}. \quad (2.20)$$

В действительности все молекулы непрерывно движутся и рассматриваемая молекула движется относительно них с некоторой средней скоростью  $\bar{v}_{\text{отн}}$ . Тогда число столкновений молекул в единицу времени

$$v = n\pi\sigma^2\bar{v}_{\text{отн}}.$$

Например, для воздуха при  $T = 293 \text{ К}$

$$\bar{\lambda} = 6,51 \cdot 10^{-3} / p,$$

где  $p$  – в Па.

Из уравнения (2.20), полученного при рассмотрении молекул газа как абсолютно упругих шаров, следует, что средняя длина свободного пути молекул не зависит от температуры. Однако результаты экспериментальных исследований показали, что эта характеристика молекул газа уменьшается с понижением температуры, т.е. газокINETический эффективный диаметр молекулы уменьшается с увеличением скорости.

Приближенная зависимость средней длины свободного пути молекул от температуры, полученная Сюзерлендом, имеет вид

$$\bar{\lambda} = [n\pi\sigma^2\sqrt{2}(1 + C/T)]^{-1}, \quad (2.21)$$

где  $C$  – постоянная Сюзерленда, называемая также температурой удвоения  $T_v$  (при этой температуре площадь газокINETического эффективного сечения молекул в 2 раза больше, чем при  $T \rightarrow \infty$ , когда  $1 + C/T \rightarrow 1$ ).

Средняя длина свободного пути молекул определенного газа, например  $i$ -го, в смеси, состоящей из  $k$  газов:

$$\bar{\lambda}_{ik} = \left[ \pi \sum_{j=1}^{j=k} n_j \sigma_{ij}^2 \sqrt{1 + m_i / m_j} \right]^{-1}, \quad (2.22)$$

где  $n_j$  – число молекул  $j$ -го газа в единице объема;  $\sigma_{ij} = 0,5(\sigma_i + \sigma_j)$  ( $\sigma_i, \sigma_j$  – диаметры молекулы  $i$ -го и  $j$ -го газов);  $m_i, m_j$  – массы молекулы  $i$ -го и  $j$ -го газов.

При рассмотрении данного газа, т.е. при  $i = j$ , формулы (2.22) и (2.20) тождественны, а  $k = 1$ .

## 2.6. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

В соответствии с законом Фурье количество теплоты  $q$ , передаваемой через единичную площадку  $s$  при градиенте температур  $dT/dx$ :

$$q = -\chi(dT/(dx))s, \quad (2.23)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Знак «–» в уравнении (2.23) указывает на то, что направление теплового потока противоположно градиенту температур.

Рассмотрим процесс переноса теплоты через поверхность площадью  $s$  на основании молекулярно-кинетических представлений. Каждая молекула, пролетающая через поверхность площадью  $s$ , переносит некоторую энергию, определяемую температурой в месте последнего столкновения. Вероятность последнего соударения молекул на расстоянии  $x$  от поверхности зависит от длины свободного пути молекулы. В среднем это расстояние равно средней длине  $\bar{\lambda}$  свободного пути молекулы газа. Тогда энергию  $\bar{E}_1$  молекул, пролетающих через площадь  $s$  в положительном направлении  $x$  (рис. 2.6), можно считать равной средней энергии, соответствующей температуре  $T_1$  в плоскости  $x - \bar{\lambda}$ .

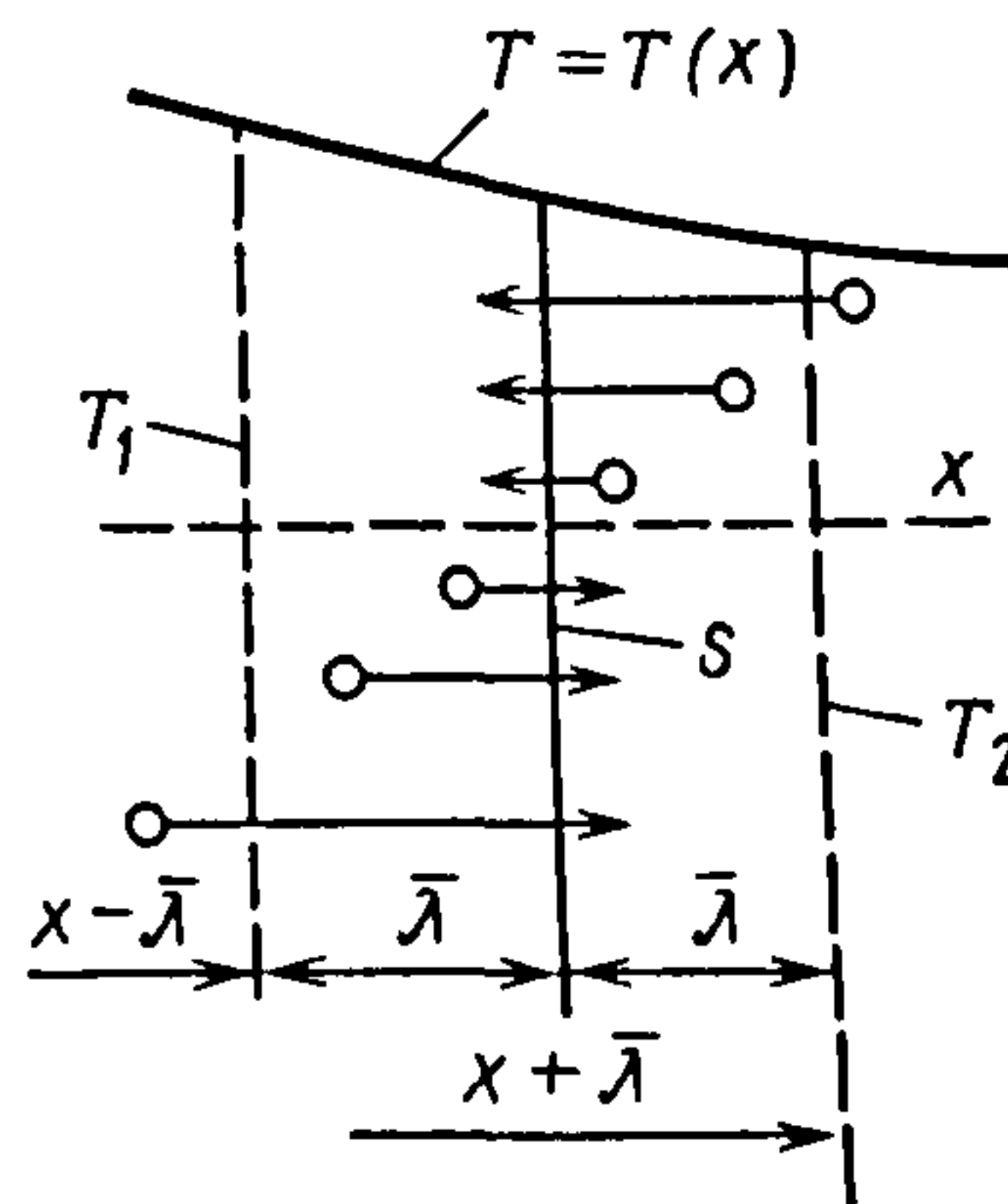


Рис. 2.6. Схема переноса энергии газа

Значит, энергию  $\bar{E}_2$  молекул, пролетающих в противоположном направлении, можно считать равной средней энергии, соответствующей температуре  $T_2$ , в плоскости  $x + \bar{\lambda}$ . Число молекул, пролетающих через поверхность площадью  $s$  в единицу времени в обоих направлениях, удастся определить, воспользовавшись упрощающим приемом Джоуля – считать, что все молекулы газа движутся в трех взаимно перпендикулярных направлениях:

$$N = ns\bar{v}/6.$$

Разность количеств энергии, переносимых молекулами с одной стороны единичной площадки на другую, определяет тепловой поток через площадку в единицу времени:

$$q = ns\bar{v}(\bar{E}_1 - \bar{E}_2)/6$$

или

$$q = -\rho\bar{v}c_v\bar{\lambda}(dT/dx)s/3,$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $c_v$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Сравнив последнее уравнение с законом Фурье (2.23), получим выражение для коэффициента теплопроводности

$$\chi = \rho\bar{v}c_v\bar{\lambda}/3. \quad (2.24)$$

Выражение (2.24) справедливо, когда средняя длина  $\bar{\lambda}$  свободного пути молекул намного меньше размера сосуда, внутри которого заключен газ. Если давление газа в сосуде столь низкое, что средняя длина свободного пути молекул газа соизмерима с размерами сосуда или больше их, теплоперенос осуществляется молекулами газа непосредственно от поверхности с температурой  $T_1$  к поверхности с температурой  $T_2$  (рис. 2.7) независимо от значения  $\bar{\lambda}$ .

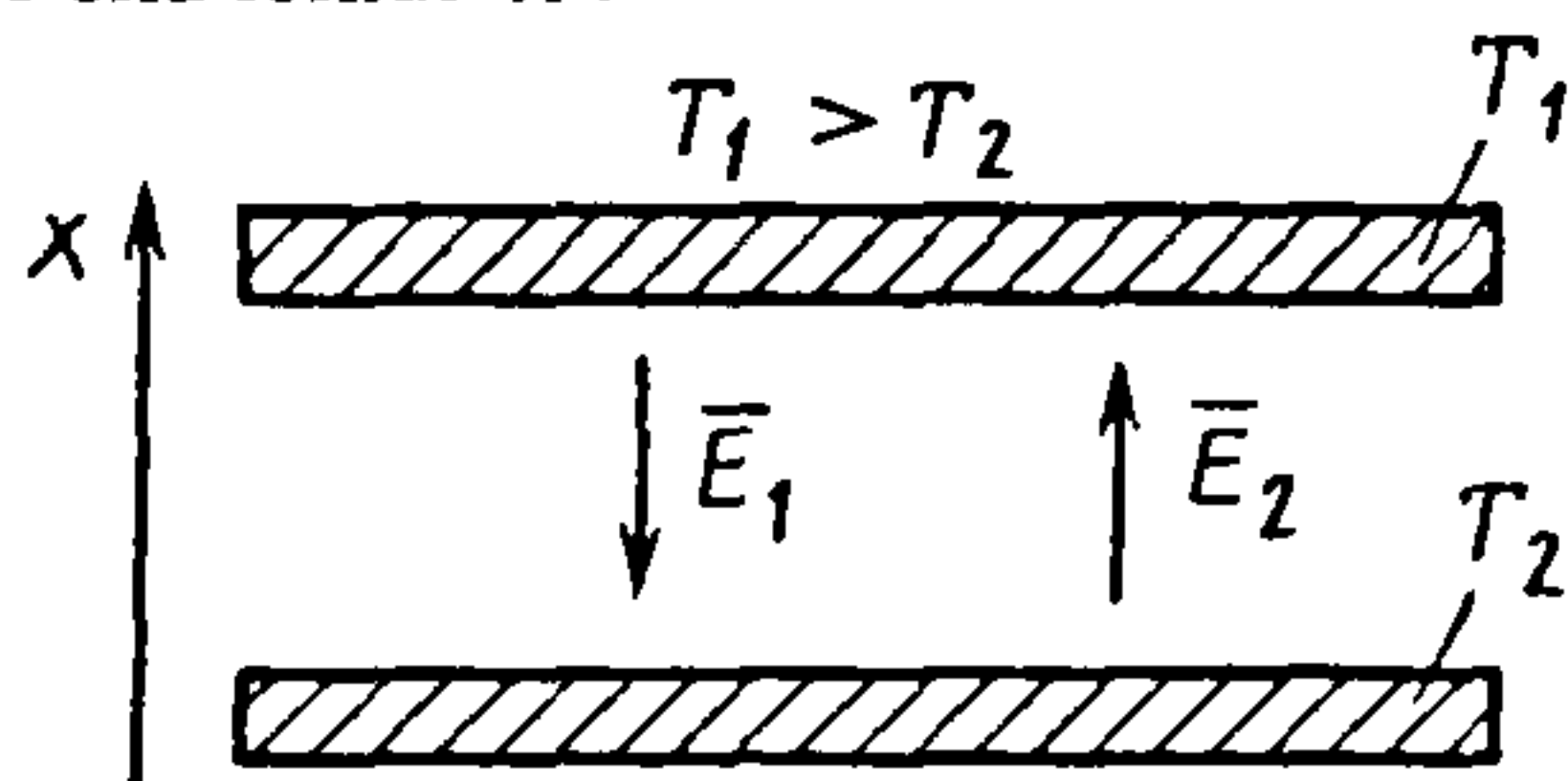


Рис. 2.7. Схема теплообмена в вакууме

## 2.7. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ

Вязкость газов обусловлена переносом количества движения от одного слоя к другому в результате теплового хаотического движения молекул.

Если в направлении  $x$ , перпендикулярном к скорости  $u$  потока газа, существует градиент скорости  $du/dx$  (рис. 2.8), то между слоями движущегося газа действует сила внутреннего трения  $F$ , определяемая формулой Ньютона

$$F = \eta \frac{du}{dx} s, \quad (2.25)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения или динамическая вязкость, Па·с;  $s$  – площадь поверхности (где действует сила  $F$ ), параллельной скорости движения потока.

Явление внутреннего трения, характеризующее вязкостью газа и рассматриваемое с позиций молекулярно-кинетической теории, аналогично явлению теплопроводности.

Рассмотрим два тонких слоя газа, прилегающих сверху и снизу к условно выделенной поверхности  $s$ . Слои газа движутся с различными скоростями: верхний со скоростью  $u(x + \bar{\lambda})$ , нижний – со скоростью  $u(x - \bar{\lambda})$ . Каждая молекула перемещается в потоке со скоростью  $u(x)$  и одновременно участвует в хаотическом движении; при этом молекулы непрерывно перемещаются из одного слоя в другой, а следовательно, происходит перенос количества движения  $mu(x)$ .

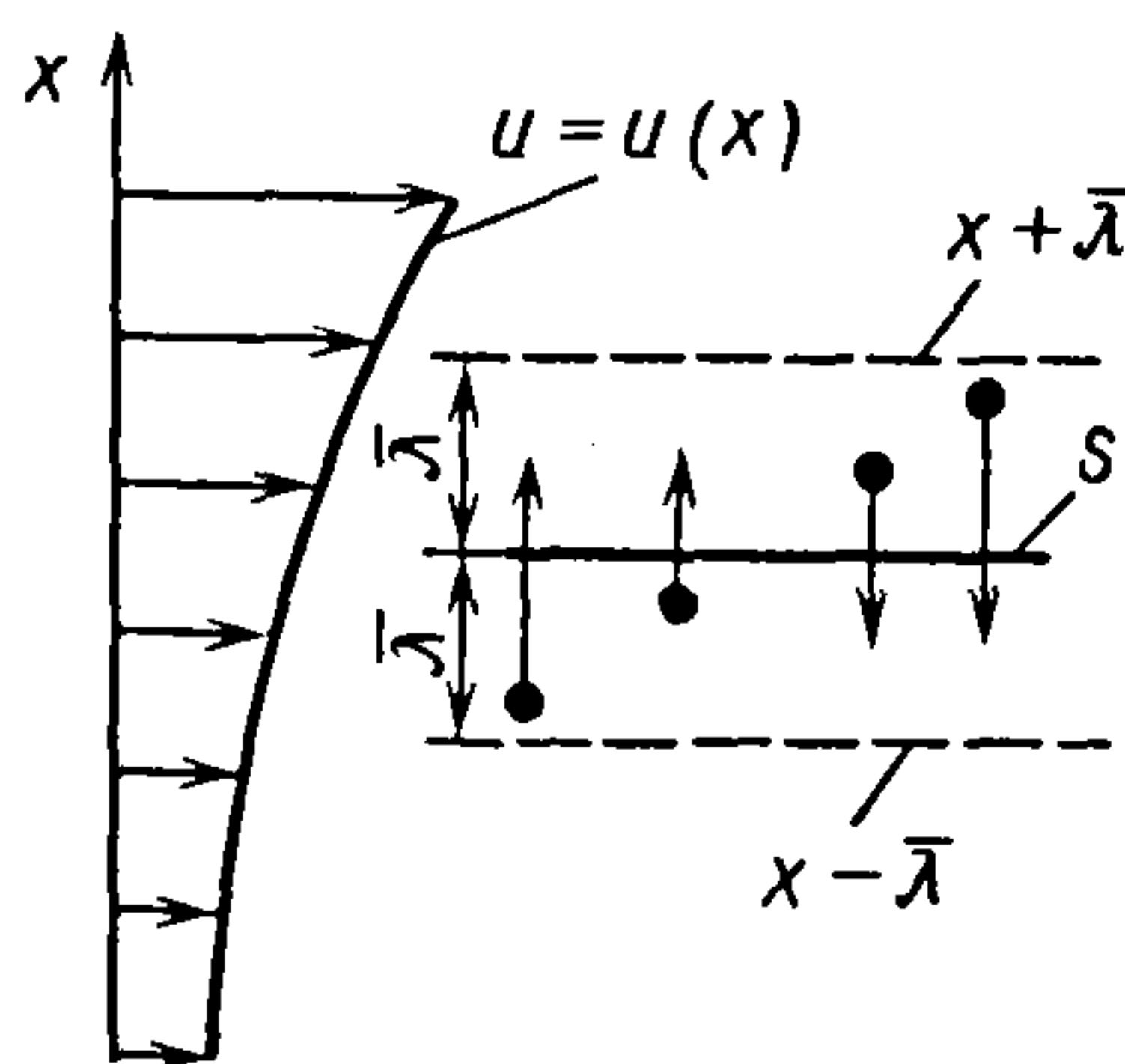


Рис. 2.8. Схема к определению вязкости газов



Молекулы, переходящие через единичную поверхность  $s$ , могут испытывать последнее соударение на различных расстояниях от этой поверхности, в среднем равных средней длине  $\bar{\lambda}$  свободного пути.

Как и при рассмотрении теплопроводности, количество движения, переносимое из слоя в слой, определяют при условии, что через единичную поверхность  $s$  в течение времени  $\Delta t$  в обоих направлениях переходит равное число молекул:  $N = ns\bar{v}\Delta t/6$ .

Количество движения:

из верхнего слоя в нижний

$$\Delta K_1 = Nmu(x + \bar{\lambda}) = n\bar{v}mu(x + \bar{\lambda})s\Delta t/6;$$

из нижнего слоя в верхний

$$\Delta K_2 = n\bar{v}mu(x - \bar{\lambda})s\Delta t/6.$$

Таким образом, за время  $\Delta t$  нижний слой получит приращение количества движения  $\Delta K = n\bar{v}m[u(x + \bar{\lambda}) - u(x - \bar{\lambda})] \times s\Delta t/6$ , а верхний – приращение движения  $-\Delta K$ .

Иными словами, движение слоев происходит так, будто на нижний слой единичной поверхности  $s$  действует сила

$$F = \frac{\Delta K}{\Delta t} = n\bar{v}m[u(x + \bar{\lambda}) - u(x - \bar{\lambda})]s/6, \quad (2.26)$$

а на верхний слой – сила  $-F$ , равная количеству движения, переносимого молекулами через единичную поверхность  $s$  в единицу времени.

Для малых значений  $\bar{\lambda}$  скорости  $u(x + \bar{\lambda})$  и  $u(x - \bar{\lambda})$  можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} u(x + \bar{\lambda}) &= u(x) + \bar{\lambda} du/dx; \\ u(x - \bar{\lambda}) &= u(x) - \bar{\lambda} du/dx, \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

где  $u(x)$  – скорость в сечении, соответствующем рассматриваемой поверхности  $s$ .

Подставив выражения (2.27) в уравнение (2.26), получим силу трения  $F = n\bar{v}m\bar{\lambda}(du/dx)s/3$  или с учетом того, что  $\rho = nm$ ,

$$F = \rho\bar{v}\bar{\lambda}(du/dx)s/3. \quad (2.28)$$

Сравнив уравнения (2.28) и (2.25), запишем выражение для коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{\rho\bar{v}\bar{\lambda}}{3}. \quad (2.29)$$

С учетом формул (2.17) и (2.20) будем иметь

$$\eta = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{mkT}}{\pi^{1.5}\sigma^2}, \quad (2.30)$$

т.е. при  $\bar{\lambda}$ , значительно меньшей определяющего размера системы, вязкость прямо пропорциональна  $\sqrt{mT}$  и обратно пропорциональна  $\sigma^2$ , причем, как и теплопроводность, вязкость не зависит от давления  $p$ .

Сравнив выражения (2.29) и (2.24), можно получить соотношение между теплопроводностью и динамической вязкостью:  $\chi = \eta c_v$ . Более строгое рассмотрение теплопроводности и вязкости приводит к соотношению

$$\chi = \epsilon \eta c_v,$$

где  $\epsilon = (9k - 5)/4$  ( $k = c_p/c_v$  – показатель адиабаты;  $c_p, c_v$  – теплоемкости при постоянных давлении и объеме; для одноатомных газов  $\epsilon = 2,5$  при  $k = 5/3$ , для двухатомных газов  $\epsilon = 1,9$  при  $k = 7/5$  и т.д.).

## 2.8. ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ

Диффузия в газах обусловлена переносом массы. Рассмотрим смесь газов из двух компонентов, один из которых имеет  $n_1$  молекул массой  $m_1$ , другой –  $n_2$  молекул массой  $m_2$ , т.е. масса первого компонента газа в единице объема равна  $n_1 m_1$ , второго –  $n_2 m_2$ .

Если вдоль произвольного направления, например  $x$  (рис. 2.9), в объеме газа создаются градиенты концентраций  $dn_1/dx$  и  $dn_2/dx$ , то вследствие хаотического движения молекулы преимущественно перемещаются в направлении, противоположном градиенту концентрации. Иными словами, через единичную площадку  $s$ ,

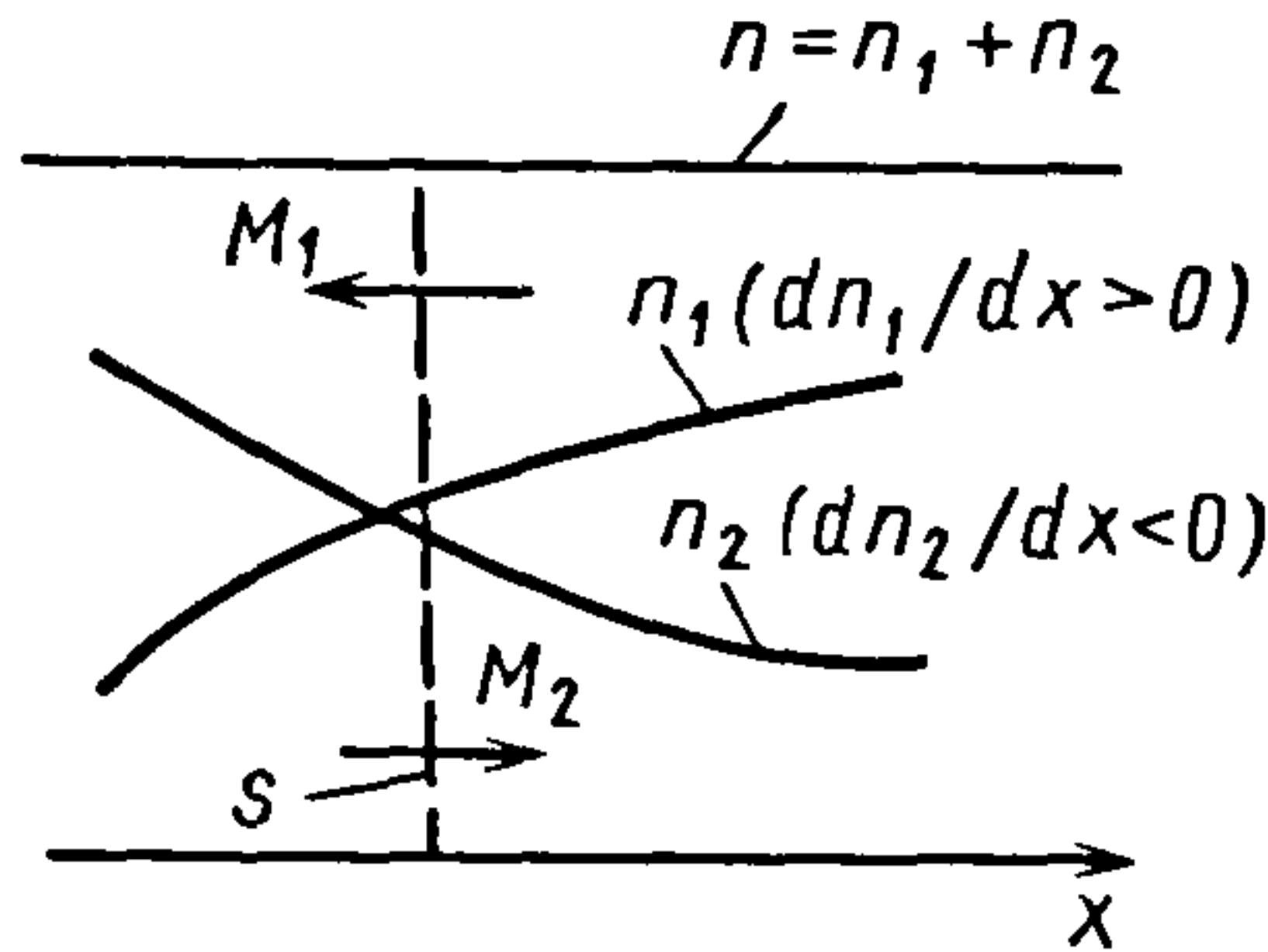


Рис. 2.9. Кривые изменения концентраций газов двухкомпонентной смеси

перпендикулярную к направлению изменения концентрации, в единицу времени слева направо переносится поток массой  $M_1$ , а справа налево – поток массой  $M_2$ . Этот процесс называют *диффузией*.

Диффузию рассматривают при постоянных температуре  $T$  и полном давлении  $p$ , определяемом, согласно закону Дальтона, как  $p = p_1 + p_2 = \text{const}$  или  $n = n_1 + n_2 = \text{const}$ .

Масса, переносимая через поверхность  $s$  в единицу времени, в соответствии с первым законом Фика равна:

$$\begin{aligned} M_1 &= -D_{12} \frac{dn_1 m_1}{dx} s; \\ M_2 &= -D_{21} \frac{dn_2 m_2}{dx} s, \end{aligned} \quad (2.31)$$

где  $D_{12}$  и  $D_{21}$  – коэффициенты диффузии соответственно первого компонента смеси во второй и второго в первый,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Знак «–» в уравнениях (2.31) означает, что направление переноса массы противоположно направлению увеличения концентрации.

Уравнение (2.31) можно записать в виде

$$N_1 = -D_{12} \frac{dn_1}{dx} s; \quad N_2 = -D_{21} \frac{dn_2}{dx} s, \quad (2.32)$$

где  $N_1, N_2$  – число молекул, переносимых через поверхность  $s$  в единицу времени соответственно справа налево и слева направо.

Так как полное давление  $p$  в любом сечении постоянно, т.е.

$$\frac{dn}{dx} = \frac{dn_1}{dx} + \frac{dn_2}{dx} = 0, \quad (2.33)$$

то через поверхность  $s$  в обоих направлениях проходит одинаковое число молекул. Тогда согласно соотношениям (2.32) и (2.33)  $D_{12} = D_{21}$ , т.е. коэффициент диффузии первого компонента смеси во второй равен коэффициенту диффузии второго компонента смеси в первый.

Если физические свойства молекул двух газов, например  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_2$ , близки или в одном из газов есть его изотопы, то процесс диффузии одного газа в другой можно рассматривать как самодиффузию газа с коэффициентом самодиффузии  $D_{12}$  или  $D_{21}$ .

Аналогично уравнениям для теплопроводности и силы трения в газе (2.26) общую массу  $M_1$  потока через единичную поверхность  $s$  в единицу времени можно определить как разность масс потоков, проходящих справа налево ( $M'_1$ ) и слева направо ( $M''_1$ ):

$$\begin{aligned} M_1 &= M'_1 - M''_1 = \\ &= \bar{v}_1 [n_1(x + \bar{\lambda}_1) - n_1(x - \bar{\lambda}_1)] m_1 s / 6. \end{aligned} \quad (2.34)$$

После подстановки концентраций  $n_1(x + \bar{\lambda}_1)$  и  $n_1(x - \bar{\lambda}_1)$  для малых значений  $\bar{\lambda}_1$  в виде

$$\begin{aligned} n_1(x + \bar{\lambda}_1) &= n_1(x) + \frac{dn_1}{dx} \bar{\lambda}_1; \\ n_1(x - \bar{\lambda}_1) &= n_1(x) - \frac{dn_1}{dx} \bar{\lambda}_1, \end{aligned}$$

уравнение (2.34) примет вид

$$M_1 = -\frac{1}{3} m_1 \bar{v}_1 \bar{\lambda}_1 \frac{dn_1}{dx} s.$$

Здесь  $n_1(x)$  – концентрация в сечении, соответствующем единичной поверхности  $s$ .

Сопоставив уравнения (2.31) с последним выражением, получим

$$D_{11} = \bar{v}_1 \bar{\lambda}_1 / 3; \quad D_{22} = \bar{v}_2 \bar{\lambda}_2 / 3.$$



С учетом выражений (2.17) и (2.20) можно записать

$$\left. \begin{aligned} D_{11} &= \frac{2}{3} \left( \frac{kT}{\pi} \right)^{1,5} \frac{1}{p_1 \sigma_1^2}; \\ D_{22} &= \frac{2}{3} \left( \frac{kT}{\pi} \right)^{1,5} \frac{1}{p_2 \sigma_2^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Следовательно, коэффициент самодиффузии прямо пропорционален  $T^{1,5}$  и обратно пропорционален давлению  $p$ .

Сравнив выражения (2.35) для коэффициентов диффузии и (2.30) для вязкости, можно записать уравнения, связывающие эти два коэффициента:  $\eta = \rho D_{11}$  или  $\eta = \rho D_{22}$ . Если массы компонентов смеси газа различны, то коэффициенты взаимной диффузии первого компонента смеси во второй, и наоборот, можно вычислить по формулам

$$D_{12} = D_{21} = (D_{11}n_2 + D_{22}n_1)/n;$$

$$D_{12} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left( \frac{kT}{\pi} \right)^{1,5} \frac{1}{p\sigma_{12}^2} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}},$$

где  $\sigma_{12} = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$  – средний газокинетический эффективный диаметр молекул;  $p = p_1 + p_2$  – полное давление.

## 2.9. ЗАКОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО ТЕЛА

При теоретическом описании процессов течения газа в вакууме необходимо учитывать взаимодействие частиц газа с поверхностями вакуумных систем, в которых рассматривается это течение.

Наиболее простой зависимостью, позволяющей получить количественные данные о распределении отраженных молекул в пространстве с удовлетворительной точностью, является уравнение, описывающее диффузное отражение (закон косинусов):

$$dP = \frac{dN}{N} = A \frac{d\omega}{2\pi} \cos \vartheta, \quad (2.36)$$

где  $dP$  – вероятность вылета частиц с поверхности  $ds$  в направлении телесного угла  $d\omega$ , образующего с нормалью к этому элементу угол  $\vartheta$ ;  $dN$  – число молекул, отраженных в единицу времени от элемента поверхности в направлении телесного угла  $d\omega$ ;  $N$  – число частиц, падающих на элементарную площадку  $ds$ ;  $A$  – коэффициент пропорциональности.

Проинтегрировав уравнение (2.36) по  $\vartheta$  от 0 до  $2\pi$  с учетом выражения (2.1), определим вероятность отражения частицы в направлении телесного угла, ограниченного кольцевой полоской радиусом  $\sin \vartheta$ :

$$dP = A \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta.$$

Из условия

$$1 = \int_0^{0,5\pi} dP = A \int_0^{0,5\pi} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = 0,5A$$

коэффициент пропорциональности  $A = 2$ . Тогда

$$dP = \frac{d\omega}{2\pi} \cos \vartheta.$$

Иногда применение закона косинусов приводит к расхождению результатов теоретических и экспериментальных исследований. Необходим другой закон отражения. Так, Максвелл предложил при течения газа через круглые трубопроводы определять проводимость трубопровода на основании теоретической модели, в которой часть  $\sigma$  молекул отражается диффузно, а часть  $(1 - \sigma)$  – зеркально, что позволяет более точно определить проводимость.

При взаимодействии молекул газа с поверхностью обмен энергиями происходит не полностью и зависит от многих факторов, например от физических свойств газа и состояния поверхности твердого тела, температуры газа и поверхности, формы молекул газа и др. Обмен энергиями характеризуют коэффициентом аккомодации энергии:

$$\alpha = \frac{\bar{E}_i - \bar{E}_r}{\bar{E}_i - \bar{E}_\omega},$$

где  $\bar{E}_i$ ,  $\bar{E}_r$  – средние энергии падающих и отраженных молекул;  $\bar{E}_\omega$  – средняя энергия, которой могли бы обладать отраженные молекулы, если бы газ находился в равновесии с поверхностью твердого тела (при условии, что температура  $T_i$  газа равна температуре  $T_\omega$  поверхности).

Чаще для определения коэффициента аккомодации используют формулу

$$\alpha = \frac{T_i - T_r}{T_i - T_\omega}.$$

Таким образом, если между молекулами газа и поверхностью нет обмена энергиями, т.е.  $T_i = T_r$ , то  $\alpha = 0$ , а если происходит полный обмен энергиями, т.е.  $T_i = T_\omega$ , то  $\alpha = 1$ . Следовательно, коэффициент аккомодации изменяется от 0 до 1 в зависимости от температуры, физических свойств газа и состояния поверхности. Так, при нормальной температуре коэффициент аккомодации водорода для блестящей пластины  $\alpha = 0,323$ , для платиновой черни  $\alpha = 0,583$ .

При рассмотрении процессов отражения молекул газа от поверхности, особенно при использовании модели Максвелла зеркально-диффузного отражения, обычно применяют также коэффициенты аккомодации соответственно касательного и нормального импульсов количества движения

$$\alpha_{\sigma i} = \frac{\tau_i - \tau_r}{\tau_i - \tau_\omega};$$

$$\alpha_{\sigma r} = \frac{q_i - q_r}{q_i - q_\omega},$$

где  $\tau_i$  и  $q_i$  – соответственно касательный и нормальный импульсы количества движения падающих молекул;  $\tau_r$  и  $q_r$  – соответственно импульсы количества движения отраженных молекул;  $\tau_\omega$  и  $q_\omega$  – соответственно импульсы количества движения отраженных молекул при равенстве их температуры и температуры поверхности тела.

## 2.10. СКОЛЬЖЕНИЕ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

Результаты экспериментальных исследований течения газа при уменьшении давления в магистрали показали, что реальный расход газа больше теоретического, найденного на основании законов ламинарного течения. Это расхождение объясняется тем, что в отличие от ламинарного течения, при котором скорость на поверхности стенки считают равной нулю, существует скачок скорости, т.е. на поверхности стенки скорость потока газа имеет конечное значение, отличное от нуля. Такое течение газа называют *течением со скольжением*.

При дальнейшем понижении давления, когда средняя длина свободного пути молекул газа больше расстояния между стенками, молекулы движутся от стенки к стенке практически без межмолекулярных соударений, т.е. наступает свободное молекулярное течение.

При течении со скольжением на расстоянии, большем средней длины свободного пути молекул газа, обычно считают, что градиенты макроскопической скорости и потока газа постоянны и изменяются только непосредственно около поверхности (рис. 2.10) на расстояния порядка средней длины  $\bar{\lambda}$  свободного пути молекул газа.

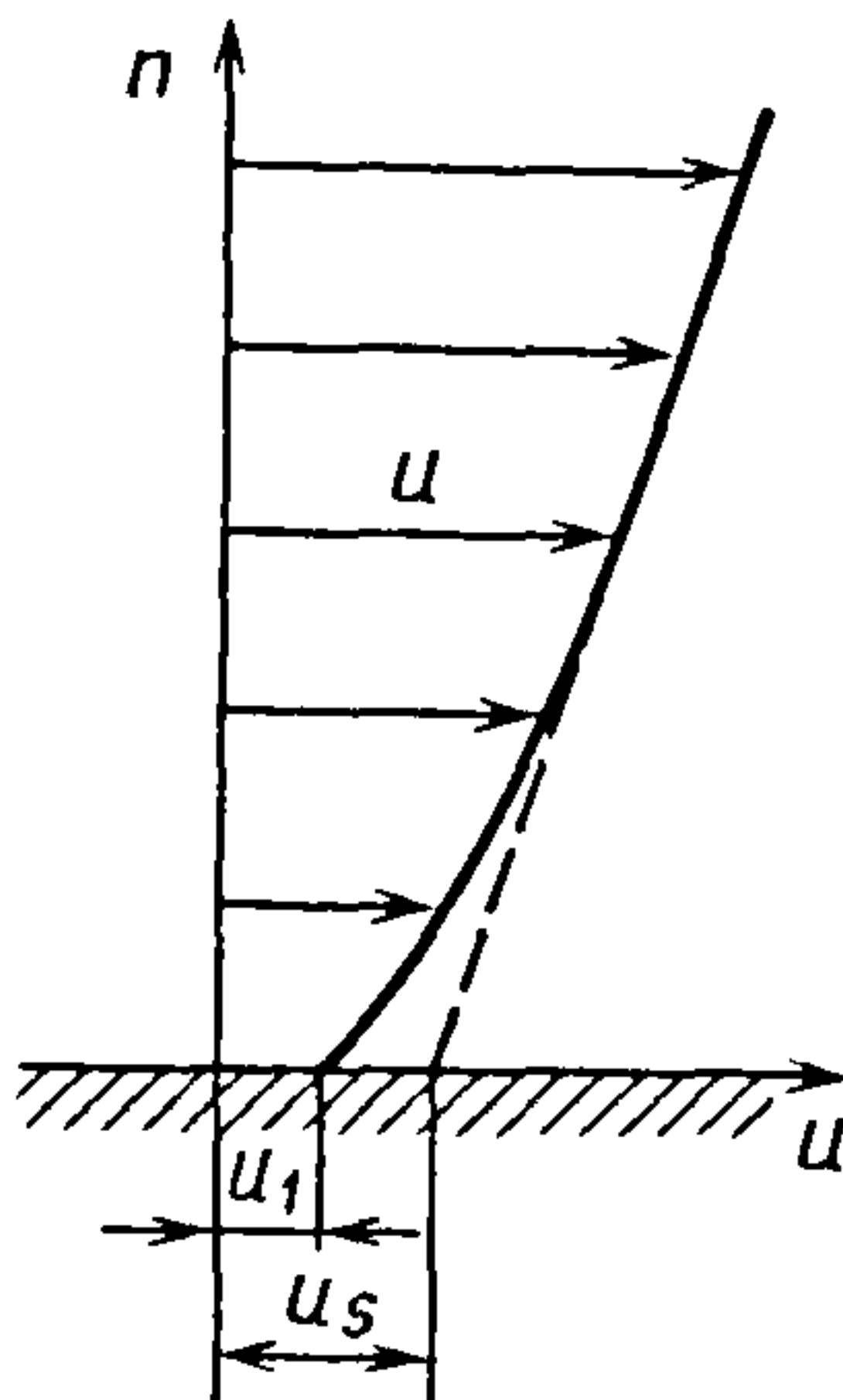


Рис. 2.10. Схема течения газа со скольжением



Для изучения распределения скорости во всем объеме газа на расстояниях, значительно превышающих  $\bar{\lambda}$ , изменение градиента скорости около поверхности не имеет существенного значения. Для определения граничных условий движения газа у поверхности достаточно проэкстраполировать линейный участок изменения скорости до пересечения с поверхностью. Полученное значение  $u_s$  фиктивной скорости называют *скоростью скольжения*, причем действительное значение скорости  $u_1$  потока у поверхности отличается от  $u_s$  и от скорости движения поверхности, равной нулю, если поверхность неподвижна.

Скорость скольжения вдоль поверхности

$$u_s = \chi_v \frac{du}{dn},$$

где  $\chi_v$  — коэффициент скольжения, имеющий единицу длины;  $\frac{du}{dn}$  — градиент скорости газового потока по оси  $n$ , перпендикулярной к поверхности стенки.

Коэффициент скольжения

$$u_s = 2 \frac{2 - \alpha_{\sigma i}}{\alpha_{\sigma i}} \frac{\eta}{\rho \bar{v}},$$

где  $\alpha_{\sigma i}$  — коэффициент аккомодации тангенциального импульса количества движения;  $\eta$  и  $\rho$  — вязкость и плотность газа.

Под коэффициентом скольжения  $\chi_v$  понимают расстояние, на которое должна быть удалена стенка, чтобы скорость потока на ней при экстраполяции линейного изменения скорости была равна скорости движения стенки или нулю, если последняя неподвижна.

## 2.11. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ СКАЧОК

Явление, аналогичное скольжению, наблюдают и при исследовании теплопроводности разреженных газов, если средняя длина  $\bar{\lambda}$  свободного пути значительно меньше расстояния между поверхностями тел с разными температурами,

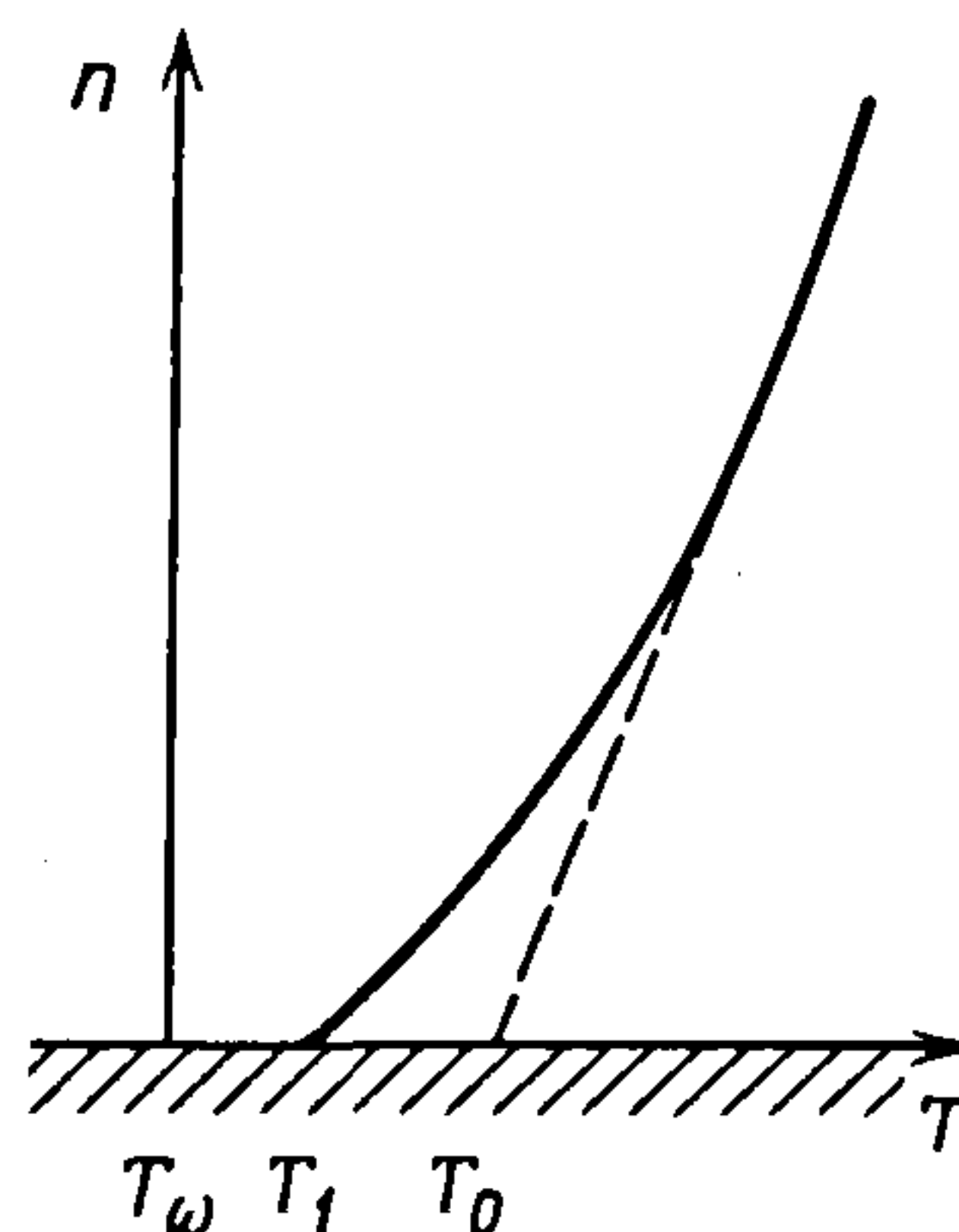


Рис. 2.11. Схема температурного скачка на границе поверхность-газ

т.е. различаются температуры поверхности  $T_\omega$  и газа  $T_1$  непосредственно у поверхности.

На расстоянии от поверхности больше  $\bar{\lambda}$  градиент температуры в направлении оси  $n$ , перпендикулярной к поверхности, изменяется только около поверхности (рис. 2.11). Отклонение закона изменения температуры около поверхности от линейного объясняется тем, что молекулы отражаются от стенки при некоторой температуре  $T'_\omega$ , отличающейся от температуры стенки  $T_\omega$ . Энергия молекул газа, подлетающих к стенке, соответствует температуре слоя газа, в котором они испытывали последние столкновения. При отражении молекул от поверхности температура газа  $T_1$  должна быть промежуточной между температурой газа в слое, где молекулы испытали последние столкновения, и температурой стенки. Следовательно, действительная температура газа у поверхности  $T_1$  отличается и от температуры стенки  $T_\omega$  и от температуры  $T_0$ , соответствующей линейному изменению температуры до поверхности.

Разность фиктивной температуры газа  $T_0$  у поверхности, определяемой экстраполяцией линейного закона изменения температуры до поверхности, и темпера-

туры стенки  $T_w$  называют *температурным скачком*:

$$\Delta T = T_0 - T_w = \chi_T \frac{dT}{dn},$$

где  $\chi_T$  — коэффициент температурного скачка, имеющий единицу длины (некоторое расстояние, на которое должна быть отодвинута поверхность стенки, чтобы температура газа на ней была равна температуре стенки при сохранении линейного закона изменения температуры);

$$\chi_T = \frac{75\pi}{128} \frac{2 - \alpha_{\sigma i}}{\alpha_{\sigma i}} \bar{\lambda}, \quad (2.37)$$

где  $\alpha_{\sigma i}$  — коэффициент аккомодации тангенциального импульса количества движения.

Введя коэффициент аккомодации  $\alpha$ , получим

$$\chi_T = \frac{75\pi}{128} \frac{2 - \alpha}{\alpha} \bar{\lambda}. \quad (2.38)$$

Уравнения (2.37) и (2.38) справедливы для одноатомных газов. Для многоатомных газов

$$\chi_T = \frac{4}{k+1} \frac{\chi}{\rho \bar{v} \bar{\lambda} c_v} \frac{2 - \alpha}{\alpha} \bar{\lambda}.$$



## Глава 3

# ТЕЧЕНИЕ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ И ПРОВОДИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

### 3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Поток газа, Па·м<sup>3</sup>/с,

$$Q = Sp, \quad (3.1)$$

где  $S = (dV / dt)_p$  – быстрота откачки, или объем газа при данном давлении, который откачивается в единицу времени, м<sup>3</sup>/с;  $p$  – давление газа в рассматриваемом сечении, Па.

Быстрота действия вакуумного насоса, или быстрота откачки во входном сечении насоса при его работе,  $S = Q / p$ .

Быстрота откачки  $S_0$  объекта – это объем поток газа при данном давлении, который откачивается в единицу времени через сечение вакуумного трубопровода, соединяющего объект откачки с насосом:

$$S_0 = \frac{Q}{p_0}, \quad (3.2)$$

где  $p_0$  – давление газа в откачиваемом сосуда.

Проводимость элемента, м<sup>3</sup>/с, вакуумной системы  $U$  (способность элемента проводить газ) определяется как отношение потока газа  $Q$ , проходящего через элемент вакуумной системы, к разности давлений  $p_1 - p_2$  на его концах:

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2}. \quad (3.3)$$

Величину  $W$ , обратную проводимости элемента вакуумной системы, называют сопротивлением:

$$W = \frac{1}{U} = \frac{p_1 - p_2}{Q}.$$

Проводимость сложных вакуумных систем, состоящих из отдельных элементов, определяют аналогично сопротивлению электрических цепей.

При последовательном соединении  $n$  элементов вакуумной системы с известной проводимостью  $U_i$  (сопротивлением  $W_i$ ) проводимость системы  $U$  находят по формуле:

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i} \quad (3.4)$$

(общее сопротивление  $W = \sum_{i=1}^{i=n} W_i$ ).

Необходимо учитывать, что при последовательном соединении сопротивление составного элемента уменьшается на величину сопротивления входа в элемент. Например, для элементов одного диаметра проводимость системы  $U$

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i} - \sum_{i=2}^{i=n} \frac{1}{U_{0i}},$$

где  $U_{0i}$  – проводимость входа  $i$ -го элемента.

При параллельном соединении  $n$  элементов вакуумной системы ее общая проводимость  $U$  равна сумме проводимостей всех элементов:

$$U = \sum_{i=1}^{i=n} U_i \quad (3.5)$$

(общее сопротивление определяют из со-

отношения  $\frac{1}{W} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{W_i}$ ).

### 3.2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Быстроту откачки  $S_0$  объекта объемом  $V_0$  при давлении  $p_0$  определяют по скорости действия  $S$  насоса и проводимости  $U$  трубопровода при условии постоянства потока:  $Q = \text{const}$ .

Из условия  $Q = S_0 p_0 = U(p_0 - p) = Sp = \text{const}$  следует

$$S_0^{-1} = U^{-1} + S^{-1}$$

или

$$S_0 = \frac{US}{U + S}. \quad (3.6)$$

При известных значениях  $U$  и  $S$  быстроту откачки  $S_0$  объекта можно определить по номограмме (рис. 3.1). Например, для определения  $S_0$  при  $S = 6 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $U = 2,2 \text{ м}^3/\text{с}$  соединим прямой соответствующие точки. Точка пересечения этой прямой со шкалой  $S_0$  дает искомое значение  $S_0 = 1,6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Уравнение (3.6) представляет собой основное уравнение вакуумной техники, которое выражает отличие быстроты откачки объекта  $S_0$  от скорости действия насоса  $S$  при наличии трубопровода

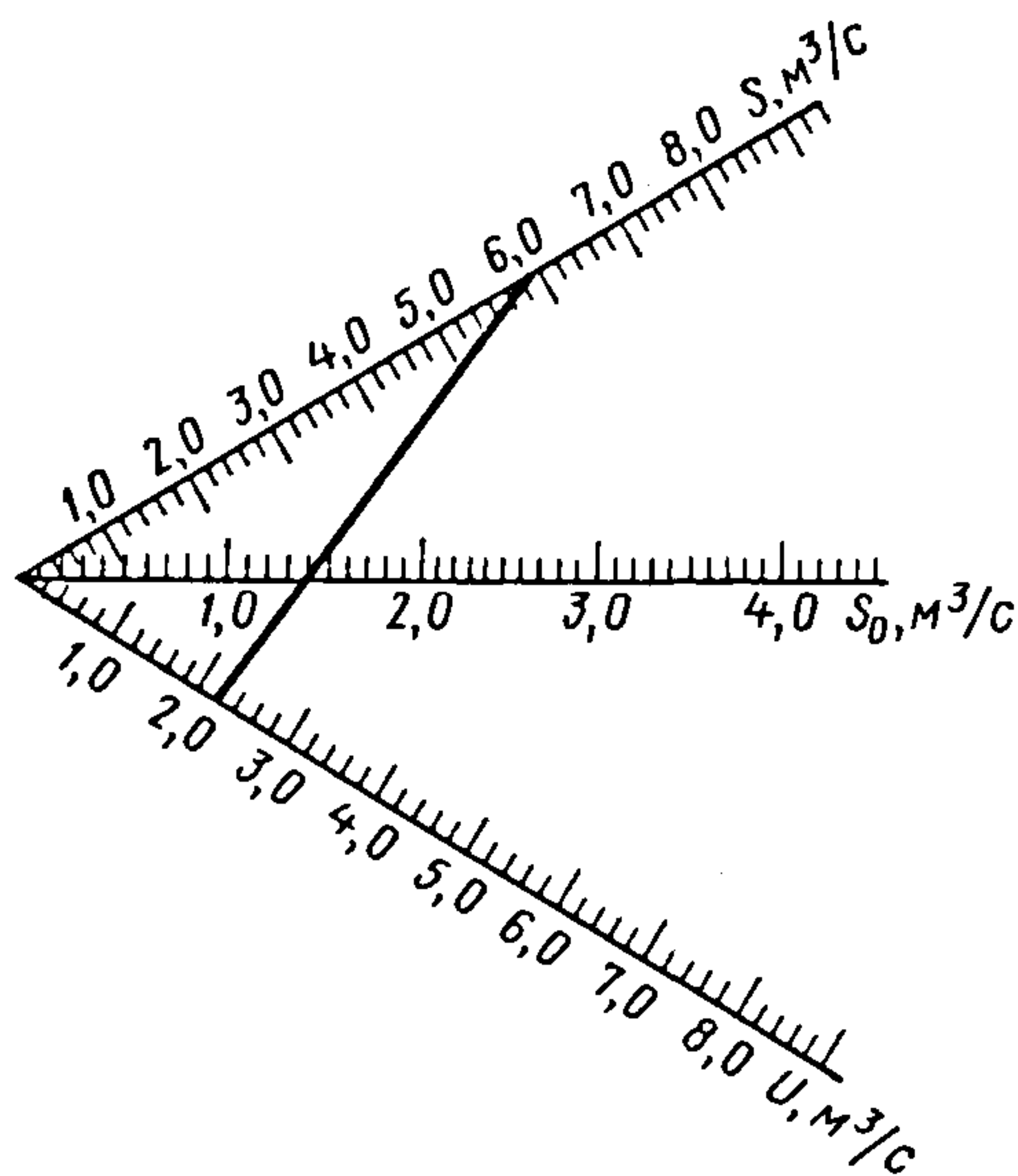


Рис. 3.1. Номограмма для расчета быстроты откачки объема ( $S$ ,  $S_0$  и  $U$  в  $\text{м}^3/\text{с}$ )

проводимостью  $U$ . При  $U \gg S$  влияние трубопровода незначительно и  $S_0 \approx S$ ; при  $U \ll S$  быстрота откачки объекта определяется проводимостью трубопровода, т.е.  $S_0 \approx U$ . В общем случае  $S > S_0$  и  $U > S_0$ .

### 3.3. РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВ

Течение газа в вакуумной системе зависит от ряда параметров, температуры газа и стенок, разности давлений на концах системы, абсолютного давления, внутреннего трения в газе и взаимодействия газа с поверхностью, а также от формы и размеров рассматриваемой системы. Различают три основных вида течения газа: *турбулентное*, или *вихревое*; *ламинарное*, или *вязкостное*; *молекулярное*, или *свободномолекулярное*. Четкой границы между этими видами течения нет; существуют промежуточные области переходных течений.

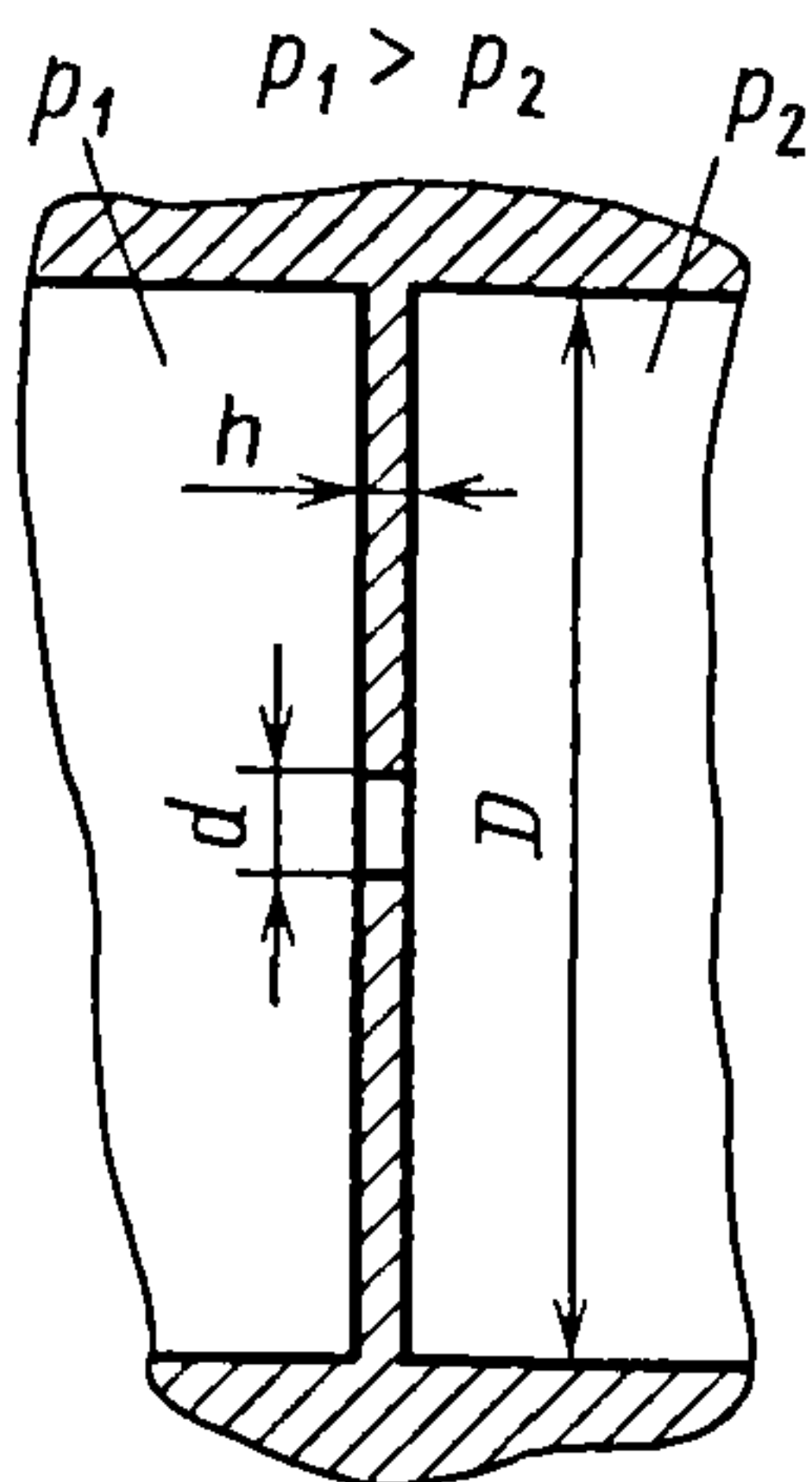
В вакуумной технике обычно различают вязкостный (вплоть до атмосферного давления в системе), молекулярный и переходный между вязкостным и молекулярным режимы течения. При вязкостном режиме течения газа средняя длина  $k$  свободного пути частиц значительно меньше характерного размера емкости (например, для круглого трубопровода таким размером является его диаметр  $D$ ). При молекулярном и переходном режимах течения газа средняя длина свободного пути частиц больше характерного размера или сравнима с ним.

Области течения дифференцируют числом Кнудсена  $Kn = \bar{\lambda}/D$ . Так, при расчетах проводимости цилиндрических круглых трубопроводов можно принять: молекулярному режиму течения соответствует  $Kn > 0,33$ , вязкостному  $Kn < 10^{-2}$ , переходному  $10^{-2} < Kn < 0,33$ .

### 3.4. ВЯЗКОСТНЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ

При вязкостном течении газ в трубопроводе условно можно разделить на отдельные слои, движущиеся с различными скоростями. Различие скоростей слоев обусловлено внутренним трением в газе (вязкостью), поэтому рассматриваемый режим течения называют вязкостным.



Рис. 3.2.  
Диафрагма

**Течение газа через диафрагмы.** Истечение газа из одной емкости в другую через отверстие в тонкой перегородке (рис. 3.2), толщина  $h$  которой значительно меньше диаметра  $d$  отверстия ( $h \ll d$ ), рассматривают как течение через диафрагму. Если диаметр  $d$  диафрагмы значительно меньше диаметров  $D$  соседних сосудов ( $d \ll D$ ), диафрагму считают малой; если диаметр  $d$  соизмерим с диаметром одного из сосудов, диафрагму считают большой.

Для вязкостного режима течения при наличии перепада давлений  $p_1 - p_2$  между сосудами поток газа  $Q$ , Па·м<sup>3</sup>/с, через малую диафрагму

$$Q = p_1 F \tau^{1/k} \sqrt{\left(1 - \tau^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{2k}{k-1} \frac{RT}{M}}, \quad (3.7)$$

где  $p_1$  — давление в сосуде, из которого вытекает газ;  $F$  — площадь сечения диафрагмы, м<sup>2</sup>;  $\tau = \frac{p_2}{p_1}$  — отношение давлений

по обе стороны от диафрагмы;  $k$  — показатель адиабаты;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Проводимость малой диафрагмы

$$U = F \frac{\tau^{1/k}}{1 - \tau} \sqrt{\left(1 - \tau^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{2k}{k-1} \frac{RT}{M}}. \quad (3.8)$$

По мере уменьшения давления  $p_2$  (или отношения  $\tau$ ) поток газа через малую диафрагму возрастает до определенного значения, соответствующего критическому отношению

$$\tau_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

начиная с которого скорость истечения через малую диафрагму становится постоянной и равной скорости звука независимо от давления  $p_2$ . Например, для воздуха при  $T = 293$  К отношение  $\tau_{кр} = 0,528$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} U &= 766 \tau^{0,714} \frac{F}{1 - \tau} \sqrt{1 - \tau^{0,286}} && \text{при } 0,528 \leq \tau \leq 1; \\ U &= 200 \frac{F}{1 - \tau} && \text{при } \tau < 0,528; \\ U &= 200 F && \text{при } \tau < 0,1. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Проводимость большой диафрагмы определяют по формулам для малой диафрагмы с учетом поправочного коэффициента  $F_D/(F_D - F)$ , где  $F$  — площадь сечения диафрагмы, м<sup>2</sup>;  $F_D$  — площадь поперечного сечения объема, из которого истекает газ через диафрагму, диаметр  $D$  которого соизмерим с диаметром  $d$  диафрагмы, м<sup>2</sup>.

Например, проводимость большой диафрагмы для воздуха при  $T = 293$  К и  $\tau < 0,528$

$$U = 200 \frac{F}{1 - \tau} \frac{F_D}{F_D - F}.$$

**Течение газа по трубопроводу.** Вязкостное течение в цилиндрических трубах

круглого сечения описывается законом Пуазейля. В соответствии с этим законом

$$Q = \pi R^4 \bar{p} (p_1 - p_2) / 8l\eta,$$

где  $R$  – радиус поперечного сечения трубопровода, м;  $\bar{p} = 0,5 (p_1 + p_2)$  – среднее давление в трубопроводе, Па;  $l$  – длина трубопровода, м;  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с.

При вязкостном режиме течения поток газа в цилиндрической трубе зависит не только от разности давлений на концах трубопровода, но и от абсолютного давления  $\bar{p}$  в потоке.

Проводимость цилиндрического трубопровода круглого сечения

$$U = \pi R^4 \bar{p} / 8l\eta; \quad (3.10)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 1360 D^4 \bar{p} / l. \quad (3.11)$$

Проводимость трубопровода при течении по нему любого газа

$$U_i = \beta_i^{-1} U, \quad (3.12)$$

где  $U$  – проводимость трубопровода при течении по нему воздуха;  $\beta_i = \eta_i / \eta = (\sigma / \sigma_i)^2 \sqrt{M_i / M}$  – коэффициент, учи-

тывающий различие динамических вязкостей рассматриваемого газа  $\eta_i$  и воздуха  $\eta$  ( $\sigma$  и  $\sigma_i$  – диаметры молекул воздуха и рассматриваемого газа;  $M$  и  $M_i$  – молекулярные массы воздуха и рассматриваемого газа).

Для определения проводимости отверстия соотношение (3.12) неприменимо, поэтому используют исходное выражение (3.8).

#### Значения $\beta_i$ для некоторых газов [19]

Воздух .....	1,0
H <sub>2</sub> .....	2,06
He .....	0,93
Пары воды .....	1,94
Ne .....	0,58
N <sub>2</sub> .....	1,04
O <sub>2</sub> .....	0,90
Ar .....	0,84
CO <sub>2</sub> .....	1,24

Динамическую вязкость в зависимости от температуры газа определяют по формуле

$$\eta_T = \alpha T^x,$$

где  $\alpha$  и  $x$  – константы, зависящие от природы газа.

В табл. 3.1 приведены значения  $x$ ,  $\alpha$ , константы Сюзерленда  $C$  в интервале температур  $T_1 \dots T_2$  и вязкости  $\eta$  для ряда газов.

3.1. Константы  $x$ ,  $\alpha$ ,  $C$  при температурах  $T_1 \dots T_2$  и вязкость  $\eta$

Газ	C (при $T_1 \dots T_2$ , К)	$\alpha \cdot 10^6$	$x$	$\eta \cdot 10^5$ , Па·с, при $T$ , К		
				273	293	323
Воздух	106,8 (298...553)	–	–	1,708	1,812	1,954
H <sub>2</sub>	73 (298...473); 86 (373...473); 105 (473...523); 234 (986...1095)	1,860	0,678	0,840	0,880	0,938
He	83 (373...473); 95 (473...523); 173 (955...1088)	4,894	0,653	1,860	1,946	2,065
Пары воды	673 (373...623)	0,170	1,116	0,883	–	1,065
Ne	61 (293...373); 70 (373...473); 82 (473...523); 128 (959...1100)	–	–	2,975	3,113	3,310



Окончание табл. 3.1

Газ	С (при $T_1...T_2$ , К)	$\alpha \cdot 10^6$	x	$\eta \cdot 10^5$ , Па·с, при $T$ , К		
				273	293	323
N <sub>2</sub>	103,9 (298...553) 104,7 (293...1098)	3,213	0,702	1,665	1,766	1,883
O <sub>2</sub>	126,6 (293...553); 125 (288...903)	3,355	0,721	1,910	2,026	2,182
Ar	142 (293...1100)	2,782	0,766	2,085	2,215	2,400
CO <sub>2</sub>	101,2 (295...550)	—	—	1,662	1,749	1,872
CO <sub>2</sub>	254 (298...553); 213 (573...1097)	1,057	0,868	1,367	1,463	1,607
Kr	188 (273...373)	—	—	2,330	2,480	2,695

Если известна вязкость  $\eta_{T_0}$  при температуре  $T_0$ , то

$$\eta_T = \eta_{T_0} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \frac{1 + C/T_0}{1 + C/T}$$

Проводимость трубопроводов, сечения которых отличаются от круга, определяют по эмпирическим зависимостям.

Проводимость длинного трубопровода прямоугольного сечения [19]

$$U = \frac{ab^3}{12\eta} \frac{\bar{p}}{l} \times \left[ 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{b}{a} \left( th \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^5} th \frac{3\pi a}{2b} + \dots \right) \right] \quad (3.13)$$

или для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 1950 k'(a^2 b^2 / l) \bar{p},$$

где  $k'$  – эмпирический коэффициент (коэффициент Клаузинга);  $a$  и  $b$  – длины меньшей и большей сторон прямоугольного сечения, м;  $l$  – длина трубопровода, м.

**Значения  $k'$  в зависимости от отношения  $a/b$**

$a/b$ .....	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
$k'$ .....	1,00	0,99	0,98	0,95	0,90
$a/b$ .....	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$k'$ .....	0,82	0,71	0,58	0,42	0,23

Выражение в квадратных скобках общего уравнения проводимости (3.13) трубопровода прямоугольного сечений (обозначим  $k''$ ) можно определить графически (рис. 3.3).

Проводимость трубопровода квадратного сечения со стороной  $a$

$$U = 3,52 \cdot 10^{-2} a^4 \bar{p} / \eta l;$$

Проводимость длинного трубопровода эллиптического сечения

$$U = \frac{\pi}{64} \frac{\bar{p}}{\eta l} \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 2,70 \cdot 10^3 \frac{a^3 b^3}{l(a^2 + b^2)} \bar{p},$$

где  $a$  и  $b$  – длины меньшей и большей осей эллипса.

Проводимость трубопровода, образованного двумя коаксиальными цилиндрами (рис. 3.4),

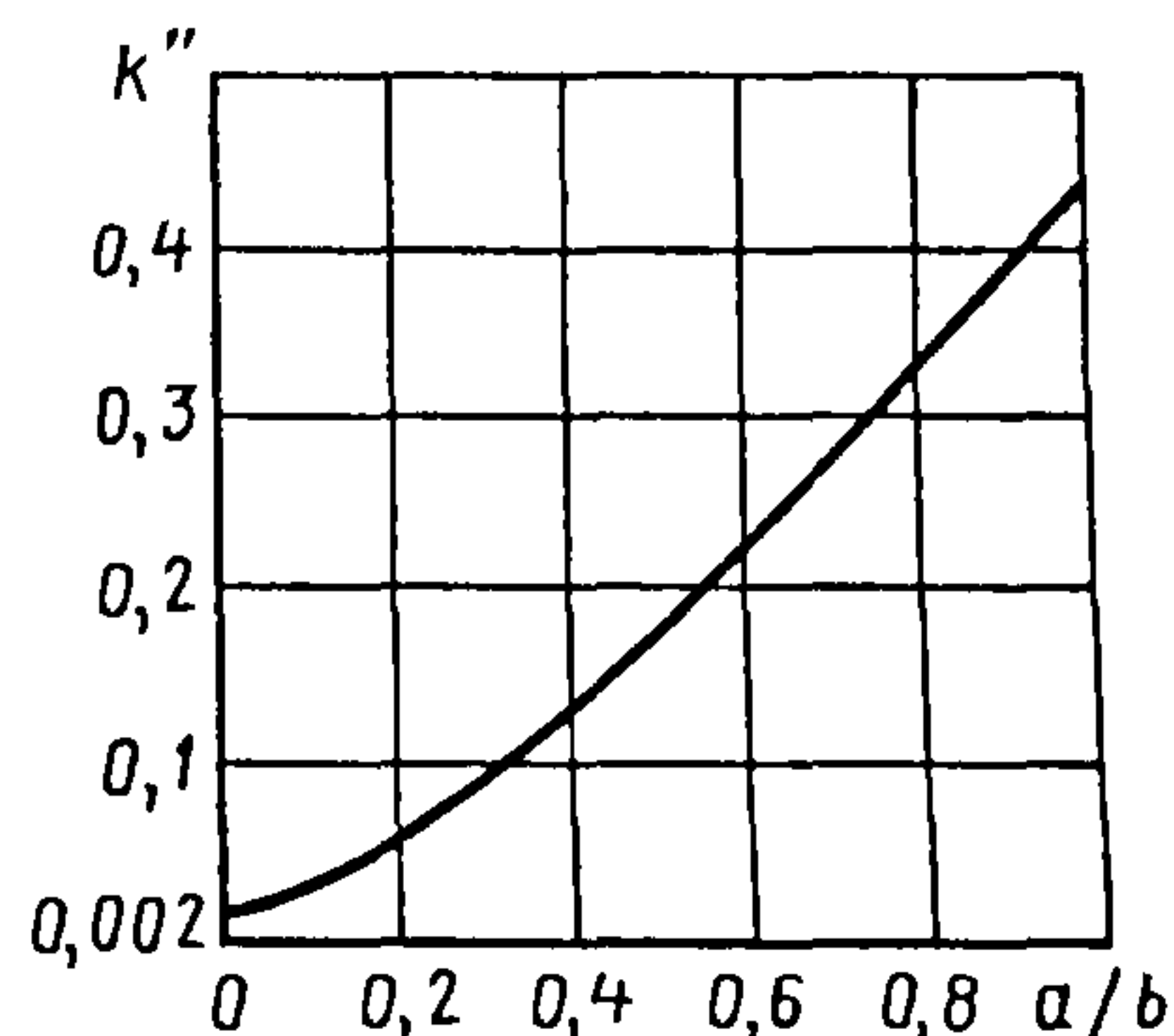


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента  $k''$  от отношения  $a/b$  прямоугольного сечения трубопровода

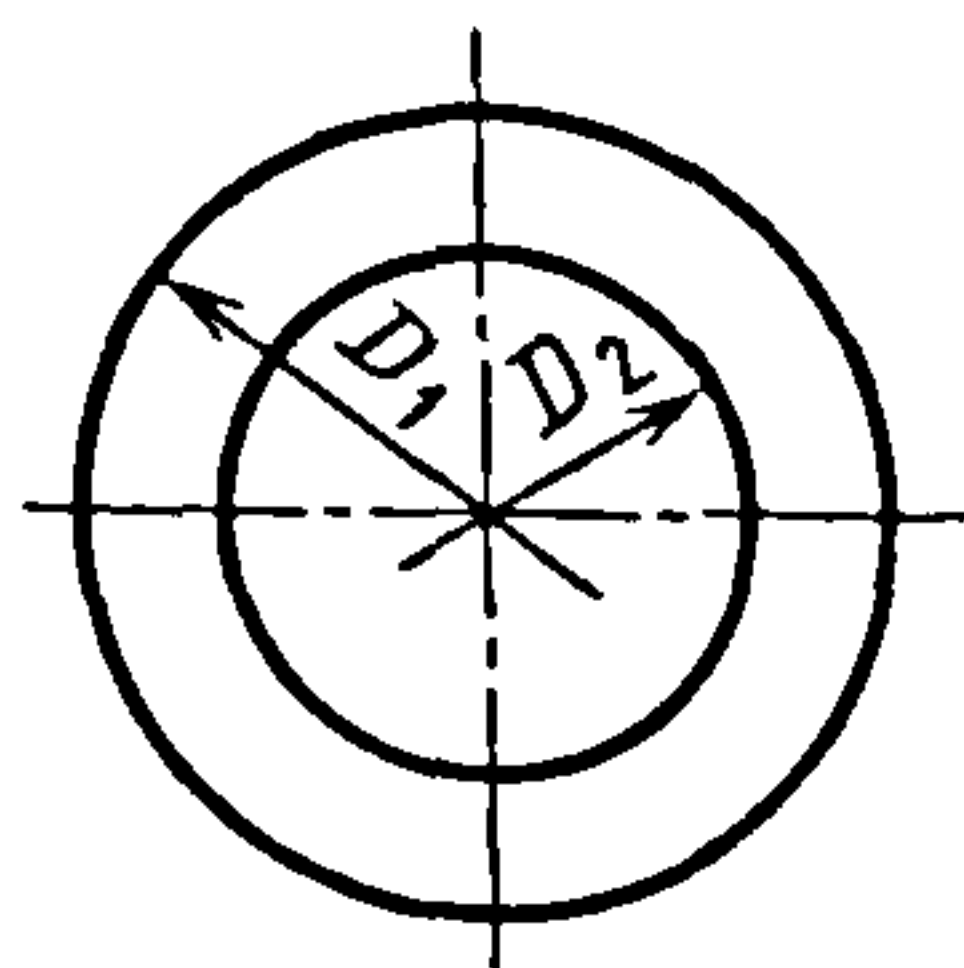


Рис. 3.4. Сечение трубопровода, образованного двумя коаксиальными цилиндрами

$$U = \frac{\pi}{8\eta} \frac{\bar{p}}{l} \left[ R_1^4 - R_2^4 - \frac{(R_1^2 - R_2^2)^2}{\ln(R_1/R_2)} \right];$$

для воздуха при  $T=293$  К

$$U = 21,67 \cdot 10^3 \frac{\bar{p}}{l} \left[ R_1^4 - R_2^4 - \frac{(R_1^2 - R_2^2)^2}{\ln(R_1/R_2)} \right],$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы соответственно внешнего и внутреннего цилиндров, м.

Проводимость коротких трубопроводов ( $l < 20D$ ) определяют по эмпирическим зависимостям, так как для них существенно влияние сопротивления входного и выходного сечений трубопровода, не учитываемое законом Пуазейля.

Проводимость короткого трубопровода круглого сечения [53]

$$U = \frac{\pi D^4 \bar{p}}{128\eta l \left[ 1 + 4,54 \cdot 10^{-2} MQ / (\eta RTl) \right]}; \quad (3.14)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 1360 \frac{\bar{p}}{l} \frac{D^4}{1 + 0,03Q/l}. \quad (3.15)$$

Если поток  $Q$  неизвестен, то в уравнение (3.14) или (3.15) подставляют произвольное значение  $Q$  и ведут расчет методом последовательных приближений до тех пор, пока разность между принятым значением  $Q$  и значением  $Q = U(p_1 - p_2)$  не станет близкой к нулю.

Проводимость короткого трубопровода с сечением произвольной формы можно найти по формуле

$$U^{-1} = U_l^{-1} + U_0^{-1}, \quad (3.16)$$

где  $U_l$  – проводимость короткого трубопровода, вычисленная по формулам для длинного трубопровода;  $U_0$  – проводимость входного отверстия трубопровода.

### 3.5. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ

Молекулярный режим течения газа характеризуется достаточно большим значением числа Кнудсена  $Kn$ , т.е. при этом режиме течения практически нет взаимодействия между молекулами. Для описания независимого движения молекул используют основные положения молекулярно-кинетической теории газов либо соотношения динамики сплошной среды, предложенные Кнудсенем.

**Течение газа через диафрагмы.** При молекулярном режиме течения поток газа через малую диафрагму определяется разностью потоков молекул через отверстие с двух сторон (см. рис. 3.2):

$$Q = \frac{F}{4} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} (p_1 - p_2), \quad (3.17)$$

где  $F$  – площадь сечения диафрагмы,  $m^2$ ;  $p_1, p_2$  – давления по обе стороны от диафрагмы, Па.

Проводимость малой диафрагмы

$$U = 36,4 \sqrt{T/M} \cdot F; \quad (3.18)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 116F. \quad (3.19)$$

Проводимость большой диафрагмы при молекулярном режиме течения, как и при вязкостном, отличается от проводимости малой диафрагмы множителем  $F_D/(F_D - F)$ , т.е.

$$U = 36,4 \sqrt{T/M} \cdot \frac{FF_D}{F_D - F}, \quad (3.20)$$

где  $F$  – площадь сечения большой диафрагмы,  $m^2$ ;  $F_D$  – площадь поперечного сечения сосуда, диаметр которого соизмерим с диаметром большой диафрагмы,  $m^2$ .



Течение газа по трубопроводу. Проводимость длинного ( $l > 20D$ ) прямолинейного трубопровода определяют по зависимости, предложенной Кнудсенон:

$$U = \frac{4}{3} \bar{v} \left( \int_0^l (\Pi / F^2) dl \right)^{-1}, \quad (3.21)$$

где  $\bar{v}$  – среднее арифметическое скоростей молекул газа;  $l$  – длина трубопровода;  $\Pi$  и  $F$  – соответственно периметр и площадь поперечного сечения трубопровода.

При постоянном по длине сечении трубопровода уравнение (3.21) имеет вид

$$U = 194 \frac{F^2}{\Pi l} \sqrt{T/M}; \quad (3.22)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 618 F^2 / (\Pi l).$$

Из уравнения (3.22) проводимость длинного прямолинейного трубопровода круглого сечения

$$U = 38,1 (D^3 / l) \sqrt{T/M}; \quad (3.23)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 121 D^3 / l, \quad (3.24)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода, м.

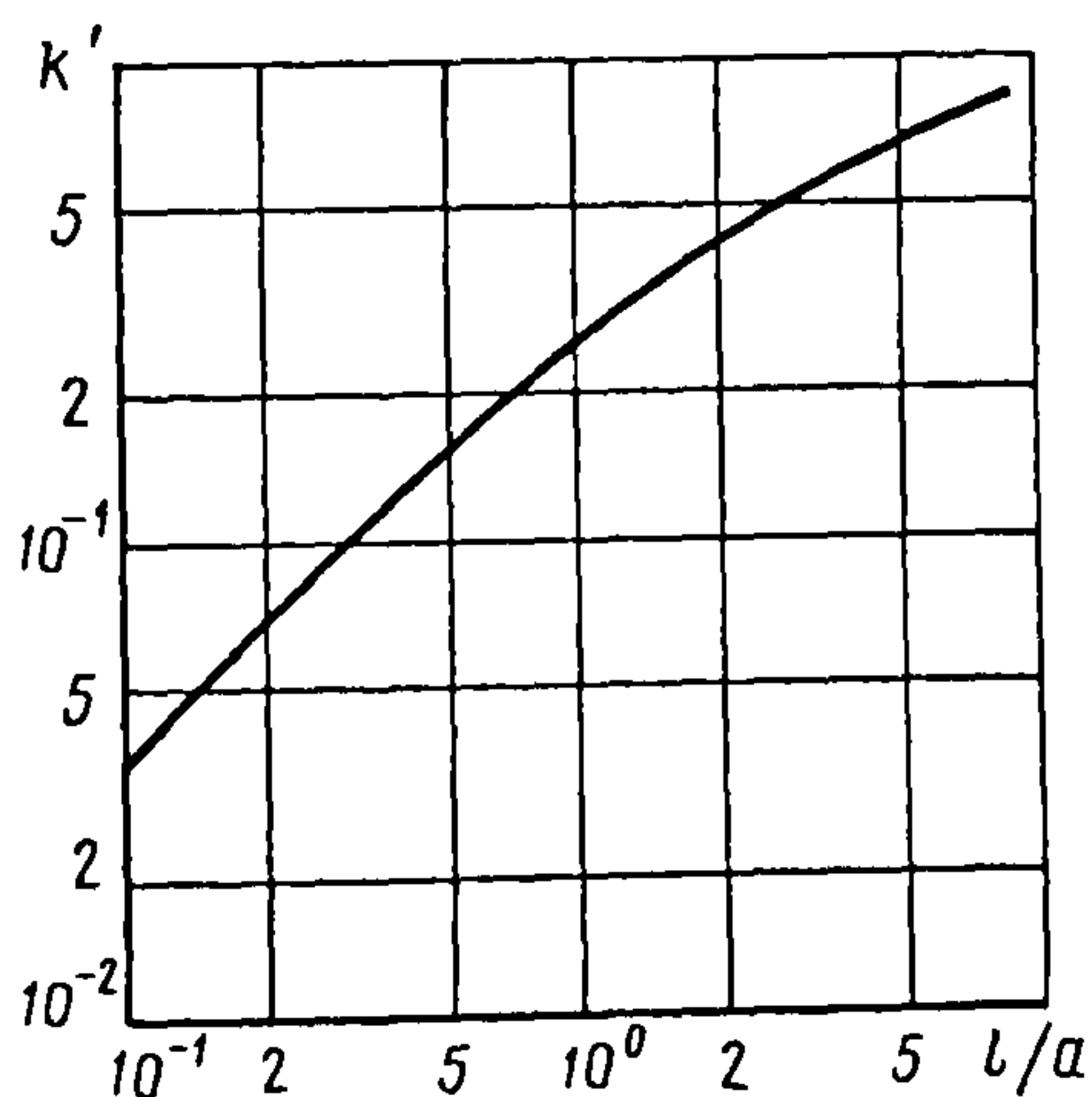


Рис. 3.5. График к определению коэффициента  $k'$  для расчета проводимости щели

При расчете проводимости трубопровода, сечение которого отличается от круга, в уравнение (3.22) вводят поправочный коэффициент  $k'$ ;

$$U = 194 k' \frac{F^2}{\Pi l} \sqrt{T/M}. \quad (3.25)$$

Проводимость трубопровода прямоугольного сечения

$$U = 97 k' \frac{a^2 b^2}{(a+b)l} \sqrt{T/M};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 309 k' a^2 b^2 / [(a+b)l].$$

Коэффициент  $k'$  определяют по формуле, предложенной Клаузингом:

$$k' = \frac{3}{8} \frac{1+\delta}{\delta^2} \left\{ \delta \ln \left( \delta + \sqrt{1+\delta^2} \right) + \delta^2 \ln \frac{1+\sqrt{1+\delta^2}}{\delta} + \frac{1}{3} [1+\delta^3 - (1+\delta^2)^{1,5}] \right\},$$

где  $\delta = a/b \leq 1$ .

Проводимость трубопровода прямоугольного сечения, одна из сторон которого значительно больше другой ( $b/a$ ), т.е. проводимость щели [19]

$$U = 97 k' (a^2 b / l) \sqrt{T/M};$$

здесь поправочный коэффициент  $k'$  определяют графически (рис. 3.5) или, если  $l > 10a$ , по формуле

$$k' = \frac{3}{8} \ln (l/a). \quad (3.26)$$

С учетом выражения (3.26) проводимость щелевого канала находят по формуле

$$U = 36,4 (a^2 b / l) \ln (l/a) \sqrt{T/M};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 116 (a^2 b / l) \ln (l/a).$$

Проводимость трубопровода с эллиптическим поперечным сечением [53]

$$U = 53,7 \frac{a^2 b^2}{l \sqrt{a^2 + b^2}} \sqrt{T/M};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 170 a^2 b^2 / [l \sqrt{a^2 + b^2}].$$

Проводимость трубопровода с сечением в виде равностороннего треугольника [53]

$$u = 15,1 (a^3 / l) \sqrt{T/M};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 47,9 a^3 / l,$$

где  $a$  – сторона треугольника, м.

Проводимость трубопровода, образованного двумя коаксиальными цилиндрами (см. рис. 3.4) [53],

$$U = 38,1 k' \frac{(D_1^2 - D_2^2)^2}{l(D_1 + D_2)} \sqrt{T/M};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 121 k' \frac{(D_1 - D_2)(D_1^2 - D_2^2)}{l},$$

где  $k'$  – коэффициент, учитывающий отличие сечения трубопровода от круга и определяемый графически (рис. 3.6);  $D_1$  и

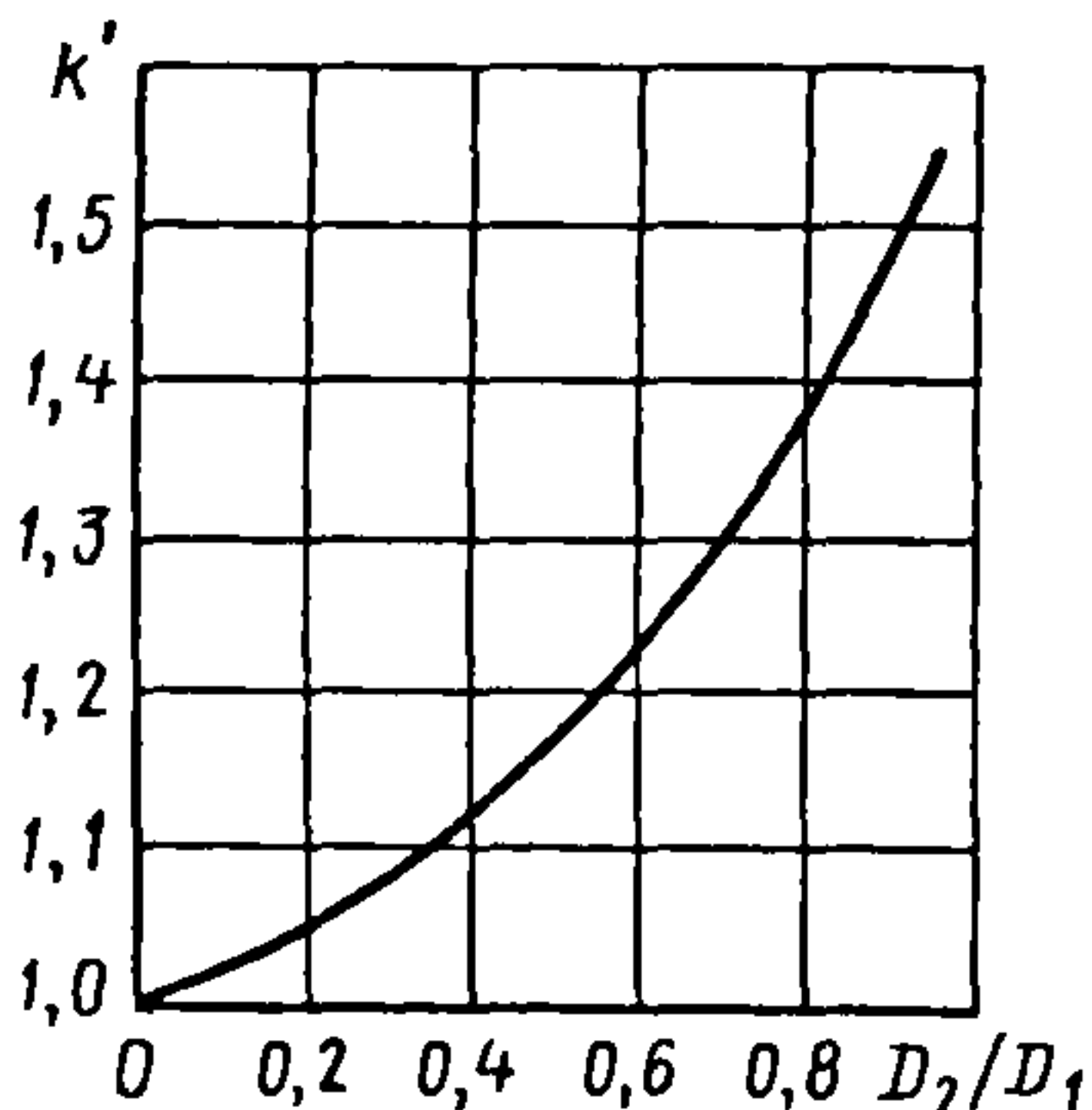


Рис. 3.6. График к определению коэффициента  $k'$ , учитывающего отличие сечения трубопровода от круга

$D_2$  – диаметры соответственно внешнего и внутреннего цилиндров, м;  $l$  – длина трубопровода, м.

Проводимость щели, образованной стенкой и торцом полого цилиндра (рис. 3.7), при течении газа в радиальном направлении [53]

$$U = 114 \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_1 - D_2}{2a} \right) \frac{a^2 (D_1 + D_2)}{D_1 - D_2} \sqrt{T/M};$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 362 \left( \frac{1}{2} + \ln \frac{D_1 - D_2}{2a} \right) \frac{a^2 (D_1 + D_2)}{D_1 - D_2},$$

где  $a$  – ширина щели, м;  $D_1, D_2$  соответственно внешний и внутренний диаметры цилиндра, м.

Для расчета проводимости (рис. 3.8) коротких цилиндрических трубопроводов в соотношение (3.24) вводят поправочный коэффициент Клаузинга  $k$ .

Тогда

$$U = 121 k D^3 / l,$$

где

$$k = \frac{15(l/D) + 12(l/D^2)}{20 + 38(l/D) + 2(l/D)^2}. \quad (3.27)$$

Значения  $k$ , вычисленные по формуле (3.27) при различных отношениях  $l/D$ , приведены в табл. 3.2.

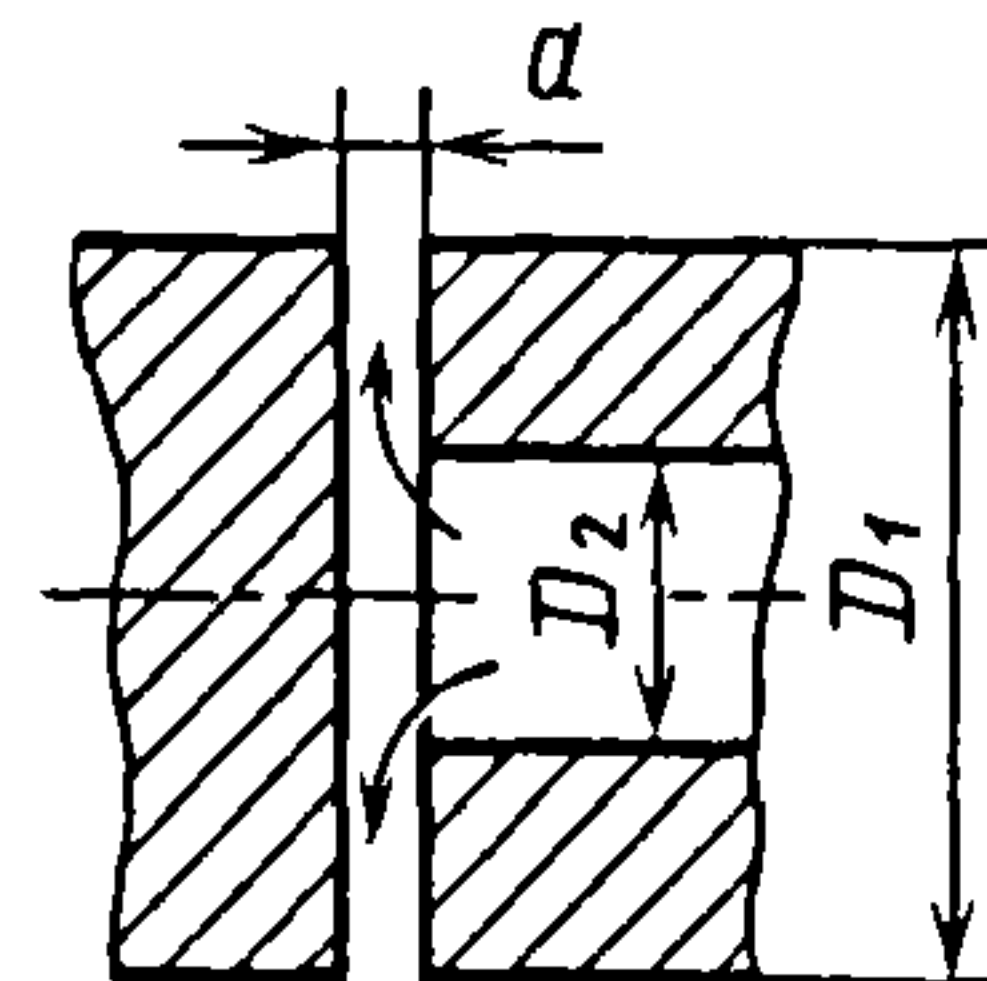


Рис. 3.7. Схема течения между стенкой и торцом полого цилиндра



### 3.2. Значения $k$ , вычисленные по формуле (3.27) при различных отношениях $l/D$

$l/D$	$k$	$l/D$	$k$	$l/D$	$k$
0,05	0,036	0,8	0,300	10	0,840
0,06	0,055	1,0	0,380	20	0,910
0,10	0,068	2,0	0,540	40	0,950
0,20	0,130	4,0	0,700	60	0,970
0,40	0,210	6,0	0,770	80	0,980
0,60	0,280	8,0	0,810	100	1

Если диаметр откачиваемого объекта  $D_0 < 10D$ , где  $D$  – диаметр трубопровода, то

$$k = \left[ 1 + 1,33 \frac{D}{l} \left( 1 - \frac{D^2}{D_0^2} \right)^{-1} \right]^{-1}.$$

Для определения проводимости цилиндрических трубопроводов можно использовать номограмму (рис. 3.9). Например, для трубопровода длиной  $l = 1$  м и диаметром  $D = 0,5$  м проводимость  $U = U'k = 14 \cdot 0,6 = 8,4$  м<sup>3</sup>/с.

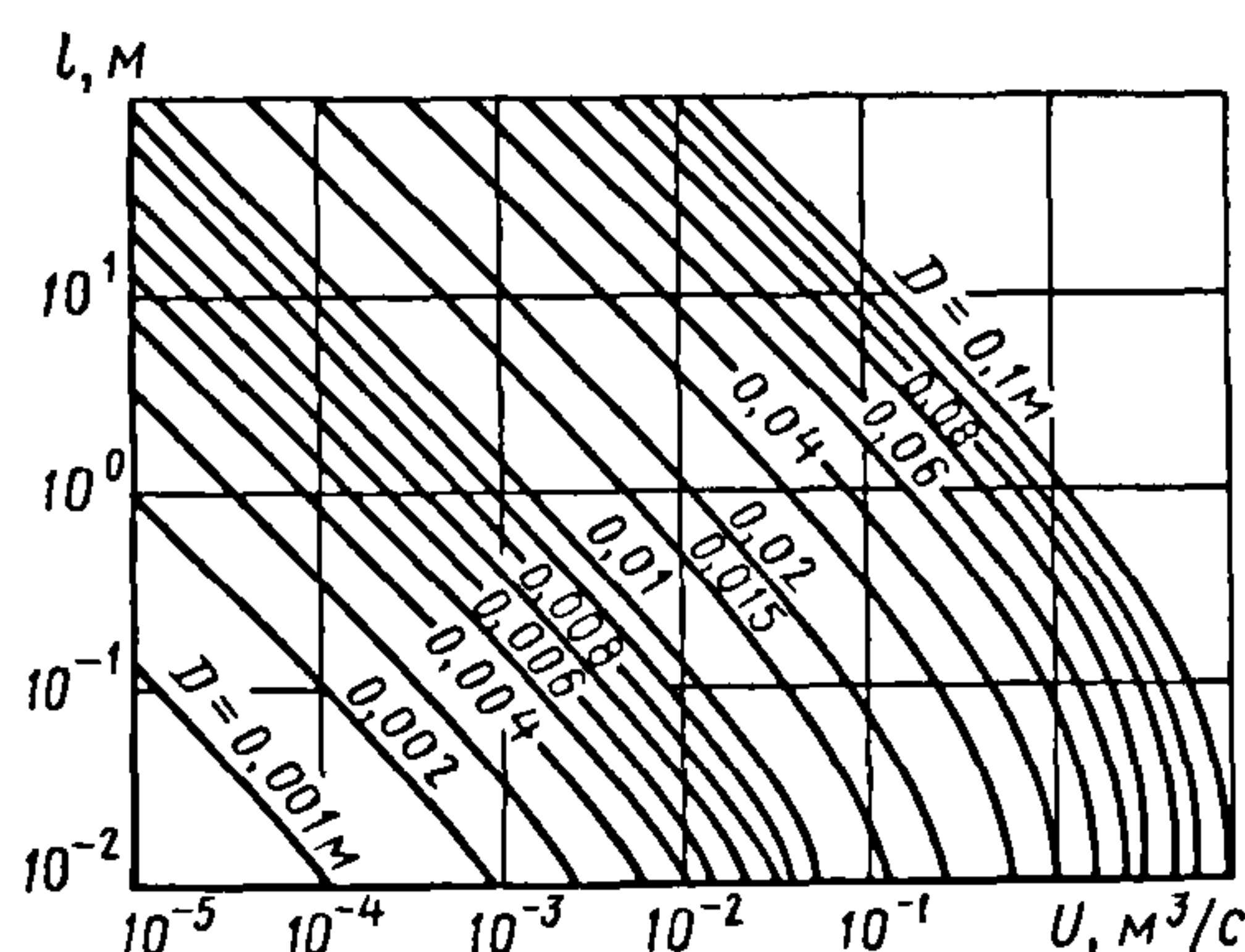


Рис. 3.8. График к определению проводимости коротких цилиндрических трубопроводов по их длине и диаметру

Для расчета проводимости коротких трубопроводов наиболее удобна форма записи расчетного выражения, предложенная Клаузингом [53]:

$$U = 0,25kF\sqrt{T/M} = 36,4kF\sqrt{T/M}; \quad (3.28)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 116kF, \quad (3.29)$$

где  $k$  – коэффициент Клаузинга, представляющий собой вероятность прохождения молекул газа от входного сечения рассматриваемого элемента трубопровода до выходного;  $F$  – площадь входного сечения трубопровода, м<sup>2</sup>.

Значения коэффициента Клаузинга для цилиндрического трубопровода в зависимости от отношения длины  $l$  к диаметру  $D$  приведены в табл. 3.3 [53].

В табл. 3.4–3.6 представлены значения коэффициента Клаузинга:

в табл. 3.4 [53] – для трубопровода прямоугольного сечения, одна из сторон которого существенно больше другой ( $b/a$ ), или для щели в зависимости от отношения длины  $l$  трубопровода к меньшей стороне  $a$  сечения щели;

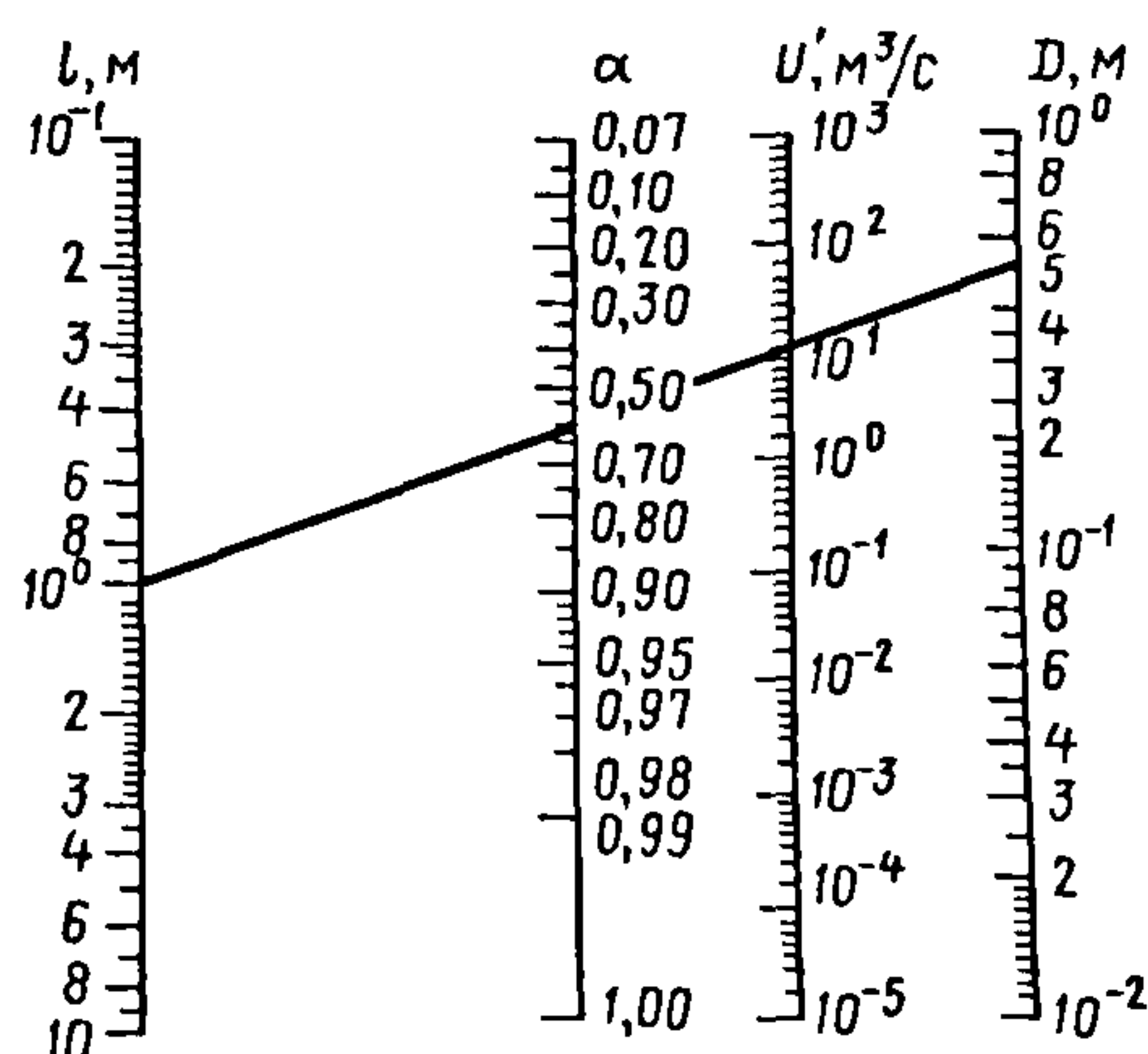


Рис. 3.9. Номограмма для расчета проводимости цилиндрических трубопроводов при молекулярном режиме течения воздуха ( $T = 293$  К)

### 3.3. Значения коэффициента Клаузинга для цилиндрического трубопровода в зависимости от отношения длины $l$ к диаметру $D$

$l/D$	$k$	$l/D$	$k$	$l/D$	$k$	$l/D$	$k$
0,00	1,00	0,65	0,61	1,6	0,41	8	0,14
0,05	0,95	0,70	0,60	1,7	0,39	9	0,12
0,10	0,91	0,75	0,58	1,8	0,38	10	0,11
0,15	0,87	0,80	0,57	1,9	0,37	15	0,08
0,20	0,83	0,85	0,55	2,0	0,36	20	0,06
0,25	0,80	0,90	0,54	2,5	0,32	25	0,05
0,30	0,77	0,95	0,53	3,0	0,28	30	0,04
0,35	0,74	1,0	0,51	3,5	0,25	35	0,04
0,40	0,72	1,1	0,49	4,0	0,23	40	0,03
0,45	0,69	1,2	0,47	4,5	0,21	45	0,03
0,50	0,67	1,3	0,45	5,0	0,20	50	0,03
0,55	0,65	1,4	0,44	6,0	0,17	500	0,003
0,60	0,63	1,5	0,42	7,0	0,15	> 500	$4D/3l$

### 3.4. Значения коэффициента Клаузинга для трубопровода прямоугольного сечения

$l/a$	$k$	$l/a$	$k$
0,0	1,0000	2,0	0,5417
0,1	0,9525	3,0	0,4570
0,2	0,9096	4,0	0,3999
0,4	0,8362	5,0	0,3582
0,8	0,7266	10,0	0,2457
1,0	0,6848	$\infty$	$(a/l)\ln(l/a)$
1,5	0,6024		

в табл. 3.5 [59] – для трубопровода кольцевого сечения, образованного двумя коаксальными цилиндрами (см. рис. 3.4), в зависимости от отношения длины  $l$  трубопровода к разности диаметров цилиндров и отношения диаметров;

в табл. 3.6 [59] – для трубопровода (рис. 3.10), выполненного в виде конического диффузора, в зависимости от угла  $\beta$  отношения длины  $l$  к радиусу  $r$  входного сечения.

### 3.5. Значения коэффициента Клаузинга для трубопровода кольцевого сечения

$l$ $D_1 - D_2$	Значения $k$ при $D_1/D_2$					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
0,25	0,8017	0,8022	0,8030	0,8037	0,8043	0,8046
0,50	0,6737	0,6754	0,6738	0,6808	0,6829	0,6842
0,75	0,5842	0,5842	0,5915	0,5958	0,5997	0,6020
1,00	0,5175	0,5175	0,5266	0,5324	0,5378	0,5413
1,25	0,4655	0,4690	0,4758	0,4826	0,4894	0,4940
1,50	0,4237	0,4274	0,4348	0,4423	0,4502	0,4558
1,75	0,3893	0,3931	0,4007	0,4087	0,4174	0,4241
2,0	0,3604	0,3642	0,3720	0,3804	0,3896	0,3972
2,5	0,3123	0,3181	0,3260	0,3347	0,3448	0,3538
3,0	0,2791	0,2828	0,2906	0,2994	0,3100	0,3201
3,5	0,2513	0,2548	0,2625	0,2712	0,2820	0,2929
4,0	0,2286	0,2321	0,2395	0,2481	0,2589	0,2704
4,5	0,2099	0,2132	0,2204	0,2288	0,2396	0,2515
5,0	0,1941	0,1973	0,2042	0,2124	0,2230	0,2352



Окончание табл. 3.5

$\frac{l}{D_1 - D_2}$	Значения $k$ при $D_1/D_2$					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
7,5	0,1414	0,1440	0,1499	0,1569	0,1666	0,1792
12,5	0,0921	0,0941	0,0985	0,1038	0,1116	0,1230
25,0	0,0496	0,0508	0,0534	0,0567	0,0618	0,0700
50,0	0,0259	0,0265	0,0280	0,0299	0,0329	0,0381
100,0	0,0133	0,0136	0,0144	0,0154	0,0171	0,0200
250,0	0,0054	0,0055	0,0059	0,0063	0,0070	0,0083
500,0	0,0027	0,0028	0,0030	0,0032	0,0035	0,0042
5000,0	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004

### 3.6. Значения коэффициента Клаузинга для трубопровода, выполненного в виде конического диффузора

$2\beta, ^\circ$	Значение $k$ при $l/r$						
	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
0	0,9524	0,9092	0,8013	0,6720	0,5142	0,3105	0,1909
1	0,9541	0,9125	0,8089	0,6854	0,5360	0,3460	0,2368
5	0,9604	0,9248	0,8373	0,7357	0,6176	0,4786	0,4086
10	0,9673	0,9384	0,8686	0,7908	0,7058	0,6172	0,5803
20	0,9787	0,9603	0,9185	0,8764	0,8370	0,8056	0,7964
30	0,9869	0,9761	0,9534	0,9334	0,9177	0,9081	0,9061
40	0,9927	0,9870	0,9762	0,9681	0,9629	0,9605	0,9601
50	0,9964	0,9939	0,9895	0,9870	0,9857	0,9852	0,9851
60	0,9986	0,9977	0,9965	0,9959	0,9957	0,9956	0,9955
70	0,9996	0,9994	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9991
80	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
89	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Проводимость сложных трубопроводов, имеющих изгибы, повороты, вентили, определяют по приведенным выше уравнениям, по геометрическую длину  $l$  трубопровода увеличивают:

$$l_p = l + 1,33Dn, \quad (3.30)$$

где  $l_p$  и  $D$  — соответственно расчетная длина и диаметр трубопровода, м;  $n$  — число изгибов, поворотов, вентилей.

Проводимость трубопровода при течении по нему произвольного  $i$ -го газа определяют по формуле

$$U_i = U \sqrt{M / M_i},$$

где  $U$  — проводимость трубопровода при течении по нему воздуха;  $M_i$  и  $M$  — молекулярные массы соответственно рассматриваемого газа и воздуха.

Проводимость  $U_{T_1}$  трубопровода при температуре  $T_1$  газа, отличающейся от заданной температуры  $T_2$ :

$$U_{T_1} = U_{T_2} \sqrt{T_1 / T_2}.$$

где  $U_{T_2}$  — проводимость трубопровода при заданной температуре  $T_2$ .

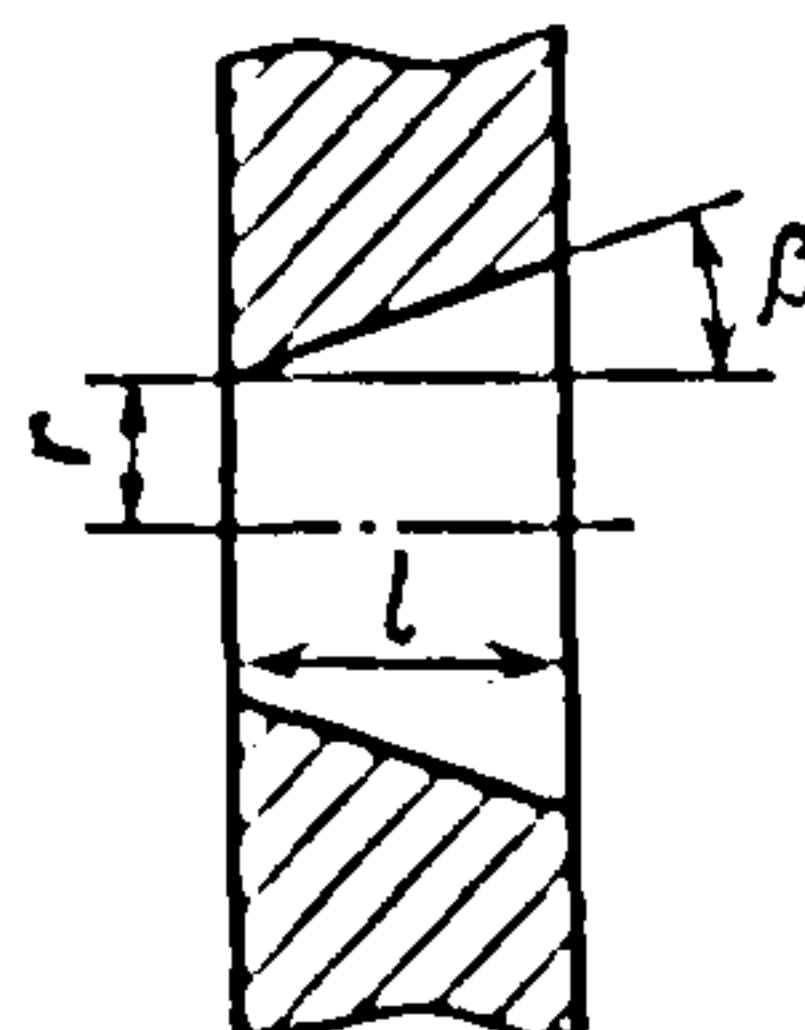


Рис. 3.10. Трубопровод в виде конического диффузора

### 3.6. ПЕРЕХОДНЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ

Течение газа в переходном режиме описывают в основном эмпирическими зависимостями для узких диапазонов чисел Кнудсена. Так, течение газа при  $Kn < 0,5$  описывают законом Пуазейля, введя коэффициент скольжения  $\chi_v$ , т.е. приняв, что скорость газа на поверхности, ограничивающей поток газа, в отличие от скорости при вязкостном режиме течения, равна

$$u_0 = \chi_v du/dz, \quad (3.31)$$

где  $du/dz$  – градиент скорости в направлении, перпендикулярном к течению газа.

Коэффициент скольжения  $\chi_v$ , имеющий единицу длины, можно представить как расстояние, на которое должна быть удалена поверхность, чтобы скорость потока на ней при  $du/dz = \text{const}$  равнялась нулю (на неподвижной поверхности) или скорости движения поверхности.

Для определения проводимости длинного цилиндрического трубопровода при  $0,01 < Kn < 0,33$  применяют эмпирическую зависимость, предложенную Кнудсеном:

$$U = U_v + ZU_m, \quad (3.32)$$

где  $U_v$  и  $U_m$  – проводимости при вязкостном и молекулярном режимах течения, определяемые по формулам соответственно (3.10) и (3.22);  $Z$  – эмпирический коэффициент.

$$Z = \frac{1 + D\bar{p}\sqrt{M/(RT)}/\eta}{1 + 1,24D\bar{p}\sqrt{M/(RT)}/\eta}; \quad (3.33)$$

для воздуха при  $T = 293$  К

$$Z = \frac{1 + 191D\bar{p}}{1 + 236D\bar{p}}, \quad (3.34)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $\bar{p}$  – среднее давление в трубопроводе, Па.

При  $\eta = \bar{\lambda}p\sqrt{2M/(\pi RT)}$  уравнение (3.33) принимает вид

$$Z = \frac{1 + 1,25D/\bar{\lambda}}{1 + 1,55D/\bar{\lambda}},$$

где  $\bar{\lambda}$  – средняя длина свободного пути молекул газа.

Уравнение (3.32) можно привести к виду

$$U = U_m(Z + U_v/U_m). \quad (3.35)$$

Для воздуха при  $T = 293$  К

$$U = 121(D^3/l)(Z + 0,0736D/\bar{\lambda}), \quad (3.36)$$

или

$$U = 121(D^3/l)J, \quad (3.37)$$

где

$$J = [1 + 202D\bar{p} + 2653(D\bar{p})^2]/(1 + 236D\bar{p}).$$

Значения  $J$  в зависимости от  $D\bar{p}$  приведены в табл. 3.7.

#### 3.7. Значение $J$ в зависимости от $D\bar{p}$

$D\bar{p}$	$J$	$D\bar{p}$	$J$
0,001	0,975	0,2	3,06
0,002	0,961	0,3	4,18
0,005	0,952	0,4	5,31
0,008	0,965	0,5	6,43
0,010	0,978	0,6	7,56
0,02	1,07	0,7	8,68
0,04	1,28	0,8	9,80
0,06	1,50	0,9	10,93
0,08	1,72	1,0	12,05
0,1	1,94	1,1	13,17

Примечание.  $D\bar{p}$  и  $J$  – в м·Па.

Для упрощения определения проводимости цилиндрического трубопровода в переходном режиме течения можно воспользоваться номограммой (рис. 3.11).

Например, для определения проводимости трубопровода длиной  $l = 1$  м и диа-



метром  $D = 0,5$  м, среднее давление в котором  $\bar{p} = 1,77$  Па, соединяют прямой линией точку  $l = 1$  м с точкой  $D = 0,5$  м. Точка пересечения прямой со шкалой проводимости дает  $U' = 14$  м<sup>3</sup>/с. Вторую прямую проводят через точку  $D = 0,5$  м и точку  $\bar{p} = 1,77$  Па; эта прямая пересекает ось поправочных коэффициентов в точке  $J = 9$ . Произведение найденных значений  $U'$  и  $J$  дает искомую проводимость трубопровода  $U = 14 \cdot 9 = 126$  м<sup>3</sup>/с.

При определении проводимости длинных трубопроводов, сечения которых отличаются от круглого, используют экспериментальные данные или оценивают проводимость по формулам (3.32)–(3.37), в которых условный диаметр  $D = \sqrt{4F/\pi}$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения трубопровода.

Приведенные зависимости для определения трубопроводов справедливы при переходном режиме течения во всем рассматриваемом трубопроводе.

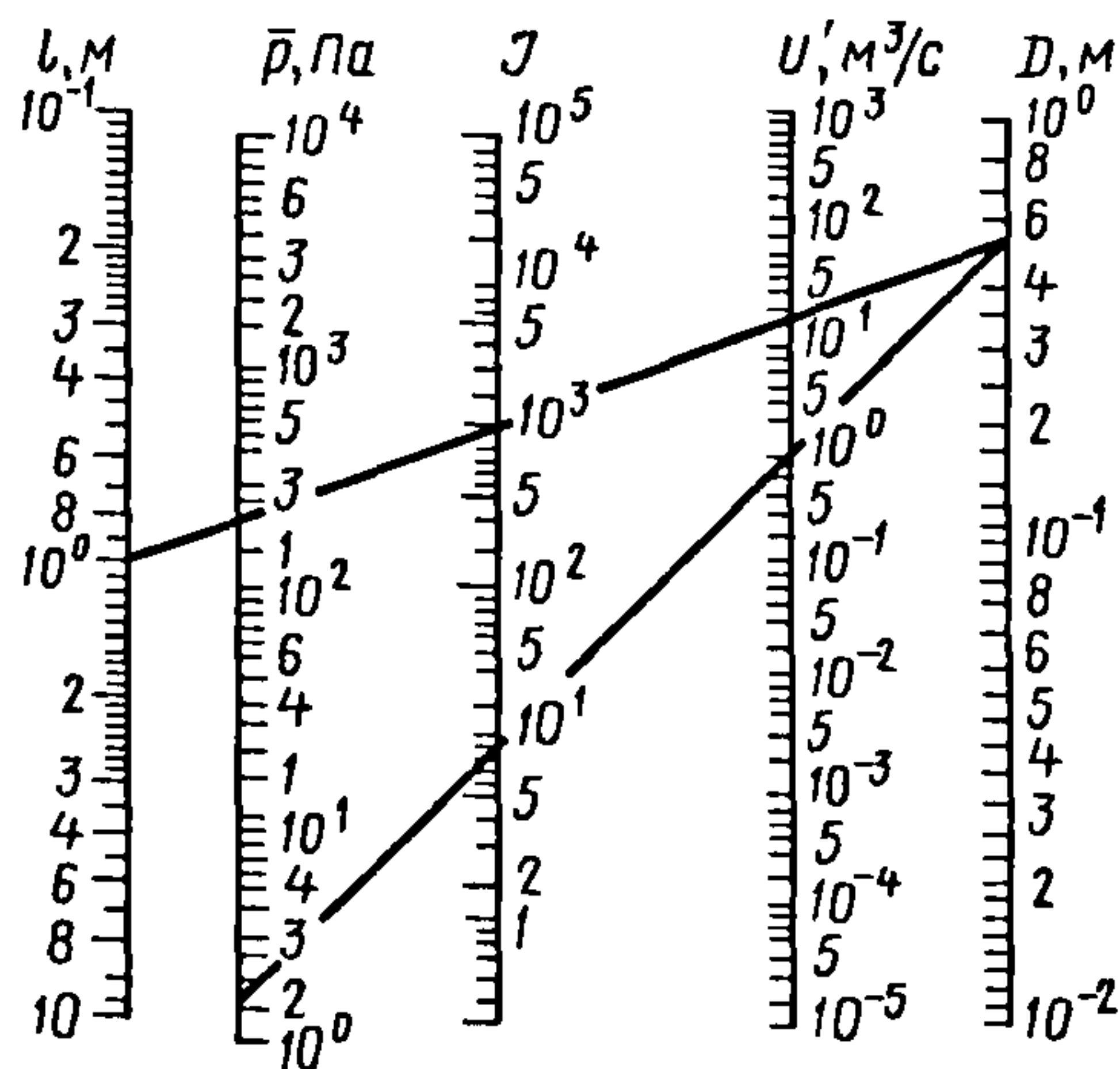


Рис. 3.11. Номограмма для расчета проводимости цилиндрических трубопроводов при различных режимах течения воздуха ( $T = 293$  К)

### 3.7. СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Статистический метод определения проводимости вакуумных систем, основанный на методе пробной частицы Монте-Карло, применяют преимущественно при молекулярном режиме течения. При статистическом моделировании течения газа в вакуумной системе для определения ее проводимости прослеживают большое число траекторий движения молекул от момента «старта» с сечения входа до момента возвращения к сечению входа или выхода либо до момента поглощения при наличии поглощающих поверхностей.

Для непоглощающей системы в молекулярном режиме течения определяют вероятность перехода молекул через вакуумную систему (коэффициент Клаузинга) в виде

$$P = N_1 / N, \quad (3.38)$$

где  $N_1$  – число молекул, попавших в выходное сечение;  $N$  – общее число рассматриваемых молекул.

При достаточно большом числе  $N$  частота событий  $P$  равна вероятности этого события, т.е. точность вычисления определяется числом  $N$ . Среднее квадратичное отклонение величины [59]

$$\sigma_p = \sqrt{P(1-P)/N}.$$

На рис. 3.12–3.14 показаны кривые вероятности  $P = k$  прохождения молекул через некоторые элементы вакуумных систем, полученные методом пробной частицы Монте-Карло.

Рассмотрим процесс вычисления вероятности  $P_1$  на примере двух коаксиальных цилиндров. Структурная схема расчета приведена на рис. 3.15.





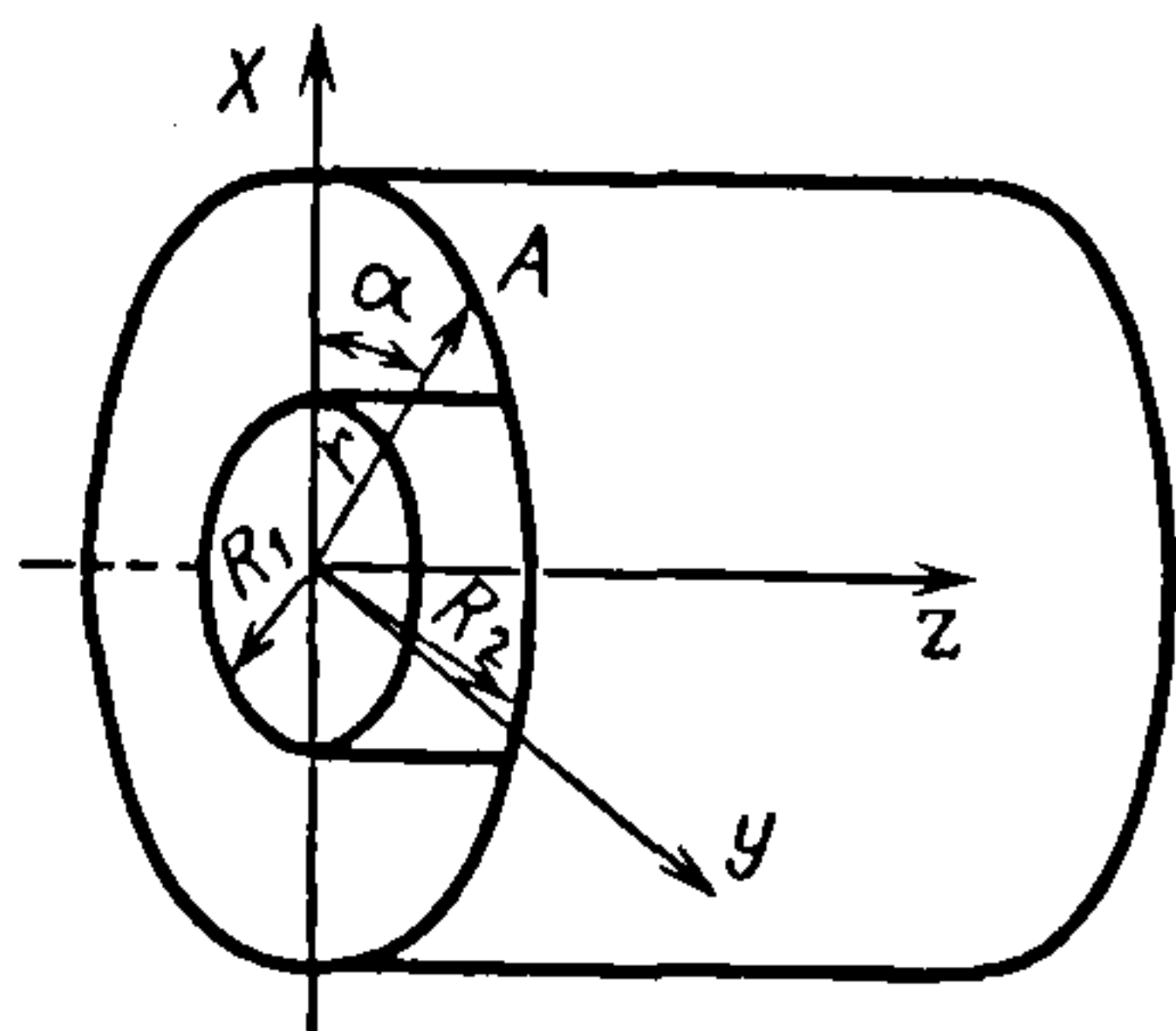


Рис. 3.16. Схема расчета траекторий молекул в цилиндрической системе координат

Задав исходные данные (блок 2), вычисляют координаты  $r$  и  $\alpha$  точки старта молекулы с поверхности входа (блок 3) с помощью датчика случайных чисел.

В цилиндрической системе координат (рис. 3.16) радиус  $r$  точки старта и угол  $\alpha$  между радиусом  $r$  и осью  $x$ :

$$r = (R_2 - R_1)\sqrt{\xi}; \quad \alpha = 2\pi\chi,$$

где  $R_2$  и  $R_1$  — радиусы соответственно внешнего и внутреннего цилиндров;  $\xi$  и  $\chi$  — непрерывные случайные числа, равномерно распределенные в интервале  $[0,1]$ , выдаваемые датчиком случайных чисел.

Направление траектории движения молекулы  $(x - x_0)/l = (y - y_0)/m = (z - z_0)/n$  задают углами  $\varphi$  и  $\alpha$  в сферической системе координат (рис. 3.17).

Здесь  $x, y, z$  — текущие координаты точки траектории молекулы;  $x_0, y_0, z_0$  — координаты точки старта;  $l, m, n$  — составляющие направляющего единичного вектора  $a$ ;  $\varphi$  — угол между нормалью к поверхности старта и вектором  $a$  (случайная величина, определяемая при условии диффузного отражения по формуле  $\varphi = \arcsin \sqrt{\eta}$ );  $\alpha_1 = 2\pi h$  — угол между осью  $0x'$  и проекцией вектора  $a$  на плоскость  $x'Oy'$  (равномерно распределенная случайная величина в интервале  $[0, 2\pi]$ );  $\eta$  и  $h$  — непрерывные случайные величины, равномерно распределенные в интервале  $[0, 1]$ .

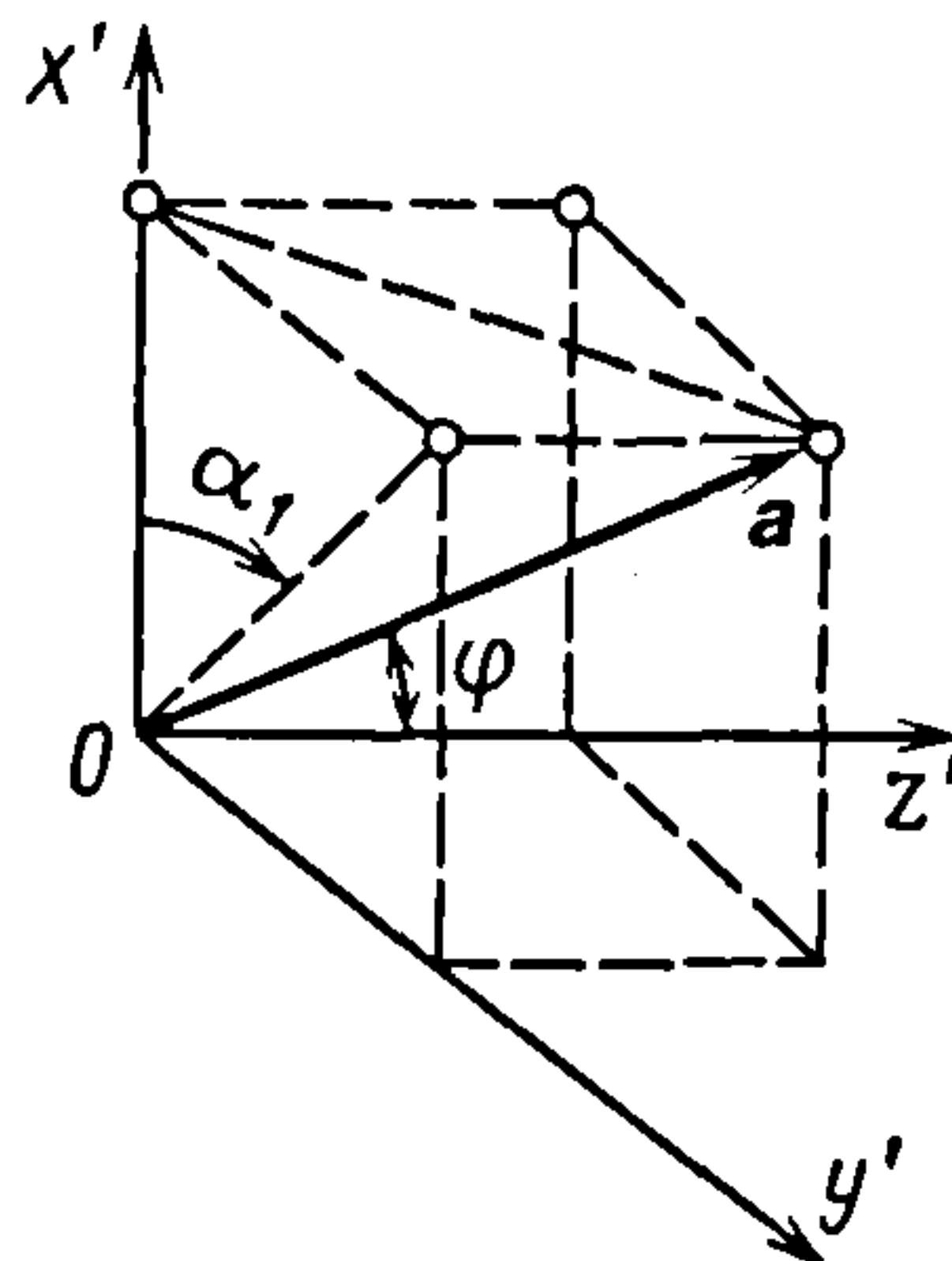


Рис. 3.17. Схема расчета траектории молекул в сферической системе координат

Проекции единичного вектора  $a$  на соответствующие оси координат при старте молекулы с сечения входа:

$$l = \eta \cos(2\pi h); \quad m = \eta \sin(2\pi h);$$

$$n = \sqrt{1 - \eta^2}.$$

В блоке 5 (см. рис. 3.15) вычисляют координаты столкновения молекулы с поверхностями внутреннего или внешнего цилиндра, решая совместно уравнение прямой и уравнения поверхностей цилиндров  $x^2 + y^2 = R_1^2$  и  $x^2 + y^2 = R_2^2$ .

В блоке 6 в зависимости от координат точки столкновения определяют, на какую поверхность попала молекула. При попадании молекулы на поверхность выхода ее движение считают законченным, т.е. к числам  $N_1$  и  $N$  добавляют по единице (блок 8) и сравнивают (блок 13) с заданным числом испытаний. Если  $N$  больше числа, определяющего точность расчета, то расчет заканчивают; если  $N$  меньше этого числа, то рассматривают движение следующей молекулы с момента старта (блок 3). При попадании молекулы на поверхности цилиндров снова определяют направление движения (блок 9) для молекулы, стартующей с поверхностей цилиндров, но в данном случае  $\alpha$  — это угол между нормалью к поверхности цилиндра в точке столкновения и направлением траектории.

В блоке 10 вычисляют координаты столкновения молекул с поверхностями цилиндров, как в блоке 5. В зависимости от координат столкновения молекула может попасть в сечение выхода (блок 8), в сечение входа (блок 12) и снова на поверхность цилиндров (блок 7). При попадании на поверхность цилиндров и сечение выхода процесс расчета ведут согласно рассмотренной процедуре. В случае попадания молекулы на поверхность входа (блок 12) движение молекулы также считают законченным. Прибавляют единицу к числу  $N$  и, считая, что молекула не прошла через элемент вакуумной системы, сравнивают (блок 13) число  $N$  с заданным. Определив вероятность  $P$  по формуле (3.38), вычисляют проводимость при  $P = k$ .

Иногда расчет вакуумной системы можно значительно упростить, используя графоаналитический метод моделирования на плоскости [53]. При сокращенном числе испытаний (до 150) погрешность этого метода не превышает  $\pm 10\%$ .

### 3.8. РАСЧЕТ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

В централизованных системах откачки одним насосом одновременно откачивается содержимое нескольких сосудов, подключенных к общему коллектору. Примером централизованной системы является подключение нескольких высоковакуумных насосов к одному форвакуумному. Расчетная схема централизованной системы откачки показана на рис. 3.18.

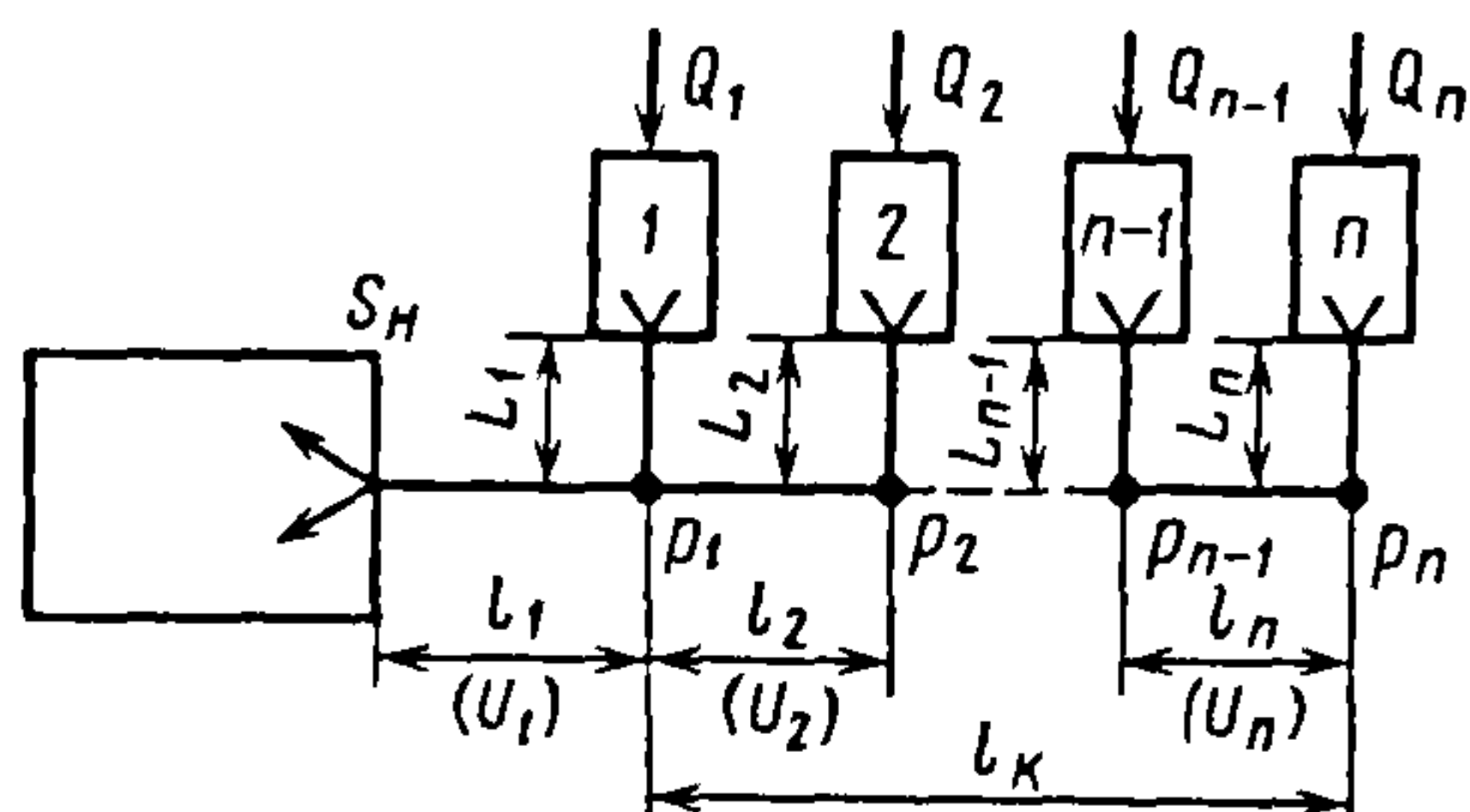


Рис. 3.18. Расчетная схема централизованной вакуумной системы

Вакуумный насос подключен трубопроводом длиной  $l_1$  (проводимость  $U_1$ ) к коллектору длиной  $l_k$ . Откачиваемые насосы с потоками газовыделений  $Q_1, \dots, Q_n$ , соединенные с коллектором трубопроводами длинами  $l_1, \dots, l_n$ , характеризуются заданными коэффициентами одновременности работы  $m$  и нестабильности рабочего давления  $q_1, \dots, q_n$ .

Для коллектора на участках между последовательно соединенными откачиваемыми насосами в установившемся режиме справедливы следующие уравнения газовых потоков:

$$\begin{aligned} m \sum_{i=2}^n Q_i q_i &= U_2 (p_2 - p_1); \\ m \sum_{i=3}^n Q_i q_i &= U_3 (p_3 - p_2); \\ &\vdots \\ m Q_n q_n &= U_n (p_n - p_{n-1}). \end{aligned}$$

Эту систему можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= p_1 + \frac{m}{U_2} \sum_{i=2}^n Q_i q_i; \\ p_3 &= p_1 + m \left( U_2^{-1} \sum_{i=2}^n Q_i q_i + U_3^{-1} \sum_{i=3}^n Q_i q_i \right); \\ &\vdots \\ p_n &= p_1 + m \left( U_2^{-1} \sum_{i=2}^n Q_i q_i + \dots + \frac{Q_n q_n}{U_n} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

При заданных размерах коллектора, определяющих проводимости  $U_2, \dots, U_n$ , потоках  $Q_2, \dots, Q_n$  и давлении в одной из точек подключения откачиваемых сосудов (обычно  $p_n$ ) из системы уравнений (3.39), можно определить давления во всех остальных сечениях коллектора, в том числе давление  $p_1$ . При централизованной откачке насосов давление  $p_n$  выбирают меньше максимального выпускного давления  $p_{в \max}$  высоковакуумного насоса.

Быстрота действия насоса

$$S_n = Q_c U_1 / (U_1 p_1 - Q_c),$$

где  $Q_c = m \sum_{i=1}^n Q_i q_i$  — суммарная производительность системы откачки;  $p_1$  — давление в сечении коллектора, соответствующем



подключению первого откачиваемого сосуда.

Диаметры соединительных трубопроводов длинами  $l_1, \dots, l_n$  определяются их проводимостями  $U'_i = Q_i / \Delta p_i$ , где  $\Delta p_i$  – заданный перепад давлений между коллектором и откачиваемыми сосудами.

### 3.9. ПРОЦЕСС ОТКАЧКИ ГАЗА ИЗ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

При расчетах вакуумных систем часто необходимо определять время выхода установки на режим, т.е. длительность откачки от начального давления до заданного, которое необходимо поддерживать в откачиваемом сосудах. При этом обычно возникает нестационарный режим течения, когда давление и скорость течения газа в каждой точке вакуумной системы непрерывно меняются. Для упрощения расчетов времени откачки рассматривают квазистационарный режим течения газа при следующих условиях: разности давлений на концах трубопровода, меньшей по сравнению со средним давлением в нем; режиме течения газа в трубопроводе, постоянном по времени.

Условия существования квазистационарного режима течения можно выразить в виде

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{VU}{S_0 Fl} \gg 1,$$

где  $t_1 = V/S_0$  и  $t_2 = Fl/U$  – постоянные времени соответственно откачиваемого сосуда и трубопровода;  $V$  – объем откачиваемого объекта,  $\text{м}^3$ ;  $U$  – проводимость трубопровода,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S_0$  – быстрота откачки объекта,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $l$  – длина трубопровода,  $\text{м}$ .

В реальных вакуумных системах последнее условие практически всегда выполняется; исключение составляет начальный период откачки от атмосферного давления. Продолжительность этого периода обычно весьма мала по сравнению с полным временем откачки, и процесс откачки можно рассматривать как квазистационарный, а проводимости трубопроводов – определять по известным формулам стационарного режима течения.

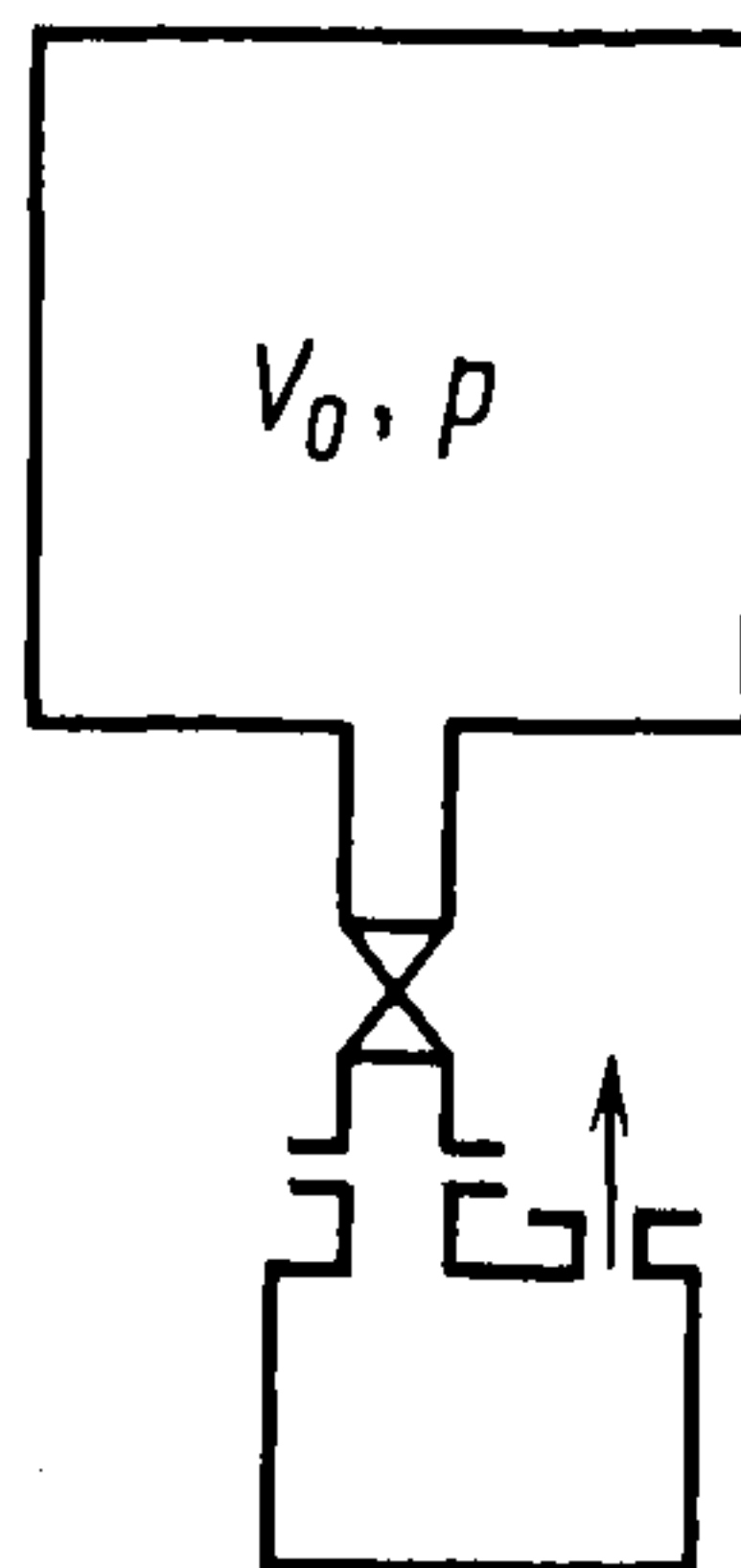


Рис. 3.19. Схема вакуумной системы

Кроме того, при небольшой продолжительности начального периода откачки можно принимать процесс вакуумирования объекта изотермическим.

Масса газа  $G$  в камере в начальный момент времени ( $t = 0$ ) перед откачкой

$$G = \frac{V_k}{RT_0} p \quad \text{или} \quad pV_0 = GRT_0,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_0$  – температура газа в камере,  $\text{К}$ .

За время  $dt$  из сосуда (рис. 3.19) объемом  $V_0$  откачивается количество газа  $S_0 p dt$ , т.е. поток  $S_0 p$ . За это же время в сосуд в результате газовой выделений стенок и натекания из окружающей среды попадает поток  $dQ_{г.н} = dQ_{г.в} + dQ_{н}$ , где  $Q_{г.в}$  и  $Q_{н}$  – потоки соответственно газовой выделений и натеканий извне. При давлении  $p$  поток  $dQ_{г.н}$  соответствует объему  $dQ_{г.н}/p$ , поступающему извне в объект в единицу времени.

Изменение количества газа в объекте за время  $dt$

$$-V_0 dp = S_0 p dt - Q_{г.н} dt. \quad (3.40)$$

Время откачки от давления  $p'_0$  до  $p''_0$

$$t = - \int_{p''_0}^{p'_0} \frac{V_0}{S_0 p - Q_{г.н}} dp. \quad (3.41)$$

В простейшем случае, при отсутствии газовой выделений и натеканий,  $Q_{г.н} = 0$ , и постоянстве быстроты откачки  $S_0 = \text{const}$ , время откачки камеры

$$t = \frac{V_0}{S_0} \ln \frac{p'_0}{p''_0}. \quad (3.42)$$

При  $Q_{г.н} = \text{const}$  и  $S_0 = \text{const}$

$$t = \frac{V_0}{S_0} \ln \frac{p' - Q_{г.н}/S_0}{p'' - Q_{г.н}/S_0}, \quad (3.43)$$

где  $p'$  и  $p''$  — начальное и конечное давления в откачиваемом сосуде.

Уравнения (3.40)–(3.43) позволяют определить и требуемую быстроту действия вакуумного насоса для достижения давления  $p''$  за время  $t$ . Например, при отсутствии газовыделений и натеканий ( $Q_{г.н} = 0$ ), и постоянстве быстроты откачки ( $S_0 = \text{const}$ )

$$S_0 = \frac{V_0}{t} \ln \frac{p'}{p''}.$$

Для этих же условий давление в откачиваемом объекте через время  $t$

$$p'' = \frac{p'}{\exp\left(\frac{tS_0}{V_0}\right)}.$$

В случае  $Q_{г.н} = \text{const}$  и  $S_0 = \text{const}$  давление в откачиваемом объекте через время  $t$

$$p'' = \frac{p' - Q_{г.н}/S_0}{\exp\left(\frac{tS_0}{V_0}\right)} + Q_{г.н}/S_0.$$

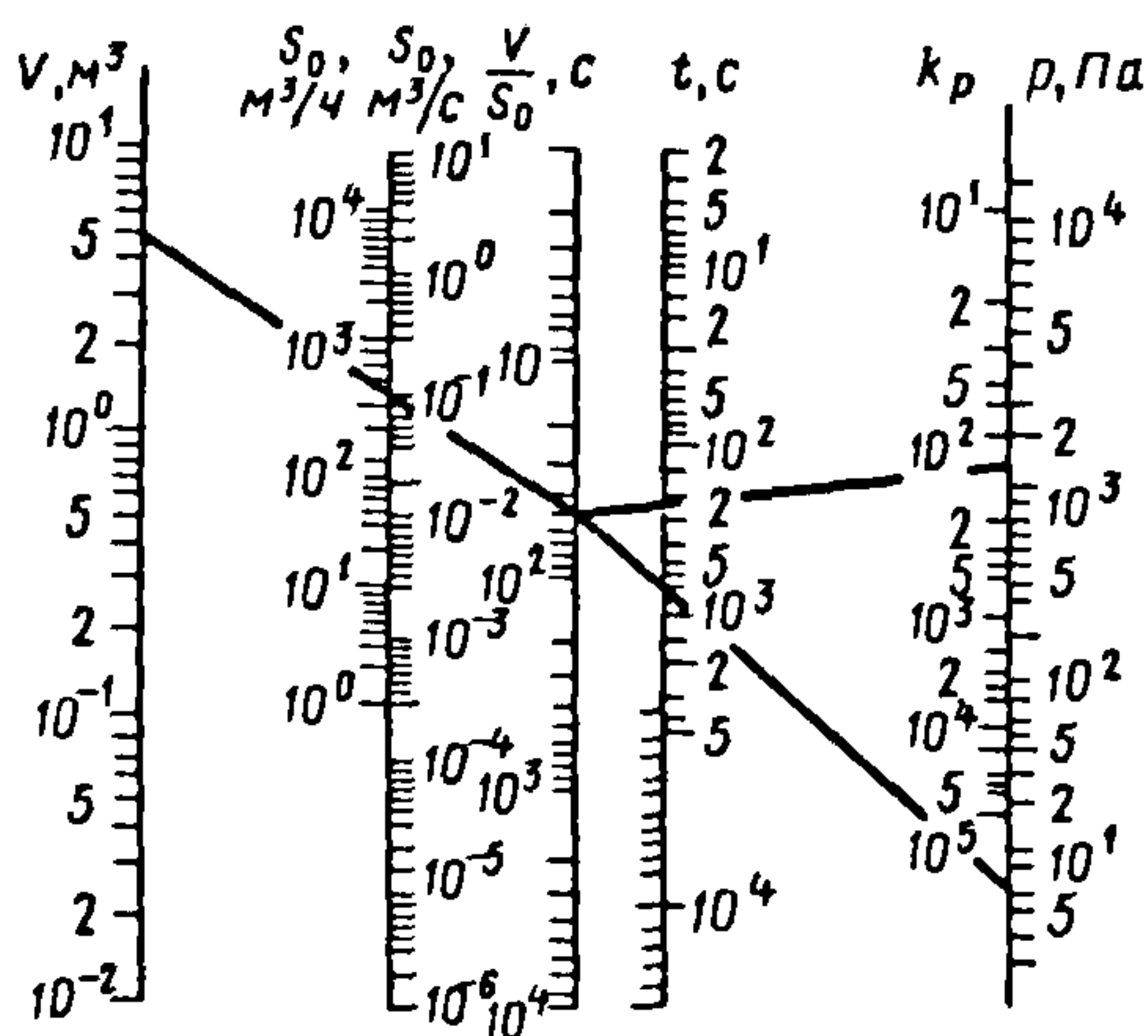


Рис. 3.20. Номограмма для определения времени откачки объекта в зависимости от конечного давления

При определении времени откачки объекта вакуумным насосом с зависимостью  $S_0 = f(p)$ , зависимость  $S_0 = f(p)$  необходимо разделить на участки, на которых можно считать  $S_0 = \text{const}$  или описать зависимость  $S_0 = f(p)$  аналитическим выражением.

Определив время  $t_i$  для каждого участка, из уравнения (3.42) или (3.43) можно найти полное время откачки, равное сумме  $t_i$ .

Для определения времени откачки объекта от атмосферного до требуемого давления при любом режиме течения газа вместо уравнения (3.43) можно использовать номограмму (рис. 3.20).

Например, для определения времени  $t$  откачки сосуда объемом  $V = 5 \text{ м}^3$  насосом, обеспечивающим быстроту откачки  $S_0 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$  до давления  $p = 6,7 \text{ Па}$ , точку  $V = 5 \text{ м}^3$  соединяют с точкой  $S_0 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$  прямой линией. Продлив эту линию до шкалы  $V/S_0$ , соединяют полученную точку с точкой  $p = 6,7 \text{ Па}$ . Пересечение этой новой прямой со шкалой  $t$  дает время  $t = 700 \text{ с}$ , необходимое для откачки сосуда до заданного давления  $p$ .

Для определения времени откачки, например того же сосуда от давления  $p' = 6,7 \text{ Па}$  до давления  $p'' = 6,7 \cdot 10^2 \text{ Па}$  тем же насосом ( $S_0 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ), точку, найденную на шкале  $V/S_0$ , соединяют с точкой на шкале  $k_p = p'/p'' = 100$  прямой линией, пересечение которой со шкалой  $t$  дает время  $t = 230 \text{ с}$ .

При длительной откачке давление в сосуде постоянно и равно предельному давлению  $p_{пр}$  — наименьшему давлению, достигаемому в сосуде с постоянным потоком газа  $Q'_{г.н} = Q_{г.в} + Q_{н} = p_{пр} S_0$ .



### 3.10. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРОВОДИМОСТИ СЛОЖНОГО ТРУБОПРОВОДА

Исходные данные. Трубопровод (рис. 3.21), соединяющий откачиваемый сосуд 1 с вакуумным насосом 6, состоит из цилиндрического трубопровода 2 круглого сечения длиной  $l_2 = 1$  м и диаметром  $D_2 = 0,5$  м, переходника 3, длиной  $l_3 = 0,23$  м и диаметром  $D_3 = 0,38$  м, прямого вакуумного затвора 4 ( $D_4 = 0,38$  мм) длиной  $l_4 = 0,38$  м и диаметром  $D_4 = 0,38$  м, колена 5 со сторонами  $l'_5 = 0,58$  м и  $l''_5 = 0,38$  м и диаметром  $D_5 = 0,5$  м. Определяющий размер откачиваемого сосуда  $D_1 = 10$  м, быстрота действия вакуумного насоса  $S_n = 5$  м<sup>3</sup>/с при давлении во входном патрубке  $p_1 = 10^{-3}$  Па. Откачиваемый газ – воздух при температуре 293 К. Определить быстроту откачки  $S_0$  сосуда, давление  $p_1$  в нем и проводимость трубопровода.

Решение 1. Молекулярный режим течения.

Для определения режима течения в колене 5 трубопровода рассчитаем число Киудсена:

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{D_5} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{p_6 D_5} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{10^{-3} \cdot 0,5} = 9,4,$$

так как  $Kn > 0,33$ , режим в колене трубопровода молекулярный.

Проводимость колена трубопровода

$$U_6 = 116k_5F_5 = 116 \cdot 0,370 \cdot 0,196 = 8,427 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $k_5 = 0,370$  (см. рис. 3.13) при  $l'_5/R_5 = 2,32$  и  $l''_5/R_5 = 1,52$ ;

$$F_5 = \frac{\pi D_5^2}{4} = 0,196 \text{ м}^2.$$

Из соотношения  $Q = S_n p_6 = U_5(p_5 - p_6)$  давление  $p_5$  на входе в колено трубопровода

$$p_5 = \frac{p_6(S_n + U_5)}{U_5} = \frac{10^{-3}(5 + 8,427)}{8,427} = 1,593 \cdot 10^{-3} \text{ Па}.$$

Проверим режим течения в колене 5 и вакуумном затворе 4:

$$Kn = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{p_5 D_4} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{10^{-3} \cdot 1,593 \cdot 0,38} = 7,76 > 0,33.$$

Проводимость вакуумного затвора

$$U_4 = 116k_4F_4 = 116 \cdot 0,514 \cdot 0,113 = 6,762 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $k_4 = 0,514$  при  $l_4/D_4 = 1$ ;

$$F_4 = \frac{\pi D_4^2}{4} = 0,113 \text{ м}^2.$$

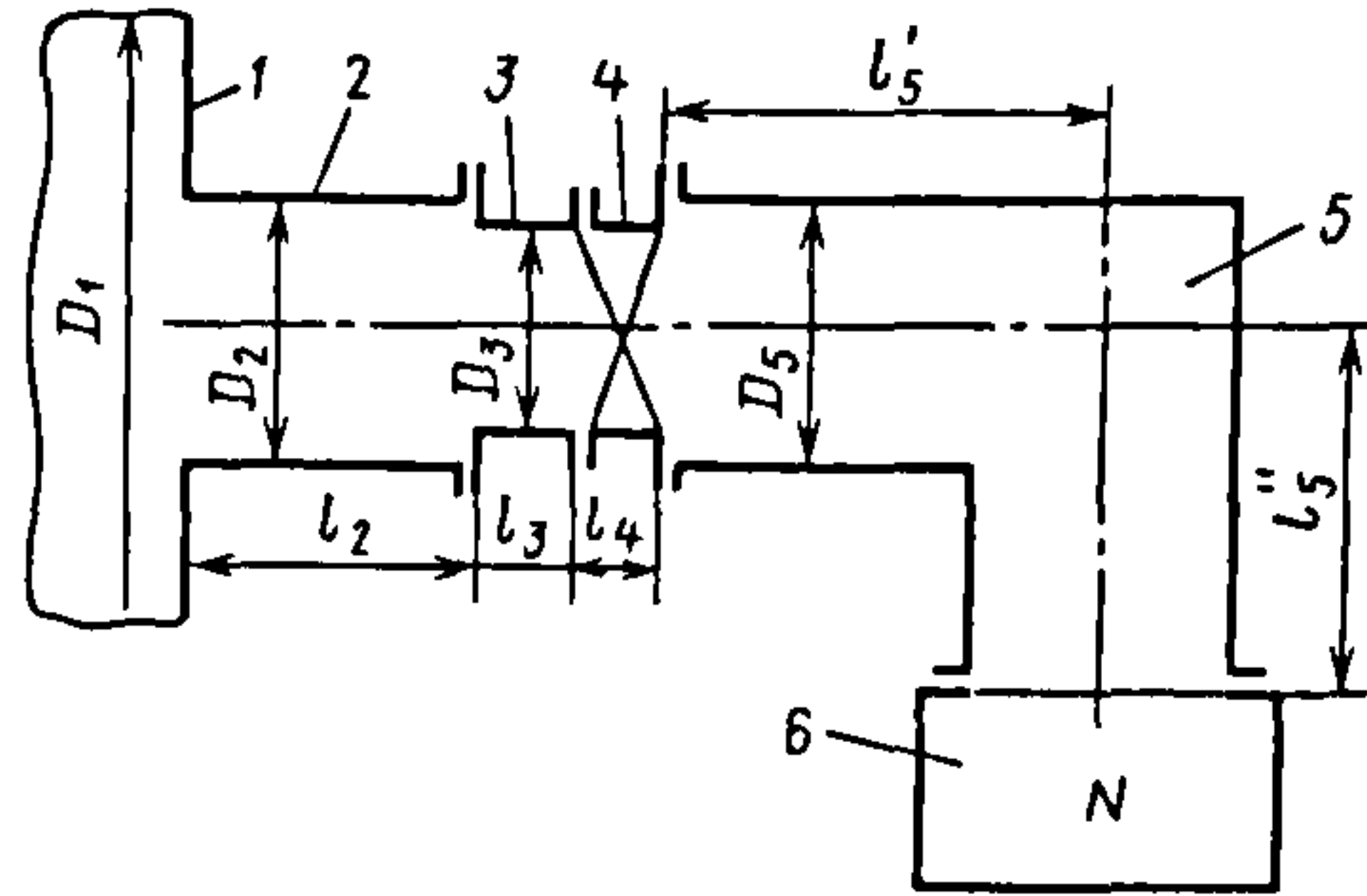


Рис. 3.21 Схема к расчету проводимости трубопровода

Из соотношения  $Q = U_{45}(p_4 - p_6)$  давление  $p_5$  на входе в элемент 4

$$p_4 = p_6 + \frac{Q}{U_{45}} = 10^{-3} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{4,51} = 2,21 \cdot 10^{-3} \text{ Па},$$

где  $U_{45}$  – проводимость элементов 4 и 5.

Проводимость входа в элемент 5:

$$U_{\text{вх } 5} = 116F_5 = 116 \cdot 0,196 = 22,736 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{45} = \left( \frac{1}{6,762} + \frac{1}{8,427} + \frac{1}{22,736} \right)^{-1} = 4,51 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверим режим течения в вакуумном затворе 4 и переходнике 3:

$$Kn = 4,7 \frac{10^{-3}}{0,38 p_4} = 5/6 > 0,33.$$

Так как вход в переходник 3 из цилиндрического трубопровода 2 необходимо рассматривать как большую диаграмму ( $D_2/D_3 = 1,316$ ), определим проводимость переходника 3 с учетом влияния изменения площади сечения по формулам (3.29) и (3.20):

$$U_3 = 116k_3F_3 \frac{F_2}{F_2 - F_3} = 116 \cdot 0,632 \cdot 0,113 \frac{0,196}{0,196 - 0,113} = 19,563 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $k_3 = 0,632$  при  $l_3/D_3 = 0,605$ ;

$$F_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} = 0,113 \text{ м}^2.$$

$$F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 0,196 \text{ м}^2.$$

Давление на входе в переходник 3

$$p_3 = p_6 + \frac{Q}{U_{35}} = 10^{-3} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5,07} = 1,99 \cdot 10^{-3} \text{ Па},$$

где  $U_{35}$  – проводимость элементов 3, 4, 5.

Проводимость входа в элемент 4

$$U_{\text{вх } 4} = 116F_4 = 116 \cdot 0,113 = 13,108 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$U_{35} = \left( \frac{1}{U_4} + \frac{1}{U_5} + \frac{1}{U_3} - \frac{1}{U_{\text{вх } 3}} - \frac{1}{U_{\text{вх } 4}} \right) =$$

$$= \left( \frac{1}{19,563} + \frac{1}{6,762} + \frac{1}{8,427} - \frac{1}{13,108} - \frac{1}{22,736} \right) =$$

$$= 5,07 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверим режим течения на выходе из цилиндрического участка трубопровода 2:

$$\text{Kn} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{p_3 D_2} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 1,99} = 4,72 > 0,33.$$

Поскольку  $D_1/D_2 = 20$ , вход в цилиндрический участок рассматриваем как малую диафрагму; проводимость

$$U_2 = 116k_2 F_2 = 116 \cdot 0,359 \cdot 0,196 = 8,162 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $k_2 = 0,359$  при  $l_2/D_2 = 2,0$ .

Давление в откачиваемом сосуде

$$p_1 = p_2 = p_6 + \frac{Q}{U_{25}} = 10^{-3} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{3,67} =$$

$$= 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ Па},$$

где  $U_{25}$  — проводимость элементов 2, 3, 4, 5.

Проводимость входа в элемент 3

$$U_{\text{вх } 3} = 116F_3 = 116 \cdot 0,113 = 13,108 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{35} = \left( \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_4} + \frac{1}{U_5} - \frac{1}{U_{\text{вх } 3}} - \frac{1}{U_{\text{вх } 4}} - \frac{1}{U_{\text{вх } 5}} \right) =$$

$$= \left( \frac{1}{8,162} + \frac{1}{19,563} + \frac{1}{6,762} + \frac{1}{8,427} - \frac{1}{13,108} - \frac{1}{22,736} - \frac{1}{13,108} \right) = 3,67 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверим режим течения в цилиндрическом участке

$$\text{Kn} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 1,36} = 6,91 > 0,33.$$

Так как режим течения молекулярный, быстрота откачки сосуда  $I$

$$S_0 = \frac{Q}{p_1} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,36 \cdot 10^{-3}} = 3,68 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость всего трубопровода

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_6} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,36 \cdot 10^{-3} - 10^{-3}} = 13,89 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Решение 2. Вязкостный режим течения (давление всасывания насоса  $p_5 = 1,5 \text{ Па}$ ).

Проверим режим течения в колене 3.

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{D_3} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{p_6 D_3} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 0,5} =$$

$$= 6,267 \cdot 10^{-3} < 0,001,$$

т.е. режим течения вязкостный. Так как давление в остальных частях трубопровода выше, а для вакуумного затвора 4 и переходника 3 с наименьшими диаметрами  $D_3 = D_4 = 0,38 \text{ м}$  вязкостный режим начинается с давления

$$p_3 = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{\text{Kn} D_3} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{10^{-2} \cdot 0,38} = 1,237 \text{ Па},$$

то в остальных частях трубопровода наблюдается вязкостный режим течения.

Приняв поток газа  $Q$  постоянным во всем трубопроводе, из уравнения потока  $Q = U_5(p_5 - p_6)$  и уравнения (3.15) определим давление на входе в колено 5:

$$p_5 = \sqrt{p_6^2 + \frac{l_p Q + 0,03 Q^2}{680 D_5^4}} =$$

$$= \sqrt{1,5^2 + \frac{1,625 \cdot 7,5 + 0,03 \cdot 7,5^2}{680 \cdot 0,5^4}} = 1,605 \text{ Па},$$

где  $Q = S_n p_6 = 7,5 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ ;  $l_p = l'_5 + l''_5 + 1,33 D_5 = 1,625 \text{ м}$  [см. (3.43)].

Проводимость колена 5  $U_5 = Q/(p_5 - p_6) = 7,5/0,105 = 71,33 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Давление на входе в вакуумный затвор 4 определим, заменив его, как выше, эквивалентной трубкой:

$$p_4 = \sqrt{p_5^2 + \frac{l_4 Q + 0,03 Q^2}{680 D_4^4}} =$$

$$= \sqrt{1,605^2 + \frac{0,38 \cdot 7,5 + 0,03 \cdot 7,5^2}{680 \cdot 0,38^4}} = 1,702 \text{ Па}.$$

Проводимость затвора 4

$$U_4 = Q/(p_4 - p_5) = 7,5/0,097 = 7,32 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Давление  $p'_3$  на входе в переходник 3 определим без учета влияния изменения площади входа от  $F_1$  до  $F_2$  из уравнения (3.11) и уравнения потока:

$$p'_3 = \sqrt{p_4^2 + \frac{l_3 Q}{680 D_3^4}} = \sqrt{1,702^2 + \frac{0,23 \cdot 7,5}{680 \cdot 0,38^4}} =$$

$$= 1,737 \text{ Па}.$$

Проводимость переходника 3  $U_3 = Q/(p'_3 - p_4) = 7,5/0,035 = 214,3 \text{ м}^3/\text{с}$ .



Давление  $p_3$  на входе в переходник рассчитываем с учетом влияния диафрагмы, которой является вход, совместным решением уравнений (3.9), введя коэффициент  $\frac{F_3}{F_2 - F_3}$ ,

и уравнения потока при  $\tau = \frac{p_3'}{p_3} > 0,528$ :

$$\frac{Q}{p_3 - p_3'} = F_3 \frac{766\tau}{1-\tau} \sqrt{1-\tau^{0,286}} \cdot \frac{F_3}{F_2 - F_3},$$

где  $F_2 = 0,196 \text{ м}^2$ ;  $F_3 = 0,113 \text{ м}^2$ .

Решив уравнение

$$\frac{(F_2 - F_3)Q}{F_2 \cdot 766 p_3' F_3} = \tau^{-0,286} \sqrt{1-\tau^{0,286}}$$

методом последовательных приближений, получим  $\tau = 0,999$  и  $p_3 = 1,739 \text{ Па}$ . Перепад давлений  $p_3 - p_3'$  очень мал, поэтому влиянием большой диафрагмы пренебрегаем.

Давление  $p_1 = p_2$  в сосуде 1

$$p_1 = \sqrt{p_3^2 + \frac{l_2 Q + 0,03 Q^2}{680 D_2^4}} =$$

$$= \sqrt{1,73 + \frac{1 \cdot 7,5 + 0,03 \cdot 7,5^2}{680 \cdot 0,5^4}}.$$

Проводимость цилиндрического трубопровода 2

$$U_2 = \frac{Q}{p_2 - p_3} = \frac{7,5}{0,061} = 122,95 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Быстрота откачки

$$S_0 = \frac{Q}{p_1} = \frac{7,5}{1,8} = 4,167 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость всего трубопровода

$$U_2 = \frac{Q}{p_1 - p_6} = \frac{7,5}{0,3} = 25 \text{ м}^3/\text{с}.$$

### 3.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Проводимость элементов вакуумных систем (вентилей, затворов, участков трубопроводов) и систем в целом, а также распределение молекул по поверхности вакуумной системы или отдельных ее участков можно рассчитать с помощью угловых коэффициентов, используемых для определения теплообмена излучением.

В общем случае элементарную площадь  $dF_i$  поверхности  $F_i$  вакуумной системы покидает поток молекул, плотность которого

$$q_i = q_{0i} + (1-\alpha)q_i', \quad (3.44)$$

где  $q_{0i}$  — плотность потока молекул, испускаемых площадью  $dF_i$  (например, в результате газовой выделенности поверхности);  $\alpha$  — коэффициент поглощения молекул газа поверхностью  $dF_i$ ;  $q_i'$  — плотность потока молекул, падающих на площадь  $dF_i$ .

На элементарную площадь  $dF_i$  падает поток молекул со всех поверхностей вакуумной системы, видимых из центра площади и образующих замкнутую систему. Полная плотность падающего потока

$$q_i' dF_i = \int_{\Sigma F_j} q_j d\phi_{dF_j-dF_i} dF_j, \quad (3.45)$$

где  $q_j$  — плотность потока молекул, покидающих поверхность  $dF_j$  [см. выражение (3.44)];  $d\phi_{dF_j-dF_i}$  — вероятность попадания молекул газа с элементарной площади  $dF_j$  поверхности  $F_j$  на площадь  $dF_i$  поверхности  $F_i$ .

Вероятность  $d\phi_{dF_j-dF_i}$  зависит от закона отражения частиц поверхностью и взаимной ориентации площадок.

При диффузном отражении

$$d\phi_{dF_j-dF_i} = (d\omega_{ji} / \pi) \cos \zeta_j, \quad (3.46)$$

где  $d\omega_{ji}$  — телесный угол с вершиной в центре площади  $dF_j$ ;  $\zeta_j$  — угол между нормалью к площади  $dF_j$  и линией, соединяющей центры площадей  $dF_j$  и  $F_i$ .

Величина  $d\phi_{dF_j-dF_i}$  называется дифференциальным, или элементарным, угловым коэффициентом и представляет собой выражение диффузного закона отражения.

С учетом  $d\omega_{ji} = \frac{dF_i}{r^2} \cos \zeta_i$  можно за-

писать

$$d\phi_{dF_j-dF_i} = \frac{\cos \zeta_j \cos \zeta_i}{\pi r^2} dF_i, \quad (3.47)$$

где  $\zeta_j$  – угол между нормалью к площади  $dF_i$  и линией, соединяющей центры площадей  $dF_j$  и  $dF_i$ ;  $r$  – расстояние между центрами площадей  $dF_j$  и  $dF_i$ .

Вероятность  $d\varphi_{dF_j-dF_i}$  попадания молекул газа с элементарной площади  $dF_j$  на всю поверхность площадью  $F_i$  называют *локальным угловым коэффициентом*

$$d\varphi_{dF_j-F_i} = \int_{F_i} d\varphi_{dF_j-dF_i} = \int_{F_i} \frac{\cos \zeta_j \cos \zeta_i}{\pi r^2} dF_i. \quad (3.48)$$

Вероятность  $\varphi_{F_j-F_i}$  попадания молекул газа с поверхности площадью  $F_j$  на поверхность  $F_i$  при постоянстве  $q_j$  по всей поверхности именуют *средним угловым коэффициентом*:

$$\varphi_{F_j-F_i} = \frac{1}{F_j} \int_{F_j} dF_j \int_{F_i} \frac{\cos \zeta_j \cos \zeta_i}{\pi r^2} dF_i. \quad (3.49)$$

Если рассматривать вероятность попадания молекул газа с элементарной площади  $dF_i$  на площадку  $dF_j$ , то дифференциальный угловой коэффициент

$$d\varphi_{dF_i-dF_j} = \frac{d\omega_{ij}}{\pi} \cos \zeta_i = \frac{\cos \zeta_j \cos \zeta_i}{\pi r^2} dF_i. \quad (3.50)$$

Сравнив уравнения (3.49) и (3.47), можно записать

$$d\varphi_{dF_i-dF_j} dF_i = d\varphi_{dF_j-dF_i} dF_j. \quad (3.51)$$

Это соотношение называют *свойством взаимности дифференциальных угловых коэффициентов*. Для локальных и средних угловых коэффициентов это свойство соответственно имеет вид

$$\begin{aligned} d\varphi_{dF_i-F_j} dF_i &= d\varphi_{F_j-dF_i} F_j; \\ \varphi_{F_i-F_j} F_i &= \varphi_{F_j-F_i} F_j. \end{aligned}$$

Свойство аддитивности угловых коэффициентов заключается в том, что угловой коэффициент  $\varphi_{F_i-F_j}$  между поверхностями  $F_i$  и  $F_j$  равен сумме коэффициентов  $\varphi_{F_i-F_{jn}}$  между поверхностью  $F_i$

и всеми частями  $\sum F_{jn}$  поверхности  $F_j$ , из которых она состоит  $\left( F_j = \sum_{n=1}^k F_{jn} \right)$ :

$$\varphi_{F_i-F_j} = \sum_{n=1}^k \varphi_{F_i-F_{jn}}.$$

Кроме того, сумма всех угловых коэффициентов между поверхностью  $F_i$  и всеми  $n$  поверхностями, образующими замкнутую систему, равна единице:

$$\sum_{n=1}^k \varphi_{F_i-F_{jn}} = 1.$$

Расчетные зависимости угловых коэффициентов для поверхностей наиболее распространенных геометрических конфигураций, описывающих вакуумные системы, представлены в табл. 3.8 [59].

Уравнение (3.44) при учете уравнений (3.42), (3.47), (3.51) позволяет определить основные коэффициенты, описывающие взаимодействие потоков молекул с поверхностями системы.

Плотность потока молекул, покидающих поверхность  $dF_i$ ,

$$q_i = q_{0i} + (1 - \alpha_i) \int_{\sum F_j} q_j d\varphi_{dF_i-dF_j}. \quad (3.52)$$

Распределение плотности молекул, падающих на поверхность, можно определить из уравнения (3.45) с учетом (3.44), (3.47), (3.51):

$$\begin{aligned} q'_i &= \int_{\sum F_j} q_0 d\varphi_{dF_i-dF_j} + \\ &+ \int_{\sum F_j} (1 - \alpha_i) q'_i d\varphi_{dF_i-dF_j}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Плотность потока молекул газа, поглощаемых поверхностью,

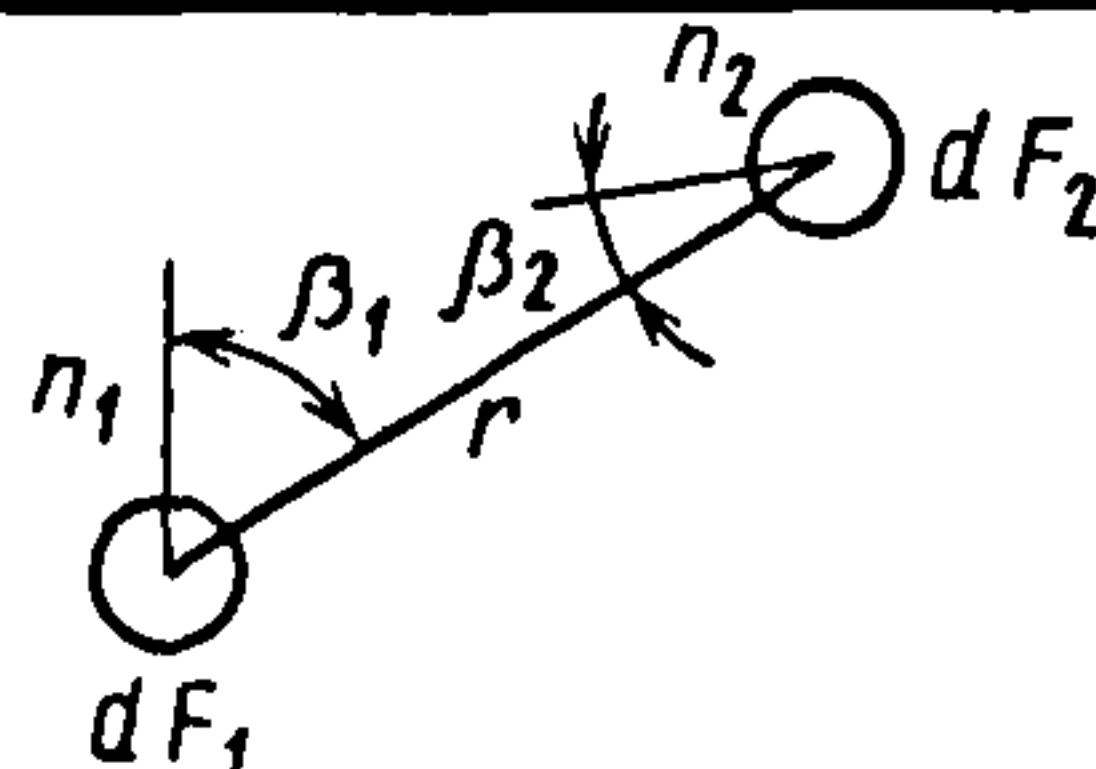
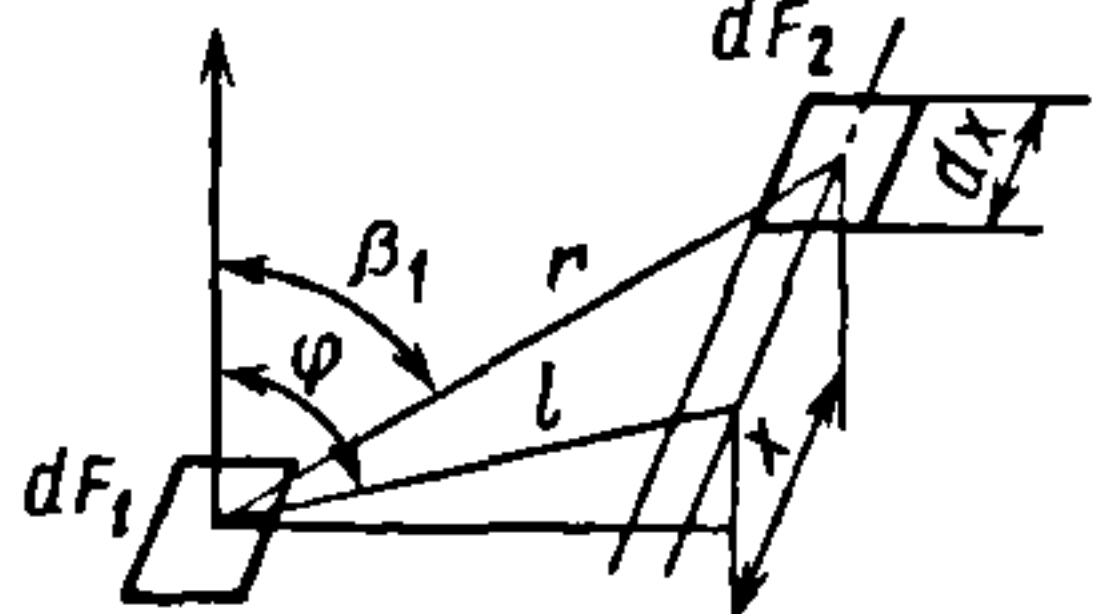
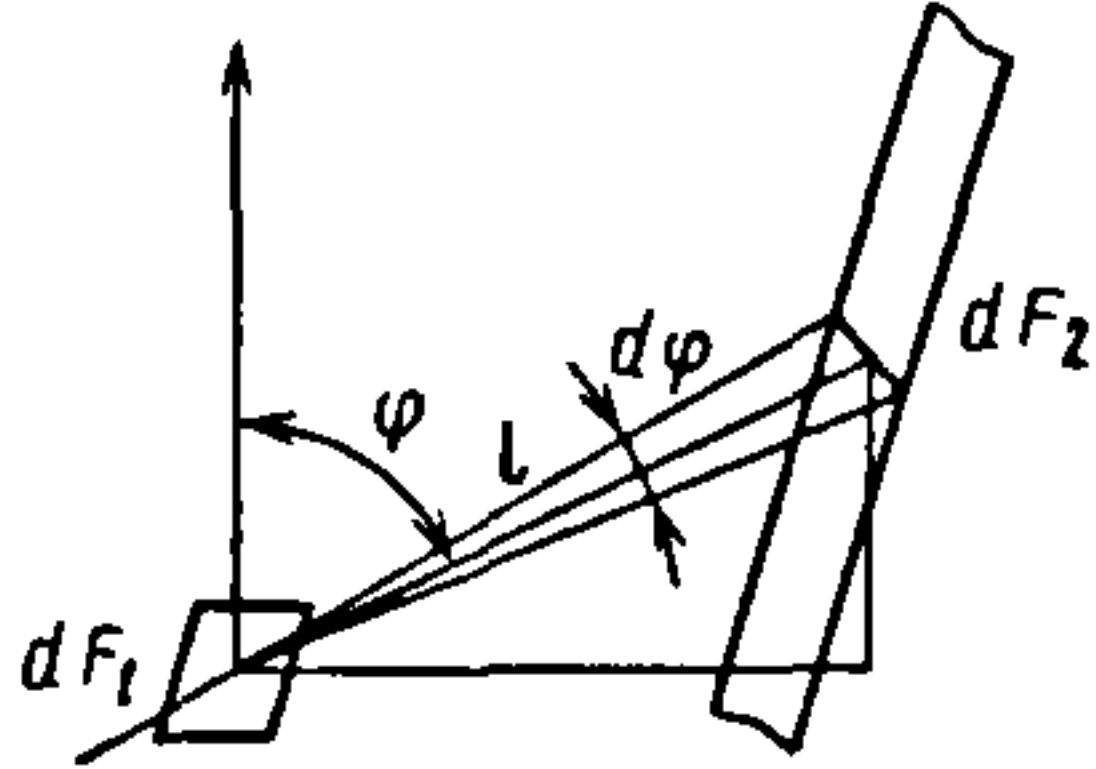
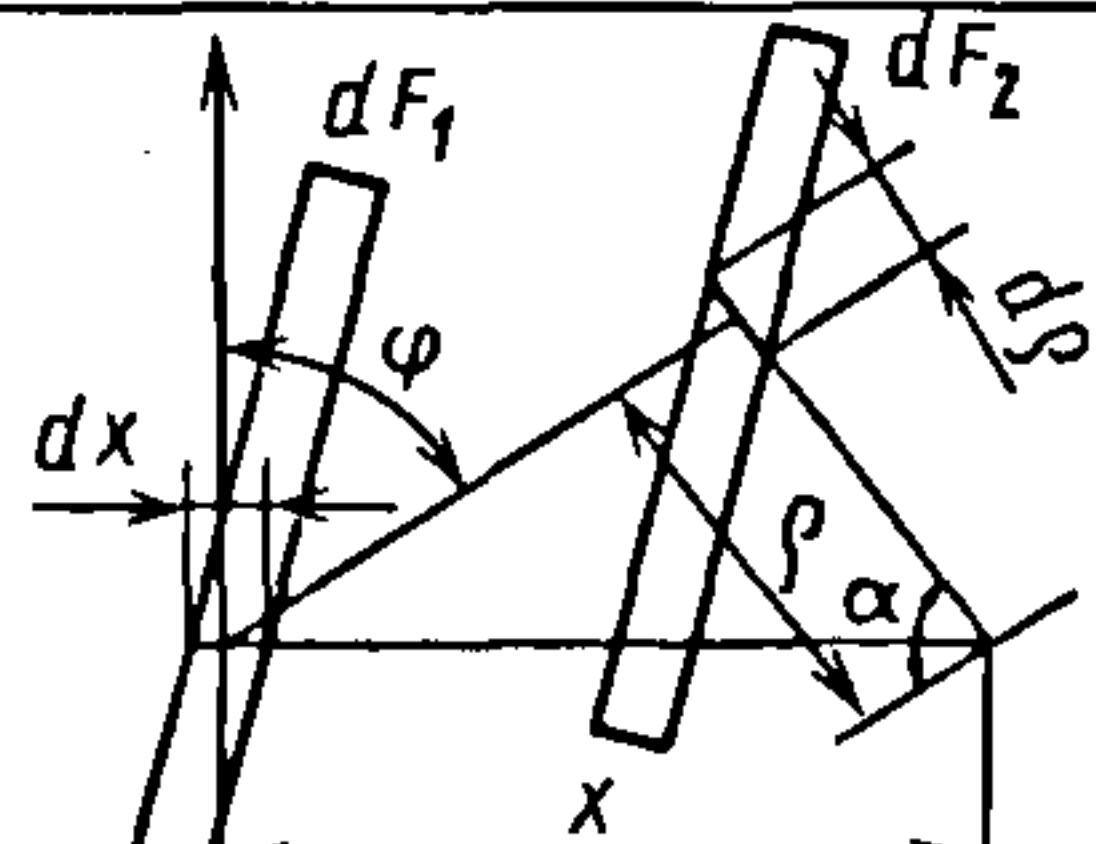
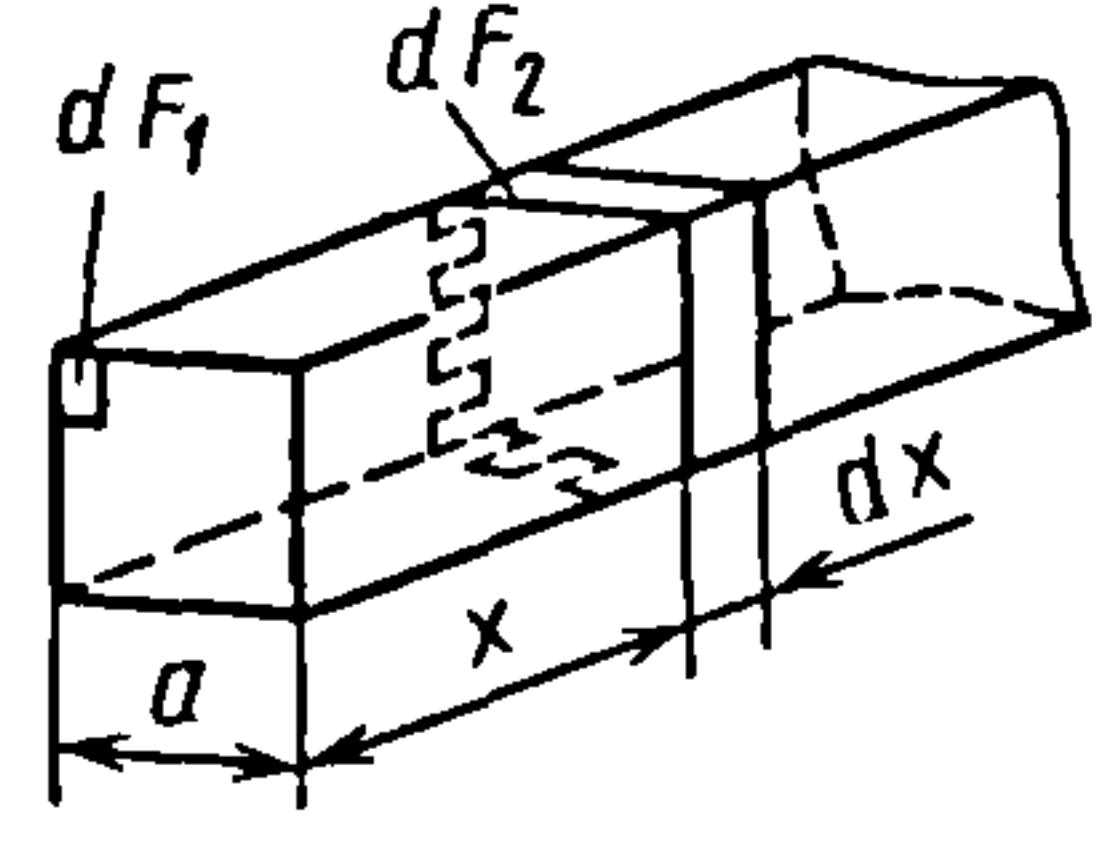
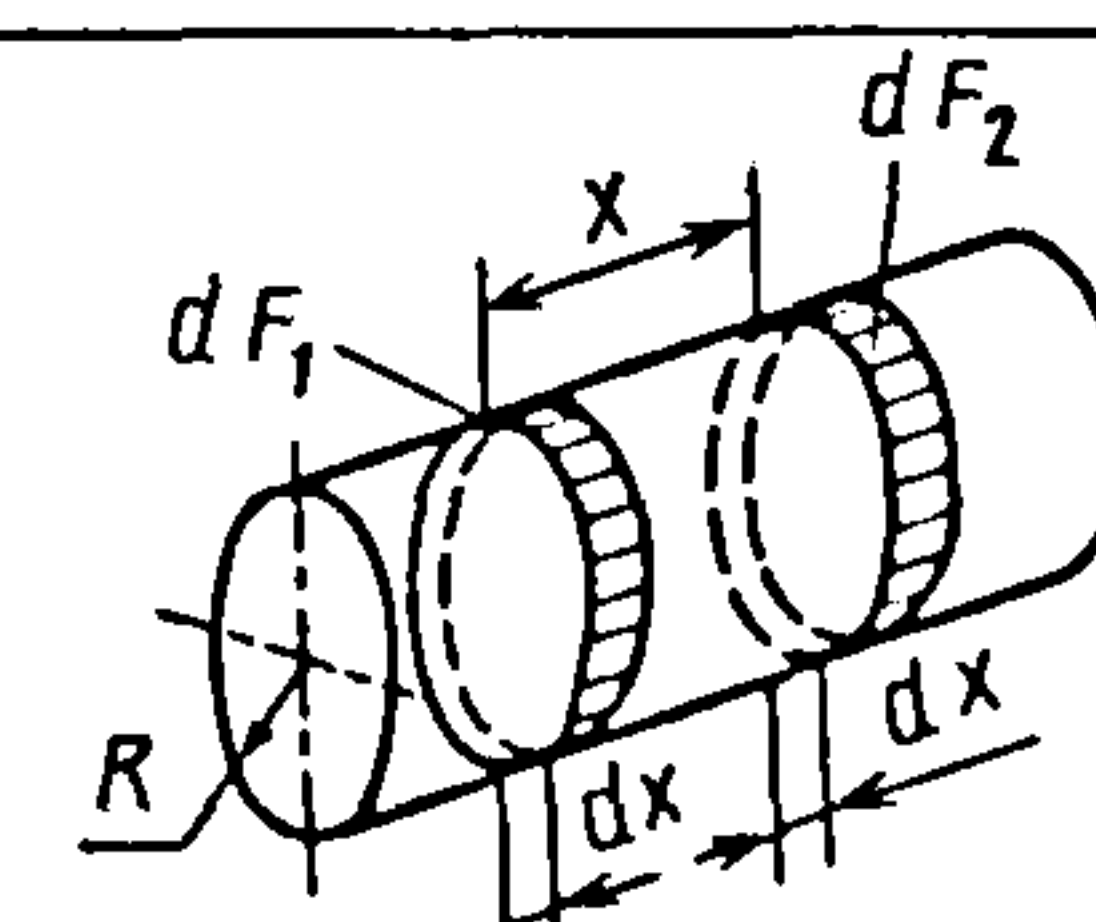
$$q_i'' = \alpha q'_i.$$

Вероятность  $k$  прохождения молекул газа от входного сечения  $dF_i$  вакуумной системы до выходного  $dF_j$

$$k = \int_{F_j} q_i dF_j / \int_{F_j} q_{0j} dF_i. \quad (3.54)$$



### 3.8. Расчетные зависимости угловых коэффициентов для поверхностей распространенных геометрических конфигураций

Варианты взаимного расположения поверхностей	Угловой коэффициент	Схема
Две произвольно ориентированные элементарные площадки	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_2$	
Две элементарные площадки с параллельными образующими	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{l^3 \cos \varphi d\varphi dx}{\pi(l^2 + x^2)^2};$ $r^2 = l^2 + x^2$	
Элементарная площадка и бесконечно длинная полоска бесконечно малой ширины с параллельными образующими	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{1}{2} d(\sin \varphi)$	
Две бесконечно длинные полоски бесконечно малой ширины с параллельными образующими	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{1}{2} d(\sin \varphi) =$ $= \frac{1}{2} \frac{x \rho \sin^2 \alpha}{(x^2 + \rho^2 - 2x\rho \cos \alpha)^{1.5}} d\rho$	
Элементарная площадка, расположенная в углу торца канала квадратного сечения, и элемент поверхности канала	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{ax}{\pi(a^2 + x^2)^{1.5}} \times$ $\times \left\{ \arctg \left[ \frac{a}{(a^2 + x^2)^{0.5}} \right] + \right.$ $\left. + \frac{a(a^2 + x^2)^{0.5}}{x^2 + 2a^2} \right\} dx$	
Два кольцевых элемента на внутренней поверхности прямого круглого цилиндра	$d\varphi_{dF_1-dF_2} =$ $= \frac{1}{2R} \left[ 1 - \frac{x(x^2 + 6R^2)}{(x^2 + 4R^2)^{1.5}} \right] dx$	

Продолжение табл. 3.8

Варианты взаимного расположения поверхностей	Угловой коэффициент	Схема
Два кольцевых элемента на внутренней поверхности прямого круглого конуса	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{\cos^2 \alpha}{2x_1 \sin \alpha} \left\{ 1 -  x_1 - x_2  \times \right.$ $\times \frac{(x_1 - x_2)^2 + 6x_1 x_2 \sin^2 \alpha}{[(x_1 - x_2)^2 + 4x_1 x_2 \sin^2 \alpha]^{3/2}} \left. \right\} dx$	
Два бесконечно малых элемента на внутренней поверхности сферической полости	$d\varphi_{dF_1-dF_2} = dF_2 / 4\pi R^2$	
Бесконечно длинная полоска бесконечно малой ширины и бесконечной длины с параллельными образующими	$d\varphi_{dF_1-F_2} =$ $= \frac{1}{2} + \frac{l \cos \alpha - x}{2(x^2 + l^2 - 2xl \cos \alpha)^{0,5}}$	
Элементарная площадка плоскости и параллельный ей плоский прямоугольник (нормаль к площадке проходит через угол прямоугольника)	$d\varphi_{dF_1-F_2} =$ $= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} - \right.$ $\left. - \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right)$	
Элементарная полоска плоскости и параллельный ей плоский прямоугольник (плоскость, нормальная к полоске, содержит сторону прямоугольника)	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{\pi b} \left( \sqrt{b^2 + h^2} \times \right.$ $\times \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} - h \arctg \frac{a}{h} +$ $\left. + \frac{ab}{\sqrt{a^2 + h^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right)$	
Элементарная площадка плоскости и прямоугольник, расположенный в плоскости, перпендикулярной к площадке	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2\pi} \left( \arctg \frac{b}{h} - \right.$ $\left. - \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right)$	



Продолжение табл. 3.8

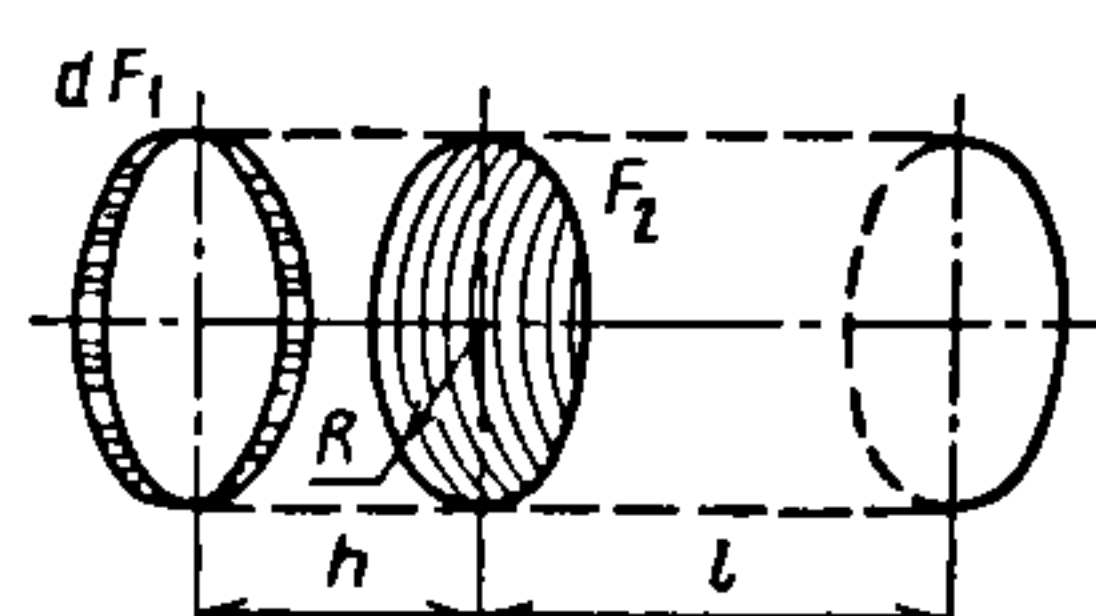
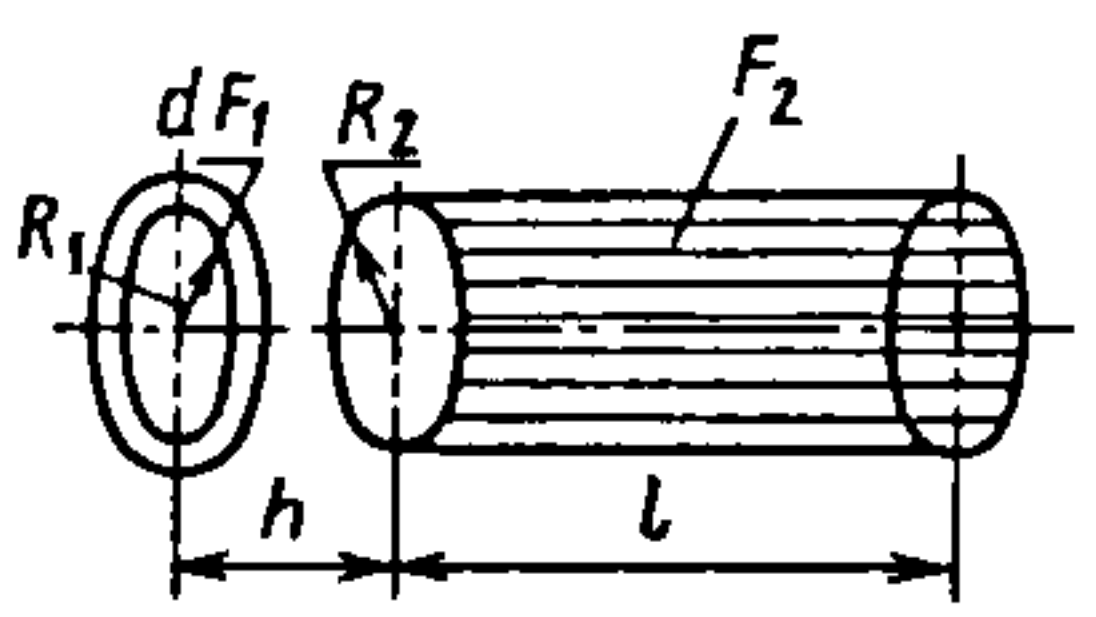
Варианты взаимного расположения поверхностей	Угловой коэффициент	Схема
Элементарная полоска плоскости и прямоугольник, расположенный в плоскости, перпендикулярной к полоске	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{b}{h} + \frac{h}{2b} \ln \frac{h^2(a^2 + b^2 + h^2)}{(b^2 + h^2)(a^2 + h^2)} - \frac{h}{\sqrt{a^2 + h^2}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right]$	
Элементарная площадка плоскости и параллельный ей круглый диск	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{\rho^2 + h^2 + R^2}{\sqrt{(h^2 + \rho^2 + R^2)^2 - 4\rho^2 R^2}} \right]$	
Элементарная площадка плоскости и круглый диск, расположенный в плоскости, перпендикулярной к площадке	$\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{h}{2\rho} \left[ \frac{\rho^2 + R^2 + h^2}{\sqrt{(\rho^2 + R^2 + h^2)^2 - 4\rho^2 R^2}} - 1 \right]$	
Элементарная площадка плоскости и параллельный ей эллипс; нормаль к площадке проходит через центр эллипса	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{ab}{\sqrt{(h^2 + a^2)(h^2 + b^2)}}$	
Элементарная полоска бесконечно малой ширины и любой длины и параллельный ей бесконечно длинный цилиндр	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{hR}{h^2 + \rho^2}$	
Элементарная полоска бесконечно малой ширины и любой длины на поверхности цилиндра и бесконечно протяженная плоскость	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha)$	

Продолжение табл. 3.8

Варианты взаимного расположения поверхностей	Угловой коэффициент	Схема
Элементарная площадка на внутренней поверхности внешнего цилиндра системы из двух коаксиальных цилиндров и внутренняя поверхность внешнего цилиндра	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2} - \frac{R_2}{4R_1} + \frac{R_2}{\pi R_1} \times$ $\times \left[ \frac{l}{R_2} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}{R_2} - \right.$ $\left. - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{l^2 - 4(R_1^2 - R_2^2)}{4l\sqrt{R_1^2 - R_2^2}} - \frac{l^2 + 2R_1^2}{R_2\sqrt{l^2 + 4R_1^2}} \times \right.$ $\left. \times \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(R_1^2 - R_2^2)(l^2 + 4R_1^2)}}{R_2 l} \right]$	
Кольцевой элемент на внутренней поверхности цилиндра и торец цилиндра	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2R} \left( \frac{h^2 + 2R^2}{\sqrt{h^2 + 4R^2}} - h \right)$	
Элементарная площадка в плоскости торца прямого цилиндра и наружная поверхность этого цилиндра	$d\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \arccos \frac{R_2}{R_1} + \right.$ $\left. + \operatorname{arctg} \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 - R_2^2}} - \frac{l^2 + R_1^2 - R_2^2}{X} \times \right.$ $\left. \times \operatorname{arctg} \frac{X \operatorname{tg} \left[ \frac{1}{2} \arccos(R_2 / R_1) \right]}{l^2 + R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2} \right\},$ <p>где <math>X = \sqrt{(l^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1 R_2}</math></p>	
Кольцевой элемент на плоскости, параллельной торцу цилиндра, и внутренняя поверхность цилиндра; центр кольцевого элемента на оси цилиндра	$d\varphi_{dF_1-F_2} =$ $= \frac{1}{2} \left\{ \frac{(l+h)^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{[(l+h)^2 + R_1^2 + R_2^2]^2 - 4R_1^2 R_2^2}} - \right.$ $\left. - \frac{h^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{(h^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}} \right\}$	



Окончание табл. 3.8

Варианты взаимного расположения поверхностей	Угловой коэффициент	Схема
Кольцевой элемент внутренней поверхности цилиндра и внутренняя поверхность цилиндра	$d\Phi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{2R} \left[ l + \frac{h^2 + 2R^2}{\sqrt{h^2 + 4R^2}} - \frac{(l+h)^2 + 2R^2}{\sqrt{(l+h)^2 + 4R^2}} \right]$	
Кольцевой элемент в плоскости, параллельной торцу, и внешняя поверхность этого цилиндра; центр элемента на оси цилиндра	$d\Phi_{dF_1-F_2} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{h^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{(h^2 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2}} \times \right.$ $\times \arctg \sqrt{\frac{(R_1 - R_2)[(R_1 + R_2)^2 + h^2]}{(R_1 + R_2)[(R_1 - R_2)^2 + h^2]}} -$ $- \frac{(h+l)^2 + R_1^2 - R_2^2}{\sqrt{[(h+l)^2 + R_1^2 + R_2^2]^2 - 4R_1^2 R_2^2}} \times$ $\left. \times \arctg \sqrt{\frac{(R_1 - R_2)[(R_1 + R_2)^2 + (h+l)^2]}{[R_1 + R_2][(R_1 - R_2)^2 + (h+l)^2]}} \right\}$	

Коэффициент захвата вакуумной системы, имеющей только входное сечение  $F_i$ ,

$$\alpha_c = 1 - \int_{F_i} q'_i dF_i / \int_{F_i} q'_{0i} dF_i.$$

Решение уравнений (3.52) и (3.53) можно получить численными методами.

Используя зональный метод, когда исследуемые поверхности разбивают на  $n$  зон с одинаковыми характеристиками, уравнение (3.53) можно представить в виде

$$q'_i = \sum_{j=1}^n q_{0j} d\Phi_{dF_i-F_j} + \sum_{j=1}^n (1 - \alpha_j) q'_j d\Phi_{dF_i-F_j}.$$

Решение этой системы уравнения имеет вид

$$q'_i = \sum_{j=1}^n q_{0j} d\Phi_{dF_i-F_j},$$

где  $d\Phi_{dF_i-F_j}$  — разрешающий локальный угловой коэффициент, представляющий собой вероятность непосредственного попадания молекул газа с элемента поверхности  $dF_i$  на всю поверхность  $F_j$  и при отражении от других поверхностей.

Коэффициент  $d\Phi_{dF_i-F_j}$  можно приближенно определить из решения системы алгебраических уравнений

$$d\Phi_{dF_i-F_j} = d\Phi_{dF_i-F_j} + \sum_{k=1}^n (1 - \alpha_k) \Phi_{F_k-F_j} d\Phi_{dF_i-F_k}.$$

# РАЗДЕЛ 2

## КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

### Глава 4

#### МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

---

##### 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Материалы, используемые в вакуумной технике, в зависимости от назначения подразделяют на три группы: конструкционные, специальные и технологические.

К конструкционным относятся материалы, применяемые для изготовления вакуумных систем и элементов, включая средства получения вакуума. Для этой цели широко используют чугуны, углеродистые стали, легированные стали и сплавы, жаропрочные, жаростойкие и коррозионно-стойкие стали и сплавы, титан и его сплавы, цветные металлы и сплавы, стекло, керамику и ситаллы.

Элементы конструкций, служащие в качестве тел нагрева, уплотнения и изоляторы изготавливают из специальных материалов: вакуумной резины, фторопласта, графита, тугоплавких металлов.

Легкоплавкие металлы и сплавы используют как припои и уплотнители подвижных и разъемных соединений фланцевого и клапанного типов, высоковакуумных и сверхвакуумных элементов и систем.

Широкое распространение стекла и керамики в качестве конструкционных материалов объясняется их способностью к формообразованию, хорошими электроизоляционными свойствами, низкой газопроницаемостью, химической стойкостью.

Из стекла изготавливают вакуумные трубопроводы, смотровые окна, оболочки

рабочих вакуумных камер и др., из керамики – изоляторы, электрические вакуумные вводы. В последнее время из керамики выполняют детали уплотняющих клапанных пар, направляющие координатные столы и др.

Большое распространение, особенно в технике низкого вакуума, получила вакуумная резина. Отличные упругие свойства последней сделали ее незаменимым материалом для вакуумных уплотнителей. Ее используют также как мембраны гибкие перегородки вводов движения в вакуум.

Резиновые вакуумные шланги применяют в качестве вакуумпроводов формвакуумных систем.

Из фторопласта изготавливают мембраны, сильфоны, подшипники скольжения, направляющие уплотнители в разъемных и подвижных соединениях.

Вакуумные лаки применяют главным образом для устранения течей в редко разбираемых нешлифованных соединениях; вакуумные смазочные материалы используют в качестве вязких уплотнителей для кранов и шлифованных соединений. Вакуумные замазки применяют для уплотнения нешлифованных соединений.

В последнее время для вакуумного уплотнения широко используют герметики, в неразъемных вакуумных соединениях – вакуумные цементы и клеи. Общие требования к материалам, этой группы – низкое давление пара при нормальной



температуре, малая усадка при остывании или испарении связующего вещества.

Дополнительные требования к конструкционным и специальным материалам, работающим в условиях повышенных температур: малые давление насыщенного пара и степень диссоциации при рабочих температурах; отсутствие химических реакций, протекающих с образованием газообразных продуктов или эвтектик; малая адсорбционная способность по отношению к газам и парам.

К *технологическим* относятся материалы, используемые при испытании, ремонте и эксплуатации вакуумных систем: лаки, клеи, герметики, замазки, смазочные материалы, материалы для очистки вакуумных аппаратов и др.

Требования ко всем материалам определяются функциональным назначением элемента или узла, в которых они применены.

#### 4.2. ЧУГУН

В вакуумной технике чугун используют главным образом для изготовления литых корпусных деталей, работающих при низком и среднем вакууме. Эти детали должны обладать достаточной вакуумной плотностью, поэтому их изготавливают литьем под давлением.

Малонагруженные корпусные детали отливают из чугунов СЧ 15 и СЧ 18, нагруженные — из чугунов СЧ 20, СЧ 25 и СЧ 30. Из чугуна СЧ 35 отливают сложные детали повышенной плотности. Детали пар трения изготавливают из антифрикционных чугунов; детали, работающие в паре с закаленными или нормализованными стальными валами, — из чугунов АЧС-1 и АЧС-2; детали, работающие в паре с термически не обработанными валами, — из чугуна АЧС-3.

Высокопрочные чугуны ВЧ 45; ВЧ 50 и ВЧ 60 по механическим свойствам не уступают литой углеродистой стали: имеют хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием, высокую износостойкость, способны гасить вибрации. Из

отливок высокопрочного чугуна изготавливают корпуса насосов, вентилях, переходников и др.

#### 4.1. Механические свойства чугунов с пластиковым графитом

Чугун	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_H$ , МПа	НВ
СЧ 15	147	314	163...229
СЧ 18	176	358	170...229
СЧ 20	196	392	170...241
СЧ 25	245	451	180...250
СЧ 30	294	490	181...255
СЧ 35	343	539	197...269

Примечание. Здесь и далее:

$\sigma_b$  — временное сопротивление;  $\sigma_H$  — предел прочности при изгибе; НВ — твердость по Бринеллю.

#### 4.2. Механические свойства высокопрочных чугунов

Чугун	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
ВЧ 45	441	333	—	160...220
ВЧ 50	490	343	1,5	180...260
ВЧ 60	588	393	2,0	200...280

Примечание. Здесь и далее:

$\sigma_T$  — предел текучести;  $\delta$  — относительное удлинение.

Механические свойства наиболее распространенных чугунов с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412-85) высокопрочных (ГОСТ 7293-85) чугунов приведены в табл. 4.1 и 4.2.

#### 4.3. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Углеродистые конструкционные стали широко используют для изготовления элементов и узлов вакуумных систем, работающих при давлении  $\geq 10^{-4}$  Па и нормальной температуре. Для исключения коррозии поверхности стальных деталей, соприкасающиеся с разреженным газом,

хромируют или никелируют, на поверхности крупногабаритных корпусов вакуумных камер иногда наносят (плазменным способом) стойкую пленку алюминия.

В зависимости от назначения и гарантируемых свойств углеродистые стали подразделяют на три группы (А, Б и В). В вакуумной технике наиболее широко используют стали группы Б, поставляемые с гарантированным химическим составом.

В табл. 4.3 указано содержание элементов для спокойных сталей группы Б, полученных полным раскислением металла в печи, а затем в ковше. Это стали с

#### 4.3. Содержание элементов для спокойных сталей группы Б

Сталь	Массовая доля, %		
	C	Mn	Si
БСт0сп	< 0,23	—	—
БСт1сп	0,06...0,12	0,25...0,50	0,12...0,13
БСт2сп	0,09...0,15		
БСт3сп	0,14...0,22	0,40...0,65	0,12...0,30
БСт4сп	0,18...0,27	0,40...0,70	
БСт5сп	0,28...0,37	0,5...0,80	0,15...0,35
БСт6сп	0,38...0,49		

минимальным содержанием оксида (FeO) железа (II), которое обеспечивает «спокойное» застывание металла в изложнице и практическое отсутствие пористости.

Скорость удельного газовыделения для низкоуглеродистых сталей, измеряемая удельным потоком газа, десорбирующегося с единицы поверхности в единицу времени, составляет  $(4,12...41,2)10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup> (м<sup>2</sup>·с).

Стали группы Б хорошо свариваются, поддаются горячему деформированию и термообработке. Из этой группы наибольшее применение находит сталь БСт3.

Углеродистые качественные стали поставляют с гарантированными химическим составом и механическими свойствами. Их маркируют цифрами 08; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45 и т. д., которые соответствуют среднему содержанию углерода в сотых долях процента. Низкоуглеродистые стали 08; 10; 15; 20; 25 применяют, когда требуются малая прочность и высокая эластичность. Из среднеуглеродистых сталей 30; 35; 40; 45; 50 после нормализации, улучшения и поверхностной закалки изготавливают разнообразные детали. Механические свойства углеродистой качественной стали должны соответствовать ГОСТ 1050–88 (табл. 4.4).

#### 4.4. Механические свойства углеродистой качественной стали

Сталь	Механические свойства <sup>1</sup>				Физические свойства <sup>2</sup>			
	$\sigma_b$	$\sigma_T$	$\delta$	$\Psi$	НВ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>
	МПа		%					
08	330	200	33	60	131	7,830	77,2	11,6
10	340	210	31	55	143			
15	380	230	27		149			
20	420	250	25	50	163	7,820	74,4	11,1
25	460	280	23		170			
30	500	300	21	45	179	7,817	72,0	12,6
35	540	320	20		187			11,1
40	580	340	19	40	197	7,815	56,8	12,4
45	610	360	16		207	7,814	64,8	11,6
50	640	380	14		217	7,811		12,0

<sup>1</sup> Для изделий диаметром или толщиной до 80 мм после отжига.

<sup>2</sup> Значения  $\lambda$  и  $\alpha$  соответствуют температуре 293 К.

Примечание. Здесь и далее:  $\psi$  – относительное, сужение поперечного сечения после разрыва;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\alpha$  – относительный температурный коэффициент линейного расширения.



#### 4.4. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Легированные стали после термической обработки имеют лучшие механические свойства, чем углеродистые. Основные легирующие элементы – хром, никель, кремний и марганец. Вольфрам, молибден, ванадий, титан, бор и другие легирующие элементы вводят в сталь в сочетании с хромом, никелем и марганцем.

Из легированных сталей изготавливают различные изделия: от крупногабаритных корпусных до малогабаритных сложной формы.

Легированные конструкционные стали маркируют цифрами и буквами, например 15Х, 40ХФА, 12ХН3А, 20Х2Н4А, 18ХГТ, 10Х14АГ15. Первые две цифры соответствуют среднему содержанию углерода в сотых долях процента. Буквы справа от цифры обозначают легирующий элемент (В – вольфрам; Г – марганец; Д – медь; Е – селен; К – кобальт; Н – никель; М – молибден; П – фосфор; Р – бор; С – кремний; Т – титан; Ф – ванадий; Х – хром; Ц – цирконий; Ч – редкоземельный металл; Ю – алюминий).

Буква А в середине говорит о наличии азота, специально введенного в сталь. Цифры после букв примерно свидетельствуют о содержании соответствующего легирующего элемента в целых единицах; отсутствие цифры означает, что в стали содержится до 1,5 % этого элемента. Для обозначения высококачественных легированных сталей в конце марки добавляют букву А, для обозначения особовысококачественной стали – букву Ш (через дефис).

Химический состав и механические свойства легированных сталей приведены в табл. 4.5.

#### 4.5. ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Жаропрочные стали и сплавы способны работать под высокой нагрузке и температуре > 773 К. Повышение температуры влияет на механические свойства

(уменьшает модуль упругости, пределы текучести и прочности).

Нагружение деталей в течение длительного времени при повышенной температуре вызывает явление ползучести. Сопротивление металла ползучести и разрушению в области высоких температур при длительном действии нагрузки называют *жаропрочностью*. Чаще всего жаропрочность характеризуют условным пределом ползучести и пределом длительной прочности. Условный предел ползучести – напряжение, которое вызывает за установленное время испытания при данной температуре заданное удлинение образца или заданную скорость ползучести.

Пример обозначения предела ползучести в соответствии с ГОСТ 3248–81:  $\sigma_{0,2/100}^{700}$  – предел ползучести при допуске на деформацию 0,2 % за 100 ч испытания при температуре 973 К. Рабочие температуры современных жаропрочных сталей и сплавов составляют  $(0,45...0,8)T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления.

Для работы при температуре до 1223 К используют жаропрочные сплавы на основе железа, никеля, кобальта; при температуре до 1773 К – сплавы на основе молибдена и других тугоплавких металлов.

#### 4.6. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ

Стали, содержащие более 12 % хрома, относятся к коррозионно-стойким. Применяют хромистые коррозионно-стойкие стали трех типов: с содержанием хрома 13, 17 и 27 %. В стали, содержащие 17...18 и 25...28 % хрома, иногда вводят небольшие добавки титана и никеля. Хромистые стали широко используют в вакуумной технике.

Температуры термической обработки и механические свойства хромистых коррозионно-стойких сталей приведены в табл. 4.6.

## 4.5. Химический состав и механические свойства легированных сталей

Сталь	Массовая доля, %						$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	$\psi$	$T_b$ , К	$T_n$ , К	HB, не более
	C	Mn	Cr	Ni	других элементов							
30X	0,24...0,32						900	12				187
40X	0,36...0,44	0,5...0,8			—		1000	10	45	273	173	217
40XФА	0,37...0,44		0,8...1,1	—	(0,1...0,18) V		900	50				241
40XГГР	0,38...0,45	0,7...1,0			(0,03...0,09) Ti			11		313	213	229
30XГС	0,28...0,35	0,8...1,1			(0,9...1,2) Si			10	45	293		
40XH	0,36...0,44	0,5...0,8	0,45...0,75	1,0...1,4			1000	11		243	173	207
40XH3A	0,27...0,33	0,3...0,6		2,75...3,15	—			10		233	153	241
40XH2MA	0,37...0,44	0,5...0,8	0,6...0,9	1,25...1,65	(0,15...0,25) Mo				50		153	
36X2H2MФА			1,3...1,7	1,3...1,7	(0,2...0,3) Mo; (0,10...0,18) V		120	12		213	133	269
38X3HМФА	0,33...0,40	0,25...0,50	1,2...1,5	3,0...3,5	(0,35 ...0,45)Mo; (0,10 ...0,18) V		1200					

Примечания. 1. Для всех сталей, кроме 30XГС, содержание кремния 0,17...0,37 %.

2.  $T_n$  и  $T_b$  характеризуют порог хладноломкости ( $T_n$  и  $T_b$  — температура, соответственно ниже и выше которой излом полностью хрупкий).



#### 4.6. Температуры термической обработки и механические свойства хромистых коррозионно-стойких сталей

Сталь	Температура, К		НВ, не более	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	$a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>
	закалки (З) или отжига (О)	отпуска		МПа		%		
12Х13Г	1273...1323	973...1063	187...121	600	420	20	60	90
20Х13	1273...1323	933...1043	197...126	660	450	10	50	60
30Х13	1223...1293	473...573	207...131	950	800	9	45	50
40Х13	1273...1323	473...573	229...143	950	750	9	40...45	30
12Х17	1033...1053	—	197...126	400	250	20	50	—
14Х17Н2	1248...1313	548...623	285*	1100	850	10	30	50
15Х25Т	1003...1043	—	—	450	300	20	45	—

\* Не более.

Примечание.  $a_n$  — ударная вязкость.

Введение 8...15 % Ni в сталь, содержащую 18 % Cr, переводит ее в аустенитное состояние во всем диапазоне температур. Это обеспечивает лучшие механические свойства, меньшую склонность к росту зерна, повышает коррозионную стойкость, снижает хладноломкость.

Коррозионно-стойкие стали, содержащие 18 % Cr и 10 % Ni, получили в настоящее время большое распространение. Недостаток хромоникелевых сталей — склонность к межкристаллитной коррозии. Это явление устраняют уменьшением содержания углерода и введением элементов-стабилизаторов — титана или ниобия, которые, соединяясь с углеродом, препятствуют образованию хромистых карбидов и появлению межкристаллитной коррозии.

Аустенитные коррозионно-стойкие стали 12Х18Н10Т, 12Х18Н2Т широко применяют в вакуумной технике благодаря высоким антикоррозионным, технологическим и механическим свойствам.

Эти стали хорошо поддаются прокатке в горячем и холодном состояниях, в холодном состоянии выдерживают глубокую вытяжку и профилирование, хорошо свариваются с образованием вакуумно-плотного соединения. Термическая обработка коррозионно-стойких сталей аусте-

нитного класса сравнительно проста и заключается в закалке, отжиге и отпуске (см. табл. 4.6).

Аустенитные коррозионно-стойкие стали в закаленном состоянии имеют низкие пределы текучести и прочности и очень высокую пластичность. Так, для сталей 04Х18Н10, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т и 17Х18Н9 временное сопротивление соответственно  $\sigma_b = 450; 500; 520$  и  $580$  МПа. Для стали 04Х18Н10 предел текучести  $\sigma_t = 160$  МПа, для остальных трех сталей  $\sigma_t = 200$  МПа. Для сталей всех четырех марок  $\delta = 40\%$ ,  $\psi = 55\%$ .

#### 4.7. СТАЛИ И СПЛАВЫ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Металлические материалы, эксплуатируемые при низких температурах (от нормальной до температуры кипения жидкого гелия 4,22 К), подразделяют на три группы, соответствующие следующим температурным диапазонам: 293...213; 293...193; 293...13 К.

Основное требование к сталям и сплавам, предназначенным для работы при низких температурах, — высокая механическая прочность. Известно, что при снижении температуры прочность возрастает, а пластичность и вязкость уменьшаются. Таким образом, прочность должна

гарантироваться при нормальной температуре. Рассчитывая элементы криогенных систем и установок на прочность, следует учитывать свойства материалов при нормальной температуре.

Для работы при низких температурах наиболее широко используют аустенитные стали 12X18H10T, 08X18H10, 12X18H9.

Хромоникелевые аустенитные стали имеют высокую ударную вязкость при нормальной температуре. По мере снижения температуры до температуры кипения жидкого азота, эти стали сохраняют свою пластичность, а ударная вязкость хотя и уменьшается, но до  $T = 20$  К сохраняет высокие значения. Вследствие относительно невысокой прочности аустенитных сталей ( $\sigma_T \approx 250$  МПа) разработаны высокопрочные стали, например 07X21Г7АН5 ( $\sigma_T \approx 400$  МПа).

#### 4.8. ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ

В высоковакуумной технике (в первую очередь для изготовления деталей газоплавающих насосов) широко при-

меняют титан и его сплавы, имеющие высокие прочность, плотность, жаропрочность и коррозионную стойкость при температуре до 773 К. При более высокой температуре титан и его сплавы легко окисляются и поглощают водород, который вызывает охрупчивание. Технический титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается в среде аргона, но плохо обрабатывается резанием.

Для получения сплавов титан легируют алюминием, молибденом, ванадием, марганцем, хромом, оловом, цирконием, ниобием и кремнием.

Титан имеет две аллотропические модификации:  $\alpha$  и  $\beta$ . Наибольшее промышленное применение получили  $\alpha$ - и ( $\alpha + \beta$ )-сплавы.

В табл. 4.7 приведены содержание элементов и механические свойства наиболее распространенных титановых сплавов, обрабатываемых давлением. Высокая пластичность титановых сплавов при низкой температуре позволяет применять их в вакуумной и криогенной технике.

4.7. Содержание элементов и механические свойства сплавов, обрабатываемых давлением

Модификация	Сплав	Содержание элементов <sup>1</sup> , %			Механические свойства <sup>2</sup>			Вид полуфабриката
		Al	Mo	других	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$a_{K_0}$ , Дж/см <sup>2</sup>	
$\alpha$	BT5	4,3...6,2		—	750...900	10...14	30...60	Поковки, штамповки, прутки
	BT5-1	4,3...6,0	—	(2,0...3,0) Sn;	800...950	10...15	40...80	
	OT4	3,5...5,0		(0,8...2,0) Mn	700...900	10...20	40...100	
$\alpha + \beta$	BT3-1	5,5...7,0	2,0...3,0	(0,2...0,7) Fe; (0,8...2,3) Cr; (0,15...0,04) Si	1100 (1200)	17 (12)	35	Штамповки, поковки
	BT9	5,8...7,0	2,8...3,8	(0,20...0,35) Si; (0,2...2,0) Zr	1100 (1300)	10 (6)	30	
	BT14	3,5...6,3	2,5...3,8	(0,9...1,9) V	1000 (1300)	12 (8)	70 (50)	Штамповки
	BT22	4,4...5,9	4,0...5,5	(4,0...5,5) V; (0,5...2,0) Cr; (0,5...1,5) Fe	1150 (1450)	15 (6)	$\geq 30$	Прутки

<sup>1</sup> Остальное — титан.

<sup>2</sup> Механические свойства указаны после отжига, в скобках — после закалки и старения.



Титан и  $\alpha$ -сплавы титана не упрочняются термической обработкой, их подвергают только рекристаллизационному отжигу. Температура отжига ( $\alpha + \beta$ )-сплавов должна быть выше температуры рекристаллизации, но не превышать температуры фазового превращения, так как и в  $\beta$ -сплавах происходит сильный рост зерна. Отжиг  $\alpha$ - и ( $\alpha + \beta$ )-сплавов лучше проводить в вакууме, для снятия напряжений – неполный отжиг при  $T = 823 \dots 873$  К; ( $\alpha + \beta$ )-сплавы можно упрочнять закалкой с последующим старением.

Титановые сплавы имеют хорошие антифрикционные свойства. Титан и его сплавы, предназначенные для деталей узлов трения, азотируют при  $T = 1123 \dots 1223$  К в течение 30...60 ч в среде азота. После азотирования по такому режиму толщина диффузионного слоя титановых сплавов составляет 0,05...0,15 мм, твердость по Виккерсу 750...900 HV.

#### 4.9. ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

К *тугоплавким* относятся металлы с температурой плавления, превышающей 1973 К.

В вакуумной технике в качестве конструкционных материалов применяют вольфрам, молибден и их сплавы, ниобий, тантал.

Вольфрам, как правило, используют в виде проволоки в качестве тел нагрева различного назначения: в вакуумных приборах, термическом оборудовании, насосах. При этом одно из наиболее важных для вакуумной техники свойств вольфрама – его взаимодействие с газами. При температуре 573...773 К в присутствии кислорода образуется оксид вольфрама  $W_4O_{11}$ , а при более высокой температуре – триоксид  $WO_3$ , который легко испаряется в вакууме.

Вольфрам имеет исключительно высокие временное сопротивление и модуль упругости; так,  $\sigma_b = 114$  МПа при температуре 2200 К. Близок по своим свойствам к вольфраму молибден. В отличие от

вольфрама полуфабрикаты из молибдена приобретают пластичность после отжига, что позволяет обрабатывать их методом пластического деформирования и резанием. Молибден хорошо сваривается в инертных газах, а также электронно-лучевым методом.

Применяют чистый бесприсадочный молибден М4 и вакуумно-плавленный – М4ВП. Из молибдена получают полуфабрикаты в виде проволоки (ТУ 48-19-203-76), прутков (ТУ 48-19-247-77) и трубок. В вакуумной технике их используют для изготовления вакуумно-плотных спаев с алюмосиликатными стеклами.

Сплав вольфрама и молибдена ВМ-5 поставляют в виде проволоки главным образом для вакуумных приборов различных типов. Сплав молибден-цирконий-титан ЦМ-2А применяют для изготовления деталей, от которых требуется повышенная жаропрочность. Его поставляют в виде прутков диаметром 8...60 мм, листов толщиной 0,3...20,0 мм и шириной 100...400 мм, а также поковок диаметром 65...180 мм (ТУ 48-19-273-77).

Один из самых пластичных тугоплавких металлов – тантал. Его можно подвергать практически всем видам механической обработки в холодном состоянии и сваривать со всеми металлами, с которыми он образует сплавы (железом, никелем, цирконием, титаном, ниобием, вольфрамом). При этом применяют аргонодуговую, ультразвуковую и электронно-лучевую сварку.

При температуре 973...1473 К тантал поглощает активные газы, а при температуре 1473...1713 К – хорошо обезгаживается.

Тантал ТВЧ и ТВЧ-1 получают методом вакуумной плавки, поставляют в виде листов толщиной 0,01...10 мм и шириной 30...150 мм (ТУ 95-311-75), проволоки диаметром 0,05...3 мм (ТУ 95-353-75) и прутков диаметром 3...50 мм (ТУ 95-234-80). Технический тантал марки Т выпускают в виде прутков (ТУ 11 Су 0.021.041-74), ленты (ТУ 11 Су 0.021.016-77) и проволоки (ТУ 11 Су 0.021.032-77).

## 4.8. Физические свойства тугоплавких металлов

Металл	Температура, К			$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>
	рекристаллизации	плавления	кипения			
Вольфрам	1838	3653	6203	19,3	192	4,5
Рений	1673	3443	6143	21,0	68,0	6,7
Тантал	1273	3269	6373	16,6	52,0	6,6
Молибден	1403	2898	5073	10,2	140,0	5,4
Ниобий	383	2688	3573	8,6	48,0	7,1
Гафний	—	2248	5673	13,4	21,0	6,0
Ванадий	—	2173	3623	6,1	29,6	9,7
Хром	1073	2163	2742	7,2	64,0	6,2
Цирконий	—	2128	3850	6,0	16,0	5,8

\* При температуре 293 К.

Сплавы тантал–вольфрам марок ТВ-5, ТВ-10 и ТВ-15 поставляют в виде полос толщиной 0,1...10 мм и шириной  $\geq 100$  мм (ТУ 48-4-312-74) и прутков диаметром 3...80 мм (ТУ 48-4-311-74).

Применение ниобия и его сплавов в вакуумной технике обусловлено его способностью к газопоглощению, высокой температурой плавления (2688 К), низким давлением пара. Ниобий используют в качестве припоя для соединения более тугоплавких металлов. Его поставляют в виде прутков НбП1 и НбП2 диаметром 3...100 мм (ТУ 48-4-241-73), фольги и листов Нб-1 и Нб-2 толщиной 0,1...10 мм и шириной 30...150 мм (ТУ 95-311-75).

Физические свойства тугоплавких металлов приведены в табл. 4.8.

## 4.10. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Из цветных металлов и сплавов в вакуумной технике наиболее широко применяют алюминиевые литейные сплавы АЛ2, АК5, АК7, а также сплавы алюминия с марганцем или магнием, часто используемые в качестве конструкционных материалов для изготовления вакуумных камер, корпусов вакуумной запорной аппаратуры, вакуумных трубопроводов и др.

Сплавы, свойства которых приведены в табл. 4.9, легко обрабатываются давлением, хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Для аргонодуговой сварки наиболее приемлемы сплавы АМц и АМг6.

## 4.9. Основные физико-механические свойства технической меди М1

Сплав	Содержание элементов, %		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>
	Мп	Мг					
АМц	1,0...1,6	—	130	23	2,73	188,5	24,0
АМг2	0,2...0,6	1,8...2,6	190	23	2,67	142,4	23,8
АМг3	0,3...0,6	3,2...3,8	190	15	2,67	146,6	23,8
АМг5	0,3...0,8	4,8...5,8	260	22	2,65	117,3	24,3
АМг6	0,5...0,8	5,8...6,8	300	18	2,63	293,3	24,0

\* При температуре 293 К.

Примечание. Механические свойства приведены для сплавов в отожженном состоянии.



В технике высокого и сверхвысокого вакуума широко применяют медь (М06, М1, М006). Благодаря высокой теплопроводности ее широко используют в охлаждаемых устройствах; высокая пластичность меди позволяет изготавливать из нее уплотнители прогреваемых высоковакуумных разъемных соединений. Недостатки меди – склонность к водородной «болезни», приводящей к образованию мельчайших трещин и вызывающей хрупкость материала, и высокая активность по отношению к кислороду, особенно при повышенных температурах, что ухудшает свойства медных уплотнителей и ограничивает их повторное использование.

Несмотря на недостатки, такие характеристики меди, как высокая пластичность, низкая газопроницаемость, низкое давление пара ( $10^{-9}$  Па при  $T = 773$  К), соответствие по температурному коэффициенту линейного расширения коррозионно-стойкой стали (12Х18Н10Т), являются решающими при выборе ее в качестве уплотняющего материала для сверхвысоковакуумных разъемных соединений, прогреваемых до 723 К.

Основные физико-механические свойства технической меди М1 приведены ниже (здесь и далее  $\rho_{эл}$  – удельное электрическое сопротивление):

Температура, К:	
плавления . . . . .	1356
кипения . . . . .	2873
$\rho$ при $T = 293$ К, г/см <sup>3</sup> . . . . .	8,96
$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> ,	
в интервале температур, К:	
273...373 . . . . .	16,4
298...573 . . . . .	17,7
273...873 . . . . .	18,6
273...1073 . . . . .	19,3
$\lambda$ , Вт/(см·К) . . . . .	3,95
$\rho_{эл}$ при $T = 273$ К, Ом·м . . . . .	$1,67 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_b$ , МПа . . . . .	220
$\delta$ , % . . . . .	60
НВ . . . . .	36

Применение латуни в вакуумной технике ограничивается изготовлением

мелких деталей, не подвергающихся нагреву в вакууме, поскольку при нагреве в вакууме из латуни начинает выделяться цинк, загрязняя систему и постепенно превращая латунь в пористый металл. По этой же причине рекомендуется применять бронзы, не содержащие цинка.

Никель мало применяют в вакуумной технике; исключение составляет изготовление гальванических покрытий в сложных паяных узлах. Проволоку из алюминия (НМцАК2-2-1), хромеля (НХ9,5), копеля (МНМц43-05), ферронихрома (Х15Н60), нихрома (Х20Н80), константана (МНМц40-1,5) применяют для изготовления термоэлектродов термоэлектрических преобразователей (термопар). Высоковакуумные спаи с тугоплавкими стеклами изготавливают из ковара (Н28К18), в состав которого входят никель, кобальт и железо.

#### 4.11. СТЕКЛО, КЕРАМИКА, СИТАЛЛЫ

Стекло представляет собой аморфный, обычно прозрачный материал. По химическому составу стекло является сплавом ряда оксидов. Основная составляющая стекла – диоксид кремния. Введение в состав свинца, цинка, магния, кальция и других веществ придает ему особые свойства.

Важнейшая характеристика стекла – температурный коэффициент линейного расширения. В зависимости от его значения стекло подразделяют на тугоплавкое или твердое ( $\alpha = 5,5 \times 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>) и легкоплавкое [ $\alpha = (5,5 \dots 11) \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>].

Наиболее тугоплавким является кварцевое стекло, содержащее 98,8 % SiO<sub>2</sub>. Оно обладает высокими прочностными свойствами и прозрачностью для ультрафиолетовых лучей. Стекло активно сорбирует газы и поэтому обладает значительной способностью к газовыделению. В поверхностном слое стекла может быть сорбировано >59 мономолекулярных слоев. При этом преимущественно сорбируются пары воды и незначительное количество диоксида углерода и азота.

## 4.10. Физические свойства технического стекла

Стекло	$\alpha \cdot 10^7$ , К <sup>-1</sup>	Предел прочности, МПа		$\lambda$ , Вт/(м·К)	Температура размягче- ния, К	Термо- стой- кость, К	Темпера- тура отжига, К
		при разрыве	при сжатии				
С37-2	33...36	84	—	—	863...893	250	693...823
С39-1	38...41	78	1106	1,257	903...923	230	678...823
С40-1	40	70	1090	—	893	240	683...803
С47-1	47...48	905	1090	0,87	853...873	200	683...838
С49-1	48...52	30...50	—	—	843...863	180	673...823
С87-1	86...90	40...60	850	0,67	753...773	100	623...733
С89-5	87...91	—	—	—	803	—	—
Кварце- вое про- зрачное	5,5...6,1	70...120	1600...2000	1,382... 2,680	1773	—	—

\* При  $T = 293...573$  К.

При нагреве стекла в вакууме большая часть адсорбированных газов выделяется в течение первых 2...3 мин; поверхностная десорбция газов завершается при нагреве до  $T = 573$  К. При  $T > 773$  К происходит интенсивное газовыделение из стекла главным образом паров воды, оксида и диоксида углерода и в незначительных количествах водорода.

Для формообразования стекла используют его термопластические свойства, определяемые характером зависимости вязкости стекла от температуры.

Основные физические свойства технического стекла по ОСТ 11 027.010–75 приведены в табл. 4.10.

По многим свойствам стекло существенно уступает керамике. Большая часть свойств керамики незначительно зависит от температуры в интервале 1073...1273 К. Стабильность свойств керамических материалов обеспечивает длительную работоспособность выполненных из них изделий при  $T = 1673...1873$  К. Высокая прочность керамики позволяет получать жесткие и механически прочные вакуумные соединения керамических деталей с различными металлами и сплавами (медью, никелем, молибденом, вольфрамом, ковалом и др.).

Керамику используют в производстве изоляторов, металлокерамических узлов различного назначения, в энергетических герметичных вводах и др.

Основные свойства вакуумно-плотной керамики различных видов приведены в табл. 4.11.

Газовыделение для керамики значительно меньше, чем для стекол. При обезгаживании керамики преимущественно выделяются небольшие объемы  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  и  $H_2$ , причем состав газа зависит от предварительной поверхностной обработки. На газовыделение керамики наиболее сильно влияют процессы адсорбции и десорбции поглощенных из атмосферы газов.

Керамические материалы, содержащие  $SiO_2$ , интенсивно поглощают влагу, причем интенсивность поглощения тем больше, чем больше пористость и шероховатость поверхности. С увеличением содержания  $SiO_2$  вакуумные свойства керамики ухудшаются: повышается ее склонность к сорбции газов.

В производстве вакуумной аппаратуры все шире применяют стеклокристаллические материалы – ситаллы и цементы. Ситаллы получают на основе неорганических стекол полной или частичной кристаллизацией. По структуре ситаллы занимают промежуточное положение между стеклом и керамикой.



## 4.11. Основные свойства вакуумно-плотной керамики

Керамика	Т, К	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при статическом изгибе, МПа, при Т, К			$\alpha \cdot 10^7$ , К <sup>-1</sup> , при Т, К		$\lambda$ , Вт/(м·К)	Диэлектричес- кая проницае- мость <sup>1</sup> при Т, К	Тангенс угла диэлек- трических потерь <sup>1</sup> (tg $\delta$ ) $10^4$ при Т, К		$\rho_{эл}$ , Ом·м	Электричес- кая проч- ность <sup>2</sup> , МВ/м
			293	1173		293...473	473...1173						
Форсте- риговая: ЛФ-11	1623	2,98	140	—		85	109	—	6,5	—	10	$10^{14}$	—
Ф-17	1613	2,93	170	—		83	97	—	6,3	—	10	$10^{14}$	—
КВФ-4		2,95				80	100						
Алюмо- силикатная	1873	3,40	260	250		53	70	5,44	8,4	8,8	14	$10^{13}$	33
Алюмо- оксидная: 22Х		3,68	360	70		61	79	10,47	9,3	9,5	8	$10^{13}$	54
22ХС		3,75	380	100									
М-7		3,65	350	220									
А-994		3,88	360	230		60	77	18,85	9,7	10,0	1	$10^{14}$	50
поликор	2123	3,98	290	240		57	75	27,29	9,8	10,2	0,5	$10^{15}$	
На основе оксида бериллия (брокерит-9)	—	2,85	220	170		53	86	16,70	6,8	7,0	3	$10^{15}$	—

<sup>1</sup> При частоте  $10^{10}$  Гц.<sup>2</sup> При  $T = 293$  К и постоянном напряжении.

Ситаллы изготавливают плавлением стекольной шихты специального состава с добавкой катализаторов, охлаждением расплава до пластичного состояния и формованием из него изделий методами, применяемыми при изготовлении стекла. В состав стекла, используемого для получения ситаллов, входят оксиды  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и др. В качестве катализаторов используют золото, серебро и медь.

В отличие от обычного стекла, свойства которого определяются в основном его химическим составом, для ситаллов решающее значение имеют структура и состав. Ценные свойства ситаллов обусловлены их исключительной мелкозернистостью, почти идеальной поликристаллической структурой. Ситаллы обладают изотропией всех свойств, а также высокой вакуумной плотностью.

#### 4.12. Свойства ситаллов

Показатель	СТ 32-1	СТ 38-1	СТ 50-1
Диэлектрическая проницаемость при частоте, Гц:			
$10^6$	10,0	7,35	8,5
$10^{10}$	100,0	7,25	8,5
$\text{tg } \delta$ , не более, при частоте, Гц:			
$10^6$	20,0	30	15
$10^{10}$	5,0	3,0	35
Удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{эл}}$ , Ом·м, не менее, при температуре, К:			
373	$10^{15}$	$10^{17}$	$10^{17}$
573	$10^{12}$	$10^{12}$	$10^{13}$
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,17	2,90	2,65
$\alpha \cdot 10^7$ , К <sup>-1</sup> , в интервале температур 293...573 К	32	38	52
$\sigma_{\text{н}}$ , МПа	150	100	180

В вакуумной технике наиболее распространены ситаллы СТ 32-1; СТ 38-1; СТ 50-1, свойства которых приведены в табл. 4.12.

Ситаллы обладают высокой химической стойкостью к кислотам и щелочам даже при высоких температурах. Из ситаллов изготавливают вакуумно-плотные оболочки, трубы, детали радиоэлектронной аппаратуры.

Стеклокристаллические материалы используют для получения цементов.

Их разделяют на низкотемпературные (температуры кристаллизации и склеивания  $< 823$  К) и высокотемпературные (указанные температуры  $> 823$  К). Свойства стеклокристаллического цемента СЦ 90-1 приведены ниже:

Температура деформации, К 753

Электрическая

прочность, МВ/м ..... 10

$\rho_{\text{эл}}$  при  $T = 373$  К, Ом·м ....  $10^{13}$

$\alpha$  при  $T = 293...573$  К, К<sup>-1</sup> ...  $95 \cdot 10^{-7}$

#### 4.12. ПЛАСТМАССЫ

Пластмассы – искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. В качестве связующих для пластмасс чаще всего используют синтетические смолы, реже – эфиры и целлюлозы. Многие пластмассы (например, полиэтилен, органические стекла) состоят из одного связующего вещества. Другой важный компонент пластмасс – наполнитель. Свойства пластмасс определяются свойствами компонентов и их количественным соотношением.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяют на *термопласты* и *термореактопласты* (на основе синтетических смол).

Термопласты применяют в качестве прозрачных органических стекол, высоко- и низкочастотных диэлектриков и др. Изделия, выполненные из таких материалов,



имеют ограниченную рабочую температуру. В вакуумной технике используют термопласты типа полиэтилена, политетрафторэтилена (ПТФЭ), органического стекла, полиуретанов. Из полиэтилена изготавливают шланги и трубы для вакуумных трубопроводов, из полиуретана — герметичные деформируемые камеры, например в безмасляных вакуумных насосах. ПТФЭ, более известный как фторопласт-4 и тефлон, используют в качестве уплотнителей в разъемных и подвижных соединениях, а также как изоляторы.

В вакуумной технике наиболее широко применяют ПТФЭ, обладающий исключительной химической стойкостью по отношению к химически активным реагентам. Практически он разрушается только под действием расплавленных щелочных металлов и отличается сравнительно высокой термостабильностью. При температуре до 523 К его механические свойства почти не меняются; при этой температуре его можно длительно эксплуатировать.

ПТФЭ негигроскопичен и практически не смачивается водой. Это один из лучших диэлектриков (особенно в полях высоких и сверхвысоких частот). Его диэлектрические свойства мало изменяются в широком диапазоне температур. ПТФЭ обладают очень низким коэффициентом трения по стали ( $f = 0,04$ ), который не зависит от температуры в диапазоне, рекомендуемом для эксплуатации (до 523 К). Недостатки ПТФЭ — хладотекучесть под нагрузкой и выделение токсичного фтора при высокой температуре.

Физико-механические свойства ПТФЭ — одного из наиболее распространенных материалов, используемых в вакуумной технике благодаря малому газовыделению, небольшой (по сравнению с металлическими вакуумными уплотнениями) силе герметизации, хорошей обрабатываемости резанием и т.д. — приведены ниже.

### Физико-механические свойства ПТФЭ

Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	2,1...2,3
Температура, К:	
плавления кристаллов . . . . .	600
стеклования аморфной фазы . . . . .	153
разложения . . . . .	> 688
Рабочая температура при эксплуатации, К:	
максимальная . . . . .	523
минимальная . . . . .	4
Теплопроводность, Вт/(м·К) . . . . .	0,24
Предел прочности при растяжении, МПа, образцов:	
незакаленных . . . . .	140...200
закаленных . . . . .	160...250
Удлинение, %:	
относительное при разрыве . . . . .	250...500
остаточное . . . . .	250...350
Предел прочности при статическом изгибе, МПа:	
при 293 К . . . . .	4700...8500
при 213 К . . . . .	13 200...27 800
Удельная ударная вязкость, МПа	100
Твердость по Бринеллю, кгс/мм <sup>2</sup> . . . . .	3...4
Электрическая прочность при толщине 4 мм, кВ/мм . . . . .	25...27
Горючесть . . . . .	Не горит
Коэффициент трения в вакууме:	
по полированной стали . . . . .	0,04
по фторопласту-4 . . . . .	0,06

Газонаполненные пластмассы (пенопласты) широко используют в качестве теплоизолирующих прокладок в криогенных системах и установках. Для большей части пенопластов нижний предел рабочей температуры 213 К, верхний 333...573 К.

### 4.13. РЕЗИНЫ

Резины — наиболее распространенные вакуумные уплотнители. Вакуумная резина (ТУ 38-105376-72) имеет незначительную пористость и сравнительно малое газовыделение.

Вакуумные резиновые смеси различных марок и диапазон их рабочих температур представлены в табл. 4.13.

#### 4.13. Рабочие температуры вакуумных резиновых смесей

Тип	Марка резиновой смеси	Рабочая температура, К
Теплоагрессивностойкие, на основе фторкаучуков	ИРП-1287 НТА	253...523
	ИРП-1345	
	51-1735	253...548
Тепломорозостойкие, на основе этилпропиленового каучука	ИРП-1375 НТА	223...423
	6001	
Маслобензостойкие, на основе нитрильных каучуков	ИРП-1175	233...383
На основе изопреновых, дивиниловых и натуральных каучуков	1847	218...363
	2062	213...333
	7889	218...353

Белая вакуумная резина 7889 наиболее эластична. Ее используют в качестве уплотнителей, работающих в диапазоне температур 218...353 К. Эту резину выпускают в виде пластин, шнуров круглого или прямоугольного сечения и трубок. Черная резина 9024 менее эластична, чем резина 7889, обладает примерно вдвое меньшим газовыделением. Ее производят только в виде пластин.

При более низких температурах (до 213 К) используют резины ИРП-1118 и ИРП-1289. Резины ИРП-1345, ИРП-1399 и 51-1433 наиболее термостойки, но неустойчивы к растворителям. Универсальна резина ИРП-2043 на основе фторкаучука.

Ниже указаны значения удельного потока  $q'$  проницаемости резин по азоту

при  $T = 298$  К и перепаде давления  $\Delta p = 10^2$  Па:

Резина..... 9024 7889 ИРП-2043  
 $q'$ , Па·м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с)  $1 \cdot 10^{-10}$   $1 \cdot 10^{-9}$   $5 \cdot 10^{-11}$

Физико-механические характеристики резин, применяемых для изготовления пластин, приведены в табл. 4.14.

#### 4.14. Физико-механические свойства резин для пластин

Резина	$\sigma_b$ , МПа	$\delta^*$ , %, не менее	Температура хрупкости, К	Интервал рабочих температур, К
7889	17	550		218...353
9024	10	350	238	253...363
ИРП-1015	9	400	248	253...343

\* При разрыве.

Сортамент резиновых пластин установлен ТУ 38-105116-81, где предусмотрены толщины 3; 3,5; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 40 мм и размеры пластин 250×250 и 500×500 мм.

Из резиновых пластин изготавливают уплотнительные прокладки неподвижных соединений вакуумных систем. Широко используют прокладки из резиновых шнуров круглого и прямоугольного сечений (ТУ 38-105108-76).

Для круглых шнуров установлен следующий ряд диаметров, мм: 3; 3,5; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 18; 20; 5; 30. Для шнуров прямоугольного сечения приняты такие номинальные размеры (ширина×высота): 3×3; 5×5; 8×7; 8×8; 8×10; 12×12; 12×15 мм.

В качестве форвакуумных трубопроводов широко используют резиновые трубки, изготавливаемые по ТУ 38-105881-75. Размеры трубок, мм, приведены в табл. 4.15.

Марки вакуумных резин для уплотнительных прокладок и различных формовочных изделий, а также температурный диапазон их применения приведены в табл. 4.16.



## 4.15. Размеры резиновых трубок

Внутренний диаметр	Толщина стенки	Внутренний диаметр	Толщина стенки	Внутренний диаметр	Толщина стенки
3	2	9	3	15	10
	3		4		12
	4		5		13
4	3		6		14
	4		7	18	15
	5		8		16
	6		9		17
5	3	10	4	20	18
	4		5		10
	5		6		12
	6		7		13
	7		8		14
6	3		9	25	15
	4		10		16
	5		12		17
8	3	12	4		18
	4		5	30	20
	5		6		10
	6		7		12
	7		8		25
	8		10		35
			12		

## 4.16. Марки вакуумных резин и температуры их применения

Марки резины	Рабочая температура, К
ИРП-1118	213...323
ИРП-1130	
ИРП-1175	
ИРП-1187	
ИРП-1189	
51-1433	213...473
51-1447	213...333
51-2088	268...343
ИРП-2017	223...323
ИРП-2037	
ИРП-2043	263...423
ИРП-2044	273...323
ИРП-2053	223...373
Buna-N	$T_{\max} = 373 \text{ K}$
Silicone	$T_{\max} = 473 \text{ K}$
Viton	

В прогреваемых высоковакуумных системах применяются резины на основе термостойких фторкаучуков: наибольшая допустимая температура и время выдержки, ч, уплотнительной резины в вакууме при условии наименьшего потока газов с молярной массой  $>44 \text{ кг/моль}$  приведены в табл. 4.17.

## 4.17. Свойства резин на основе термостойких сталей фторкаучуков

Марка резины	Цвет	Температура, К				
		473	503	523	533	573
		Время выдержки, ч				
51-1578	Черный	40...50	1...1,5	0,5	—	
51-1735	Зеленый	90			20...30	0,5...1

Для получения потока газонатекания  $<10^{-10} \text{ м}^3\text{Па/с}$  через контакт рекомендуемый параметр шероховатости металлических поверхностей  $Ra = 0,7 \text{ мкм}$ , а давление в зоне контакта должно быть  $0,4...0,6 \text{ МПа}$  при степени сжатия  $13...15 \%$  для резины 51-1578 и  $1,3...1,7 \text{ МПа}$  при степени сжатия  $10...18 \%$  для резины 51-1735.

Для резины 51-1735 поток газонатекания можно уменьшить прогревом уплотнительного узла до  $473...503 \text{ K}$  с последующим охлаждением до комнатной температуры. При прогреве резиновой прокладки  $> 503 \text{ K}$  может наблюдаться частичное адгезонное схватывание с металлической поверхностью.

## 4.14. КЛЕИ

В вакуумной технике клеи различного типа широко применяют в качестве вспомогательных материалов, а также для получения непрогреваемых вакуумно-плотных соединений.

Для склеивания резин холодным способом, приклеивания резины к металлу, стеклу и другим конструкционным материалам широко используют клей 88-Н (ТУ 38-1051061-82). Недостаток клея 88-Н —

нестойкость к бензину, минеральным маслам. Кремнийорганический клей КТ-30 (ТУ 6-02-760–78) применяют для склеивания вулканизированных резин на основе силиконового каучука и соединения их с металлом, а также для склеивания керамических и стеклянных деталей с металлом. Рабочая температура соединения 213...573 К.

Клей ВК-2 (ТУ 6-05-1214–76) предназначен для склеивания различных сталей, сплавов титана, а также приклеивания к этим металлам неметаллических термостойких материалов, работающих при  $T = 673$  К в течение 250 ч и при  $T = 1273$  К в течение 5 мин. Этот клей используют также для получения уплотнительного материала, работающего при температуре до 623 К. При  $T = 293$  К предел прочности при сдвиге  $\geq 8$  МПа, при  $T = 673$  К  $\geq 3,5$  МПа.

Для склеивания сталей различных марок, сплавов титана, магния, алюминия и химически обработанного ПТФЭ рекомендуется клей К-300-61.

Клей МПФ-1 (ТУ 6-05-1865–78) предназначен для склеивания металлов

между собой и с неметаллическими материалами. Рабочая температура соединения 213...333 К.

Для герметизации межшовного пространства клеесварных соединений из стали, алюминия и других сплавов, а также для склеивания металлов и неметаллов применяют клей ФЛ-4с.

#### 4.15. ЛЕГКОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Легкоплавкие металлы и сплавы используют в вакуумной технике в качестве припоев и уплотнителей для разъемных соединений. В соответствии с этим к их вакуумным и механическим характеристикам предъявляют особые требования. К легкоплавким металлам, удовлетворяющим этим требованиям, относятся галлий, висмут, индий, кадмий, олово, свинец, таллий и цинк. Из большого числа требований, предъявляемых к металлам-уплотнителям, основным является требование недопустимости нарушения состава остаточной газовой среды и загрязнения вакуумных объемов.

#### 4.18. Физические свойства металлов

Показатель	Значение показателя для							
	галлия	висмута	индия	кадмия	олова	свинца	таллия	цинка
Температура, К:								
плавления	302,8	544	429,4	594	504,9	601	576	692,5
кипения	2373	1779	2370	940	2073	2013	1830	1179
$\rho$ , г/см <sup>3</sup> , для металла:								
в твердом состоянии	5,97	9,8	7,36	8,6	7,3	11,3	11,84	7,1
в жидком состоянии	6,09	10,1	7,03	8,0	7,0	10,3	11,35	6,7
Давление пара, Па:								
при температуре плавления	$10 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-13}$	13,3	$2 \cdot 10^{-12}$	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0
при температуре 750 К	$10 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^3$	$10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0



Окончание табл. 4.18

Показатель	Значение показателя для							
	галлия	висмута	индия	кадмия	олова	свинца	таллия	цинка
Удельная теплоемкость при $T = 293 \text{ К}$ , Дж/(кг·К)	336	126	239	321	232	327	303	419
Изменение объема, %	–3	–3,32	2,5	4,74	2,6	3,6	–	6,9
Динамическая вязкость при температуре плавления, Па·с	0,0017	0,0015	0,0015	0,0023	0,0017	0,0011		0,0028
$\alpha \cdot 10^6, \text{ К}^{-1}$ , при $T = 293 \dots 373 \text{ К}$	18,3	12,1	33	–	34	28,3		39,5
Поверхностное натяжение, Н/м:								
расплава	0,735	0,380	0,340	0,560	0,540	0,450		0,760
кристалла на границе с расплавом	–	0,018	–	0,029	0,011	0,012		0,057
кристалла	–	0,39	–	0,62	0,56	0,49		0,86

Из анализа физических свойств металлов (табл. 4.18) следует, что для сверхвысоковакуумных систем по совокупности свойств в качестве металла-уплотнителя с обеспечением герметизации в жидкой фазе можно использовать галлий, индий и олово.

Для исключения влияния вредных примесей желательно использовать металлы высокой чистоты, такие, как олово ОВЧ 000, в котором содержание сурьмы и цинка не превышает  $3 \cdot 10^{-5} \%$  согласно техническим условиям (ГОСТ 860–75). Металл-уплотнитель также должен быть свободен от загрязнений. В связи с этим при пайке или облуживании деталей, работающих в вакууме, применять флюсы не рекомендуется. Индий и галлий не образуют с металлами непрерывных твердых растворов.

Большой растворимостью в индии в твердом состоянии отличаются все металлы, окружающие его в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева: галлий, таллий, олово, свинец, висмут, кад-

мий, ртуть, в меньшей степени цинк. Индий легко растворяется в твердом состоянии в металлах группы меди, а также в никеле, марганце, палладии, титане, олове, свинце и таллии.

Следует отметить, что чистый галлий при высоких температурах обладает высокой химической активностью по отношению к большей части металлов, что делает его непригодным для использования в качестве металла-уплотнителя.

Наряду с чистыми металлами в роли легкоплавких металлов-уплотнителей широко применяют многокомпонентные соединения. Это, как правило, мягкие припои с температурой плавления  $< 673 \text{ К}$ , компонентами которых являются такие металлы, как галлий, индий, медь, олово, серебро.

Сплавы, используемые в качестве уплотнительного материала, должны быть эвтектическими во избежание разделительной диффузии при кристаллизации, существенно изменяющей линейную усадку, усадочные напряжения, прочностные характеристики.

В качестве металла-уплотнителя можно использовать эвтектические сплавы индий–олово, свинец–олово, серебро–свинец, галлий–индий. Из них наиболее широко применяют припой системы олово–индий, обладающие достаточными прочностью и коррозионной стойкостью. Такой сплав с 48,7 % олова образует эвтектику с температурой плавления 390 К; его можно успешно применять для получения уплотнений, основанных на адгезионном взаимодействии с твердой уплотняемой поверхностью.

#### 4.16. ВАКУУМНЫЕ СМАЗКИ И ГЕРМЕТИКИ

В вакуумных системах применяются консистентные смазки, воски, твердосмазочные покрытия и герметики.

*Твердосмазочные покрытия* (ТСП), предназначенные для работы в высоком и сверхвысоком вакууме, в основном изготовляют из дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) без связующего или со связующим материалом. К первому типу относятся ТСП, полученные высокотемпературным термохимическим методом (Димолит) и сформированные в вакууме ионно-плазменным распылением мишени из  $\text{MoS}_2$ ,

ко второму – покрытия марки ВНИИНП. В табл. 4.19 приведены данные о покрытиях типа Димолит, имеющих максимальную толщину  $h_{\text{max}}$ , характеристики ТСП с различными связующими приведены в таблице 4.20.

ТСП на основе дисульфида молибдена имеют различные вакуумные и антифрикционные характеристики. Наилучшими из них обладают покрытия, состоящие из дисульфида молибдена без связующих компонентов.

Такие покрытия получают ионно-плазменным нанесением (ИПН)  $\text{MoS}_2$  в вакууме, что позволяет добиться уникальных антифрикционных характеристик по сравнению с другими покрытиями на основе  $\text{MoS}_2$  (табл. 4.21). Среди главных достоинств этого покрытия можно отметить низкую интенсивность изнашивания (линейный износ  $< 10^{-9}$ ), аномально низкий коэффициент трения скольжения в высоком и сверхвысоком вакууме (до  $f \approx 0,002$ ), работоспособность при высоких температурах (вплоть до 973 К). ТСП на основе ИПН  $\text{MoS}_2$  наиболее эффективно может использоваться в прецизионных парах трения.

4.19. Данные о покрытиях типа Димолит

Покрытие	Фазовый состав	Материал детали	Температура синтеза, К	$h_{\text{max}}$ , мкм	Максимальная рабочая температура, К	Микротвердость, МПа
Димолит-1	$\text{MoS}_2$	Мо	973...1096	80	973 (длительно), 1173 (кратковременно)	450...500
Димолит-2	$\text{MoS}_2 + \text{Pb}$		923...1023	100	1173...1273	800...1000
Димолит-3	$\text{MoS}_2 - \text{ZnS}$		1173	80	673...723	3500...5000
Димолит-4	$\text{MoS}_2 + (\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni})\text{S}$	Высокохромистая сталь	973 К, первая стадия, 400 К, вторая стадия	30	673...873	2000...2500



4.20. Характеристика ТСП с различными связующими

Марка	Наполнитель	Связующие	Область применения
ВНИИНП-209 ВНИИНП-213	MoS <sub>2</sub>	Кремний-органическая смола	В узлах трения при температуре 233...623 К на воздухе, в вакууме при более высоких температурах
ВНИИНП-212		Мочевинно-формальдегидная смола	В узлах трения при температуре 233...523 К на воздухе, в вакууме при более высоких температурах
ВНИИНП-229		Силикат натрия	Подшипники скольжения и качения, неподвижные резьбовые соединения при температуре 233...623 К на воздухе, в вакууме при более высоких температурах
ВНИИНП-230		Эпоксидная смола	Зубчатые зацепления, шарниры при температуре 233...473 К
ВНИИНП-251	MoS <sub>2</sub> , графит	Полиамидная смола	В узлах трения при температуре 233...623 К на воздухе, в вакууме при более высоких температурах
ВНИИНП-504		Смесь органических смол	Узлы трения на воздухе и в вакууме при повышенных температурах
ЭОНИТ-3			

4.21. Антифрикционные характеристики ТСП на основе дисульфида молибдена

Тип ТСП	Вид трения	Коэффициент трения скольжения	Интенсивность изнашивания <sup>1</sup>
Ротационное нанесение MoS <sub>2</sub>	Скольжение и качение	0,1	$I_h = 10^{-8} \dots 10^{-10}$ , $I_g = 5 \cdot 10^{-3}$ г/ч
ВНИИНП-213, -230 и т.д.	Скольжение	0,05	$I_h = 10^{-8}$
Димолит-1, -4		0,03	$I_h = 10^{-8}$ , $I_g = 2 \cdot 10^{-4}$ г/ч, $I_t = 3 \cdot 10^{-3}$ мкм/ч
ИПН MoS <sub>2</sub>	Скольжение и качение	0,002	$I_h = 10^{-9}$ и менее, $I_t = 4 \cdot 10^{-3} \dots 7 \cdot 10^{-4}$ мкм/ч

<sup>1</sup>  $I_h$  – линейная;  $I_g$  – весовая;  $I_t$  – временная.

Важной характеристикой пар трения вакуумного технологического оборудования является коэффициент трения покоя (стоп эффект). Для механизмов с высокой плавностью перемещения и точностью позиционирования (например, работающих в вакууме координатных столов, ма-

нипуляторов, транспортных систем и др.) ТСП на основе ИПН MoS<sub>2</sub> наиболее перспективны.

В табл. 4.22 приведены вакуумные характеристики материалов пар трения: удельный поток  $q_0$  и состав выделяемых газов.





Окончание табл. 4.22

Материал	Способ предварительной обработки поверхности	Темпера- тура, К	$q_0 \cdot 10^4, \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	Состав газов, %						
				H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> O	CS <sub>2</sub>
Покрытие ИПН MoS <sub>2</sub> толщиной 2 мкм на стали 12X18H10T	Отжиг в вакууме 2 ч при 623 К, выдержка в атмосфере 70 с	423...623	14,5...12,0	—	0/45,0	22,0/27,0	22,0/12,7	22,0/12,7	34,0/13,5	—
	Отжиг в вакууме 2 ч при 623 К, выдержка в вакууме 24 ч	623	6,8	28,8		9,6	15,3	46,3		
	Отжиг в вакууме 8 ч при 623 К, выдержка в вакууме 30 ч	773	3,5	38,1	—	11,8	15,6	—	34,5	
	Отжиг в вакууме 10 ч при 623...773 К, выдержка в атмосфере 42 ч		1,6	49,2	6,4	12,1	32,3			
Фторопласт-4	Отжиг в вакууме 8 ч	423...548	4,0...8,0	—						
Трение скольжения стали 40X13 с ТСП	$N = 0 \dots 10^5$ циклов	293	650...180							
	$N = 10^5 \dots 3,7 \cdot 10^6$ циклов		180...210							
Димолит-4 по стали 12X18H10T	$N > 3,7 \cdot 10^6$ циклов		700	6...10	<2	23...27	27...31	—	35...39	—

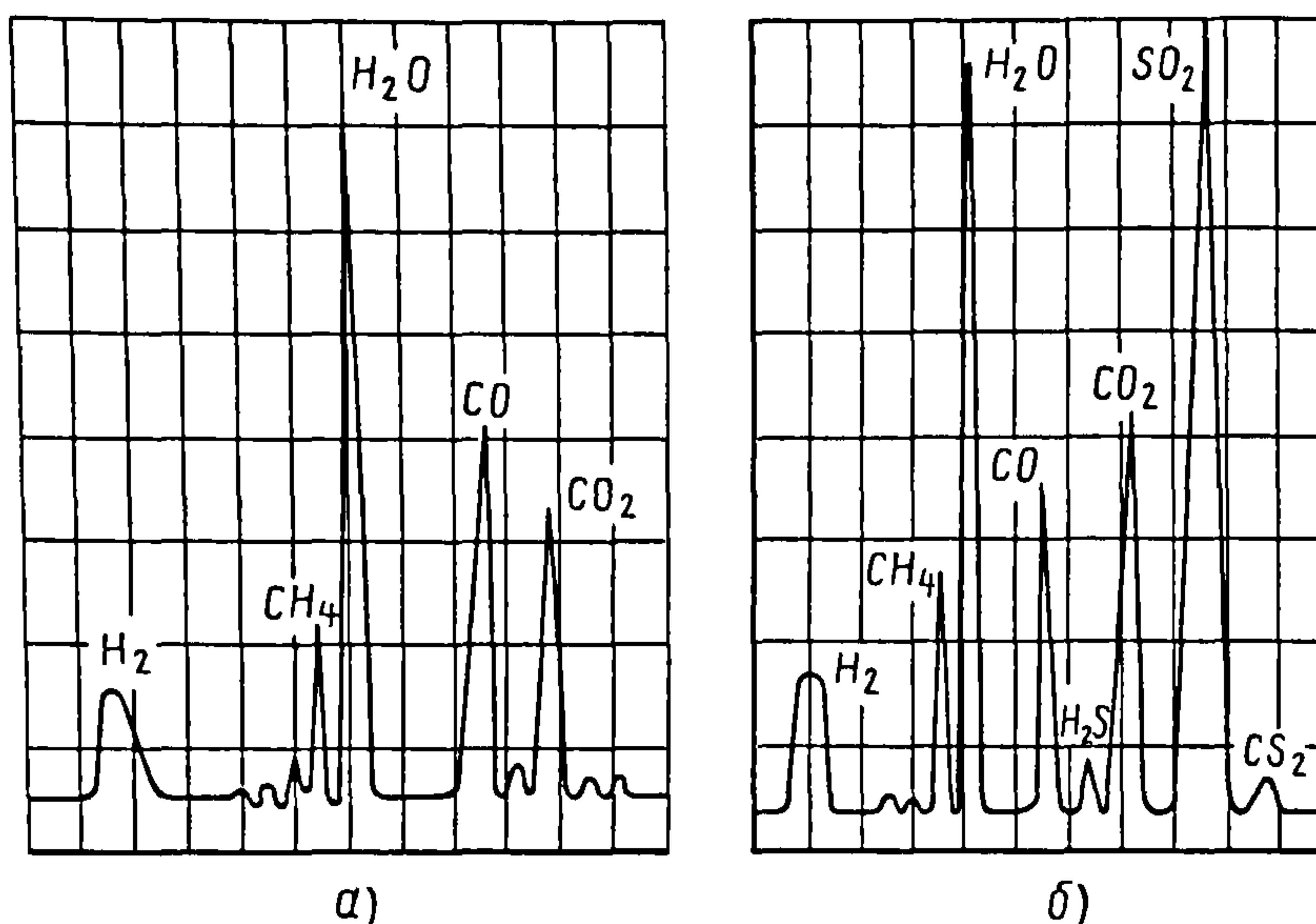


Рис. 4.1 Спектр газовой выделения покрытий на основе  $\text{MoS}_2$ :  
 а – ИПН  $\text{MoS}_2$ ,  $T = 773 \text{ K}$ ,  $t = 1 \text{ ч}$ ; б – Димолит-4,  $T = 623 \text{ K}$ ,  $t = 1 \text{ ч}$

Основными достоинствами ИПН  $\text{MoS}_2$  как ТСП, работающего в вакууме, являются отсутствие даже при  $973 \text{ K}$  в спектре газовой выделения серосодержащих соединений ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CS}_2$ ) (рис.4.1) и малый поток продуктов износа, недопустимых при многих сверх- и высоковакуумных технологических процессах. Спектр газовой выделения покрытия Димолит-4 (химико-термическое формирование на сталях ТСП на основе  $\text{MoS}_2$ ) содержит указанные соединения уже при температуре нагрева  $423 \text{ K}$  (см. рис.4.1).

Показанные достоинства покрытия на основе ИПН  $\text{MoS}_2$  связаны с постоянным стехиометрическим составом, формируемым при росте пленки, так как  $\text{MoS}_2$  распыляется и переносится в подложке в виде молекул. Высокая адгезия покрытия и его малая толщина определяют низкую интенсивность изнашивания и, как следствие, низкий поток генерируемых частиц износа. Дополнительная очистка растущей пленки ионами во время нанесения обеспечивает высокую чистоту покрытия, отсутствие примесей между ба-

зовыми плоскостями кристаллов, что улучшает их взаимное скольжение.

Таким образом, ТСП на основе ИПН  $\text{MoS}_2$  без связующих компонентов наиболее эффективно применяется в подшипниках качения и в малонагруженных прецизионных парах трения скольжения. Для использования такого ТСП в тяжело нагруженных парах трения вакуумных механизмов, например в высоковакуумных затворах, необходима специальная подготовка поверхности.

Одной из особенностей рассматриваемого покрытия является малая толщина (порядка  $1 \text{ мкм}$ ), поэтому актуальна задача повышения долговечности пар трения с такими покрытиями. Для этого в технологический маршрут вводится операция формирования микрокарманов, в которых после нанесения покрытия содержится резерв дополнительной смазки, подпитывающий зону трения после износа основного слоя.

Консистентные смазки и герметики предназначены для улучшения работоспособности механизмов и устройств, ра-



ботающих в вакууме, а также для повышения герметичности разъемных и неразъемных соединений.

Консистентные смазки типа PFPE используются в агрессивных средах, где углеводородные и другие синтетические смазки работают неудовлетворительно. Univac Excellin – высоковакуумные смазки желтого цвета, отличаются хорошими смазывающими характеристиками в вакууме и применяются также для повышения герметичности кольцевых прокладок круглого сечения, соединений резины и металла, стекла и металла, стекла со стеклом. Давление насыщенного пара при 298 К составляет  $10^{-5}$  Па, температура плавления 368...408 К. Вакуумные герметики Univac Inseal служат для уплотнения металлических поверхностей элементов вакуумных систем, контактирующих с водой, маслом, спиртом и неконцентрированными кислотами. Давление насыщенного пара составляет  $10^{-2}$  Па, растворимость в воде < 10 %.

Высоковакуумная силиконовая смазка DC-976 используется и как смазочный материал, и как герметик. Она обладает водостойкостью, химической инертностью, малым газовыделением, может работать при давлении до  $10^{-6}$  Па, высоких и низких температурах.

Инертные высоковакуумные смазки кроме экстремально низкого давления пара отличаются стойкостью к химически активным газам, растворителям, кислотам. Эти смазки удаляются с помощью смеси масла с растворителем.

Марка У VAC-3 применяется для смазывания механических частей, контактирующих в вакууме с агрессивными химикатами и кислородом. Ее рабочая температура 253...473 К. Плотность при 298 К составляет 1,92 г/мл.

Марка ОТ 20 предназначена для смазывания механических частей, например подшипников качения, работающих при малых нагрузках и рабочей температуре 203...373 К. Плотность при 298 К равна 1,92 г/мл.

Марка UT 18 используется для смазывания механических частей оптических и микромеханических систем, работающих при средних нагрузках, где стандартные минеральные и синтетические смазки деградируют под действием температуры и воздушной атмосферы.

Марка RT 15 служит для смазывания механических частей, работающих при экстремально больших нагрузках (800 кг по EP-тесту) в условиях граничного смазывания и рабочей температуре 253...473 К. Плотность при 298 К составляет 1,92 г/мл.

Наиболее распространены смазки марки Apiezon: AP 100 – смесь углеводородного и политетрафторэтиленового (фторопластового) смазочного материала с давлением паров  $8 \cdot 10^{-9}$  Па при 293 К и AP 101 – смазочный материал на основе стеарата лития с давлением паров  $5 \cdot 10^{-4}$  Па при 293 К используются как противозадирные смазки для предотвращения схватывания стеклянных деталей лабораторного оборудования, особенно при наличии растворителей. Удаляются они с помощью протирки мягкой тканью или смывки стеклоочищающими жидкостями. Рабочая температура 283...303 К для AP 100 и 263...423 К для AP 101, нагрузочная способность для обеих смазок 450 кг по EP-тесту.

Консистентная смазка марки Apiezon H работает при температурах от 258...523 К, имеет каучуковую структуру с молекулярной массой 1000 кг/кмоль, давление паров  $2 \cdot 10^{-7}$  Па при 293 К и может использоваться, например, для смазывания стеклянных кранов. Стабильная, инертная, нетоксичная углеводородная смазка легко наносится и удаляется, имеет нагрузочную способность 250 кг по EP-тесту.

Apiezon L – углеводородная смазка без присадок с низким давлением паров, равным  $10^{-8}$  Па. Ее оптимальная рабочая температура 288...298 К, молекулярная масса 1300 кг/кмоль, нагрузочная способность 150 кг по EP-тесту.

Apiezon M с молекулярной массой 950 кг/кмоль имеет самую низкую цену, хорошие смазывающие свойства. Давление паров составляет  $3 \cdot 10^{-7}$  Па при 293 К, диапазон рабочих температур 283...303 К, нагрузочная способность 140 кг по ЕР-тесту.

Apiezon N содержит высокомолекулярные полимерные добавки, что позволяет обеспечивать эффективное смазывание контактирующих поверхностей даже при криогенных температурах. Давление паров составляет  $10^{-7}$  Па при 293 К, диапазон рабочих температур 4...303 К, молекулярная масса 1300 кг/кмоль, нагрузочная способность 150 кг по ЕР-тесту.

Apiezon T – углеводородная смазка с консистенцией каучука применяется для смазки стеклянных кранов, пробок и клапанов при рабочей температуре 273...393 К. Имеет давление паров  $6 \cdot 10^{-7}$  Па.

Воски и герметики Apiezon разработаны для уплотнения неразборных соединений, в том числе испытывающих вибрацию. Wax W имеет рабочую температуру 353 К, Wax W100 – 323 К, Wax W40 – 313 К. Герметик Apiezon Q используется для уплотнения стыков, заполнения отверстий и пазов высоковакуумных систем с максимальной рабочей температурой 303 К.

Герметик Torr Seal готовится к работе без растворителя и используется для герметизации металлов, керамики и стекла при давлении  $\leq 10^{-7}$  Па и температуре 228...393 К.

Смазочные масла и гели NyeTorr (табл. 4.23) используются для механически нагруженных деталей вакуумного оборудования в широком диапазоне температур, при высоких требованиях к точному позиционированию исполнительных механизмов и силе или моменту срабатывания.

#### 4.23. Характеристики смазочных масел и гелей NyeTorr

Характеристика	Гель NyeTorr 5100	Масло NyeTorr 5101	Гель NyeTorr 5200	Масло NyeTorr 5201	Гель NyeTorr 5300	Масло NyeTorr 5301
Рабочая температура, К	219...423	219...423	228...398	228...398	208...523	208...523
Давление пара при 298 К, Па	$10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-8}$

Для смазывания пар трения металл по металлу рекомендуются гель NyeTorr 5100 и масло NyeTorr 5101, для смазывания и герметизации металлических поверхностей с царапинами рекомендуются гель Nye Torr 5200 и масло NyeTorr 5201, гель NyeTorr 5300 и масло NyeTorr 5301 совместимы с пластиками, эластомерами и металлами.

#### 4.17. ГЕТТЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Геттеры, или газопоглотители, применяются для поддержания низкого давления и определенного состава остаточного газа в электровакуумных прибо-

рах, а также в качестве активных элементов в геттерных и геттерно-ионных насосах.

Геттерные материалы характеризуются большой химической активностью при взаимодействии с компонентами воздуха в интервале температур от комнатной и до 473 К.

При падении газового потока  $q_{\text{газ}}$  на поверхность материала происходят одновременно три процесса: отражение, поглощение и пропускание (проницание). При этом падающий на поверхность газовый поток  $q_{\text{газ}}$  преобразуется: в поток отражения  $q_{\text{отр}}$ , поток поглощения  $q_{\text{погл}}$  и поток пропускания  $q_{\text{проп}}$ .



Количественная мера этих процессов определяется безразмерными коэффициентами, которые равны отношению этих потоков к газовому потоку  $q_{\text{газ}}$ : ко-

эффициент отражения  $k_{\text{отр}} = \frac{q_{\text{отр}}}{q_{\text{газ}}}$ , ко-

эффициент поглощения  $k_{\text{погл}} = \frac{q_{\text{погл}}}{q_{\text{газ}}}$  и

коэффициент пропускания  $k_{\text{проп}} = \frac{q_{\text{проп}}}{q_{\text{газ}}}$ .

Очевидно, что сумма этих трех коэффициентов равна единице:  $k_{\text{отр}} + k_{\text{погл}} + k_{\text{проп}} = 1$ .

Материал, у которого высокая поглощающая способность, т.е.  $k_{\text{погл}} \rightarrow 1$ , а  $(k_{\text{отр}} + k_{\text{проп}}) \rightarrow 0$ , называется *геттером*.

Для материала мембранного диффузионного вакуумного насоса необходимо, чтобы коэффициент пропускания  $k_{\text{проп}} \rightarrow 1$ , а  $(k_{\text{отр}} + k_{\text{погл}}) \rightarrow 0$ .

Материал, химически пассивный к компонентам атмосферы остаточных газов, характеризуется коэффициентом отражения  $k_{\text{отр}} \rightarrow 1$ , а  $(k_{\text{погл}} + k_{\text{проп}}) \rightarrow 0$ .

По способу перевода в активное состояние геттерные материалы разделяются на *распыляемые* и *нераспыляемые*.

При рассмотрении физического механизма поглощения газа геттером выясняется, что распыляемые и нераспыляемые геттеры не отличаются друг от друга. При геттерной откачке газ адсорбируется на поверхности материала геттера, последовательно проходя стадии физической и химической адсорбции, затем по диффузионному механизму, проходя стадии образования твердого раствора и химических соединений, поглощается объемом геттерного материала. Поглощение газа происходит последовательно на поверхности и в объеме геттерного материала, причем на поверхности адсорбируется ~ 1 % от всей массы поглощенного газа,

в объеме абсорбируются остальные ~ 99 %. Для увеличения удельной плотности потока поглощения геттеры изготавливаются в виде пористого тела.

Рабочее тело *распыляемого геттера* представляет собой пленку конденсата металлического пара на специально подготовленной поверхности внутри вакуумного объема. Для этого в последний вводится химически пассивный в атмосфере источник атомов кальция, стронция или бария. Химическая пассивность этих элементов достигается путем образования химических соединений. При помещении такого источника атомной эмиссии щелочно-земельных металлов в вакуумный объем благодаря термической диссоциации химического соединения на поверхности образуется необходимое количество эмиссионно-активных атомов, способных перейти в паровую фазу. Моноатомный металлический пар при соприкосновении с холодной поверхностью конденсируется с образованием химически активной тонкой пленки какого-либо щелочно-земельного металла.

Выбор именно щелочно-земельных металлов для создания распыляемых геттеров вызван относительно небольшими значениями тепловых эффектов испарения по сравнению с материалами нераспыляемых геттеров и относительно низкими температурами термической диссоциации химических соединений. Пленка конденсата является химически активной сразу после ее образования. По мере взаимодействия с атмосферой остаточных газов химическая активность пленки снижается, исходная активность возобновляется при повторной конденсации. Возможно также геттерирование газов при непрерывных испарении и конденсации.

Для улучшения сорбционных свойств испарение и конденсацию щелочно-земельных металлов иногда проводят в атмосфере молекулярного азота. Если в вакууме образуется плотная пленка, то наличие азота способствует получению пористой, сорбционно более активной пленки.



*Нераспыляемый геттер* представляет собой пористое тело разнообразной формы, получаемое различными способами. Используются геттеры с пористостью 15...70 %. Обычно их изготавливают холодным прессованием или свободной засыпкой с последующим спеканием порошков, а также нанесением химически активных частиц на подогреваемую током сопротивлением тугоплавкую фольгу.

Нераспыляемый геттер, как правило, после изготовления химически инертен. В химически активное состояние его приводят нагреванием внутри вакуумного объема (первое активирование) до температуры, значительно превышающей рабочую. Физический механизм активирования состоит в образовании монослоя металла на поверхности геттера, полностью или частично лишенного газовых примесей. Этот монослой образуется при нагревании за счет встречных диффузионных потоков в объеме нераспыляемого геттера: адсорбированные на поверхности газовые компоненты перемещаются от поверхности в объем геттера, атомы химически активного металла – из объема на поверхность. При сорбции по мере снижения химической активности металла геттера операцию активирования повторяют.

Таким образом, при создании геттерного насоса применяют геттерный материал с монослоем химически активного металла, который можно возобновлять в процессе работы геттера, а отличие распыляемого геттера от нераспыляемого состоит в способе создания поверхностного монослоя химически активного металла и в индивидуальных эксплуатационных характеристиках.

В технике геттерирования применяются два способа создания химически активной поверхности металла:

- термическое активирование пассивной исходной поверхности металла;
- получение новой металлической поверхности испарением и конденсацией.

*Физико-химические основы геттерирования* базируются на термодинамике физического и химического связывания газа с поверхностью металла и в его объеме.

*Физическое связывание с поверхностью* – это физическая адсорбция, обусловленная действием сил Ван-дер-Ваальса, являющихся результатом последующих взаимодействий.

*Дисперсионное взаимодействие* определяется силами притяжения между неполярными молекулами. Эти силы возникают, когда быстро изменяющаяся электронная плотность в одной частице (флюктуирующий дипольный момент) индуцирует дипольный момент в другой частице. В результате взаимодействия флюктуирующего и индуцированного дипольного моментов наблюдается притяжение между частицами.

*Поляризационное взаимодействие* возникает в случае, если одна из взаимодействующих частиц обладает дипольным моментом (например, атом на поверхности металла), а собственный дипольный момент другой частицы равен нулю (например, атом инертного газа).

*Ориентационное взаимодействие* определяется силами притяжения между полярными частицами, например полярной газовой молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{CO}$  и т.д., и полярным атомом на поверхности металла. Энергия взаимодействия  $U_0$  зависит от дипольных моментов  $\mu$  взаимодействующих частиц. Единица измерения дипольного момента – дебай ( $D$ ),  $1D = 3,333 \cdot 10^{-30}$  Кл·м.

Одним из весьма важных результатов физической адсорбции газов на металлах является снижение работы выхода электрона по сравнению с исходной поверхностью.

Уменьшение работы выхода прямо пропорционально дипольному моменту газовой частицы  $-\Delta\phi = k\mu$  и зависит от поверхностной концентрации адсорбированных атомов, которую учитывает коэффициент  $k$ .



Электрофизические характеристики газов, металлов и химических соединений представлены в табл. 4.24–4.28.

#### 4.24. Энергия диссоциации двухатомных молекул неполярных газов

	Молекулы	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
D <sub>0</sub>	эВ/ат	4,478	6,2	9,76	5,12
	кДж/моль	432,1	598,2	941,7	494

#### 4.25. Энергия диссоциации двухатомных молекул полярных газов

D <sub>0</sub>	Газы	CH	CN	CO
	эВ/ат	3,51	7,75	11,09
	кДж/моль	338,9	747,8	1070,1
D <sub>0</sub>	Газы	NH	NO	OH
	эВ/ат	3,5	6,5	4,4
	кДж/моль	337,7	627,2	424,6

#### 4.26. Адсорбция газов на поверхности металлов

Группы	Металлы	Газы						
		O <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
{A}	Ca, Sr, Ba, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe	ХА	ХА	ХА	ХА	ХА	ХА	ХА
{B <sub>1</sub> }	Ni	ХА	ХА	ХА	ХА	ХА	ХА	ФА
{B <sub>2</sub> }	Rh, Pd, Pt	ХА	ХА	ХА	ХА	ХА	ФА	ФА
{C}	Al, Mn, Cu, Au	ХА	ХА	ХА	ХА	ФА	ФА	ФА
{D}	K	ХА	ХА	ФА	ФА	ФА	ФА	ФА
{E}	Mg, Ag, Zn, Cd, In, Si, Ge, Sn, Pb, As, Sb, Bi	ХА	ФА	ФА	ФА	ФА	ФА	ФА
{F}	Se, Te	ФА	ФА	ФА	ФА	ФА	ФА	ФА

Условные обозначения: ХА – хемосорбция, ФА – физическая адсорбция.

#### 4.27. Распыляемые геттеры

Состав	Компоненты	Характер реакции распыления	Стабильность	Температура начала распыления, К
Альбани	BaAl (50 %) + Ni (50 %)	Экзотермический	+	1053...1093
Бати С	BaAl (50 %) + Ti (50 %)			1113...1153
Бати НС	BaAl (40 %) + Ti (60 %)		–	1063...1123
Альбанини	Альбани (95 %) + Fe <sub>3</sub> Ni (5 %)		+	1063...1103
Барий чистый	Ba	Эндотермический	–	1163...1173
Бати паста на органическом биндере	–			1133...1173

#### 4.28. Нераспыляемые геттеры

Состав	Компоненты	Концентрация, %	Состава	Компоненты	Концентрация, %
Титан пористый	Титан	100	Механическая смесь (тройная смесь «Э»)	Циаль	30
Сплав циаль	Цирконий	84		Титан	60
	Алюминий	16		Алюминий	10
Механическая смесь (тройная смесь «С»)	Цирконий	30	Механическая смесь ЦЕ-ЦР	Цирконий	60
	Титан	60		Сплав мш-металл + алюминий	40
	Алюминий	10			

**Химическое связывание с поверхностью**

Химическая активность молекулярных газов проявляется только при диссоциации молекулы на атомы. Это относится к кислороду, азоту, оксидам углерода, воде, углеводородам и т.д. В связи с этим еще одной важной геттерной характеристикой является энергия  $E$  связи атомов в молекуле.

Для отрыва атома от молекулы необходимо затратить энергию диссоциации. Для двухатомных молекул энергия связи и энергия диссоциации равны:  $E = D$ .

Для многоатомных молекул эти характеристики могут существенно отличаться. Так, последовательный отрыв атомов водорода в молекуле метана требует следующих затрат энергии:  $\text{H}_3\text{C}-\text{H}$ ;  $\text{H}_2\text{C}-\text{H}$ ;  $\text{HC}-\text{H}$  и  $\text{C}-\text{H}$  соответственно 435,1; 457,7; 430,1 и 338,9 кДж/моль.

Средняя энергия связи  $\text{OH}$  в метане равна 415,5 кДж/моль или 4,31 эВ/ат. Здесь следует заметить, что в невозмущенной молекуле метана энергия каждой связи  $\text{C}-\text{H}$  будет равна именно 415,5 кДж/моль. Но как только оторвется один атом  $\text{H}$ , образуется радикал  $\text{CH}_3$ , в котором произойдет реорганизация связей (перераспределение электронной плотности между новой системой связей), на что требуется дополнительная энергия — энергия реорганизации  $E_R$ . Это дополнение и отличает экспериментально определяемую величину энергии диссоциации  $D$  от энергии связи  $E$ , т.е.  $D = E + E_R$ .

Химическое связывание газов металлами возможно тогда, когда энергия диссоциации связи атомов газа и металла в металлической кристаллической фазе  $D_0^{M-T}$  будет больше половины энергии диссоциации свободной газовой молекулы:  $D_0^{M-T} > D_0/2$ . В справочной литературе энергия диссоциации свободной газовой молекулы чаще всего приводится для 0 К и обозначается  $D_0$  (см. табл. 4.24 и 4.25).

Значения энергии диссоциации металлических фаз внедрения  $D_0^{M-T}$ , кДж·моль<sup>-1</sup>, для титана и ванадия располагаются в ряд:

$\text{Ti}-\text{H}$ : 243;  $\text{Ti}-\text{C}$ : 473;  $\text{Ti}-\text{N}$ : 473;  $\text{Ti}-\text{O}$ : 668;  $\text{V}-\text{H}$ : нет данных;  $\text{V}-\text{C}$ : 464;  $\text{V}-\text{N}$ : 481;  $\text{V}-\text{O}$ : 621.

Титан и ванадий способны геттерировать все упомянутые газы, так как во всех случаях  $D_0^{M-T} \geq D_0/2$ .

Классификация металлов по способности к хемосорбции газов — основных компонентов вакуумной атмосферы, представлена в табл. 4.26.

Для хемосорбции наиболее эффективны щелочно-земельные металлы, а также титан, ванадий, хром и железо.

**Физическое связывание в объеме**

Для повышения удельных скоростей взаимодействия газов с металлами при нормальных и повышенных температурах геттеры изготавливают в виде пористых тел различной формы. Поры представляют собой пустоты, сообщающиеся друг с другом во всем объеме металла (сквозная пористость). Существует также вероятность образования некоторого числа замкнутых пор.

При взаимодействии газов с пористыми металлами возможны два механизма поглощения:

1) поглощение газа пористым металлом путем заполнения пор. При этом сорбционная емкость геттера равна сумме емкости пор и емкости, адсорбированного слоя на свободной поверхности;

2) поглощение газа пористым металлом вследствие взаимодействия со стенками пор в объеме пористого тела и на свободной поверхности. При этом сорбционная емкость геттера равна суммарному объему металла пористого тела.

По первому механизму реализуется геттерирование инертных газов — гелия, неона, аргона, криптона и ксенона. Геттерирование инертных газов пористым металлом происходит в две стадии: физической адсорбции и капиллярной конденсации.

Химически активные газы: молекулярный кислород, молекулярный водород, углеводороды и др. — взаимодействуют с



пористыми металлами по второму механизму, образуя твердые растворы и химические соединения с металлом стенок пор.

Кроме того, для некоторых относительно узких интервалов температур и давлений молекулярный азот, монооксид углерода и некоторые другие газы проявляют одновременно свойства инертных и химически активных газов. Они способны накапливаться и в порах, и в металлических стенках пор.

Пористое тело характеризуется средним диаметром пор  $d_n$ , см, удельной поверхностью  $S_{уд}$ ,  $\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ , и удельным объемом пор  $V_n$ ,  $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$ . Если считать, что очертания пор можно аппроксимировать цилиндром, то по классификации Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) поры диаметром  $d_n \leq 2$  нм относятся к микропорам, при  $d_n = 2 \dots 50$  нм существуют мезопоры, при  $d_n \geq 50$  нм – макропоры.

Нижняя граница размеров макропор является пределом появления капиллярной конденсации. Последняя состоит в ожижении газа в пористых телах. Она происходит вследствие того, что давление газа над вогнутым мениском жидкости при смачивании стенок пор меньше, чем давление насыщенного газа над плоской поверхностью при той же температуре.

На внутренней поверхности макропор может происходить моно- или полимолекулярная адсорбция. Из-за относительно большого размера макропор, которые по своей природе мало отличаются от свободной поверхности геттера, капиллярная конденсация происходит с чрезвычайно малыми скоростями и сорбционная емкость определяется в основном площадью внутренней поверхности.

Кроме того, макропоры выполняют функцию транспортного пространства в объеме пористого геттера. Можно предположить, что из-за отсутствия капиллярной конденсации сечение макропор не уменьшается при адсорбции. Заполнение пор газом происходит по двум механиз-

мам: поверхностной диффузии и кнудсеновской диффузии.

При переносе газа по механизму кнудсеновской диффузии молекулы перескакивают от одной стенки поры к другой и после соударений со стенкой диффузно отражаются с вероятностью направления полета, определяемой законом косинусов.

На поверхности мезопор происходят моно- и полимолекулярная адсорбции, завершающиеся объемным их заполнением ожиженным газом по механизму капиллярной конденсации. Мезопоры также выполняют функцию транспортного пространства в объеме пористого геттера. Однако наличие капиллярной конденсации приводит к уменьшению сечения пор при адсорбции.

Третья разновидность – наиболее мелкие поры, или микропоры, линейные размеры которых соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул. В чистых металлах к микропорам относятся межзеренные границы, в сплавах – межзеренные и межфазные границы.

Особенностью заполнения микропор газами в пористых металлических геттерах является то, что часть межфазных границ подвижна – это границы роста фазы химического соединения или твердого раствора при геттерировании химически активных газов.

Сорбционная емкость при физической адсорбции в объеме пористого геттера соответствует суммарному объему пор.

#### *Химическое связывание в объеме*

Химически адсорбированные на поверхности металлов атомы атмосферы остаточных газов являются химически активными, способными к образованию химических соединений с металлами. Из хемосорбированного состояния в химическое соединение атомы пересходят по механизму образования и роста зародышей металлидной фазы – химическим соединениям металлов с газовыми компонентами (гидриды, карбиды, нитриды и оксиды).



При образовании сплошных слоев металллов на поверхности металлов дальнейшее поступление газовых атомов к фронту реакции происходит по диффузионному механизму.

Сорбционная емкость при химическом связывании газа металлом соответствует суммарному объему металла и зависит от вида химического взаимодействия.

При образовании кальцием, стронцием, барием, титаном и ванадием сплавов внедрения с водородом, углеродом, азотом и кислородом необходимо учитывать тепловые эффекты взаимодействия в термодинамической системе «металл–газ». В соответствии со следствием закона Гесса тепловой эффект химической реакции равен сумме теплоты образования получающихся веществ за вычетом суммы теплоты образования исходных веществ. Так, например, теплота, кДж·моль<sup>-1</sup>, выделяющаяся при образовании оксида кальция CaO, составляет 635,1, оксида бария BaO 556,6<sup>1</sup>, оксида титана TiO<sub>2</sub> 943,9.

Далее будут рассмотрены диаграммы фазового равновесия двойных сплавов систем Ca, Sr, Ba, Ti, V с H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C.

**Растворы внедрения газовых компонентов с металлами кальцием, стронцием, барием, титаном и ванадием.** Атомы газовых компонентов имеют особо малые радиусы (H, C, N, O) и могут образовывать твердые растворы, внедряясь в подходящие по размерам пустоты кристаллических решеток.

Атомы углерода, кислорода и азота обычно довольно легко внедряются в октаэдрические пустоты плотноупакованных структур, особенно в ГЦК\*. Растворимость их в ОЦК\*\* кристаллах, как правило, намного ниже. Водород, атомы которого отличаются наименьшим размером, может занимать в металлах как тетраэдрические, так и октаэдрические позиции и часто проявляет высокую раство-

римность в металлах с ОЦК структурой (β-Ti, β-Zr, V). В случае превышения «критического» значения отношения атомных размеров элемента внедрения (X) и растворителя (A), равного  $r(X)/r(A) = 0,59$ , образование твердых растворов внедрения резко затрудняется (правило Хегга).

### Гидриды

Переходные металлы образуют с водородом так называемые металлические гидриды. Образование бинарных фаз установлено для Pd, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta и Cr. Палладий и ванадий поглощают водород при комнатной температуре, остальные металлы – только при нагревании.

Большинство металлических гидридов имеет широкий интервал гомогенности. Структура гидридов состава MeH<sub>(1-x)</sub> основана на гексагональной плотной упаковке, содержащей водород в октаэдрических пустотах. Металлы с ГЦК-решеткой образуют гидриды MeH<sub>(2-x)</sub> с водородом в тетраэдрических позициях, а металлы подгруппы титана образуют гидриды MeH<sub>2</sub> с искаженной ОЦК-решеткой металла.

В системе сплавов кальций–водород (рис. 4.2) реализуются пять фазовых превращений. При температуре 1163 К и атомной доле водорода 16 % осуществляется реакция жидкий раствор (Ж) + CaH<sub>2</sub> ↔ ↔ (β-Ca). Превращение при 1053 К является полиморфным (α ↔ β)-переходом CaH<sub>2</sub>. При температуре 873 К и атомной доле водорода 7,3 % образуется γ-фаза по реакции (β-Ca) + CaH<sub>2</sub> ↔ γ; при температуре 633 К и атомной доле водорода 1,2 % γ-фаза распадается по эвтектидной реакции γ ↔ (α-Ca) + CaH<sub>2</sub>. Максимальная растворимость водорода в β-CA (ОЦК-структура) составляет 16 атомных долей, %, при температуре 1163 К, в α-Ca (ГЦК-структура) она незначительна.

Водород хорошо растворим в обеих модификациях стронция и, кроме того, образует гидрид SrH<sub>2</sub>. В интервале температур 1128...1093 К гидрид стронция претерпевает полиморфное превращение.

\* Гранецентрированный куб.

\*\* Объемно-центрированный куб.



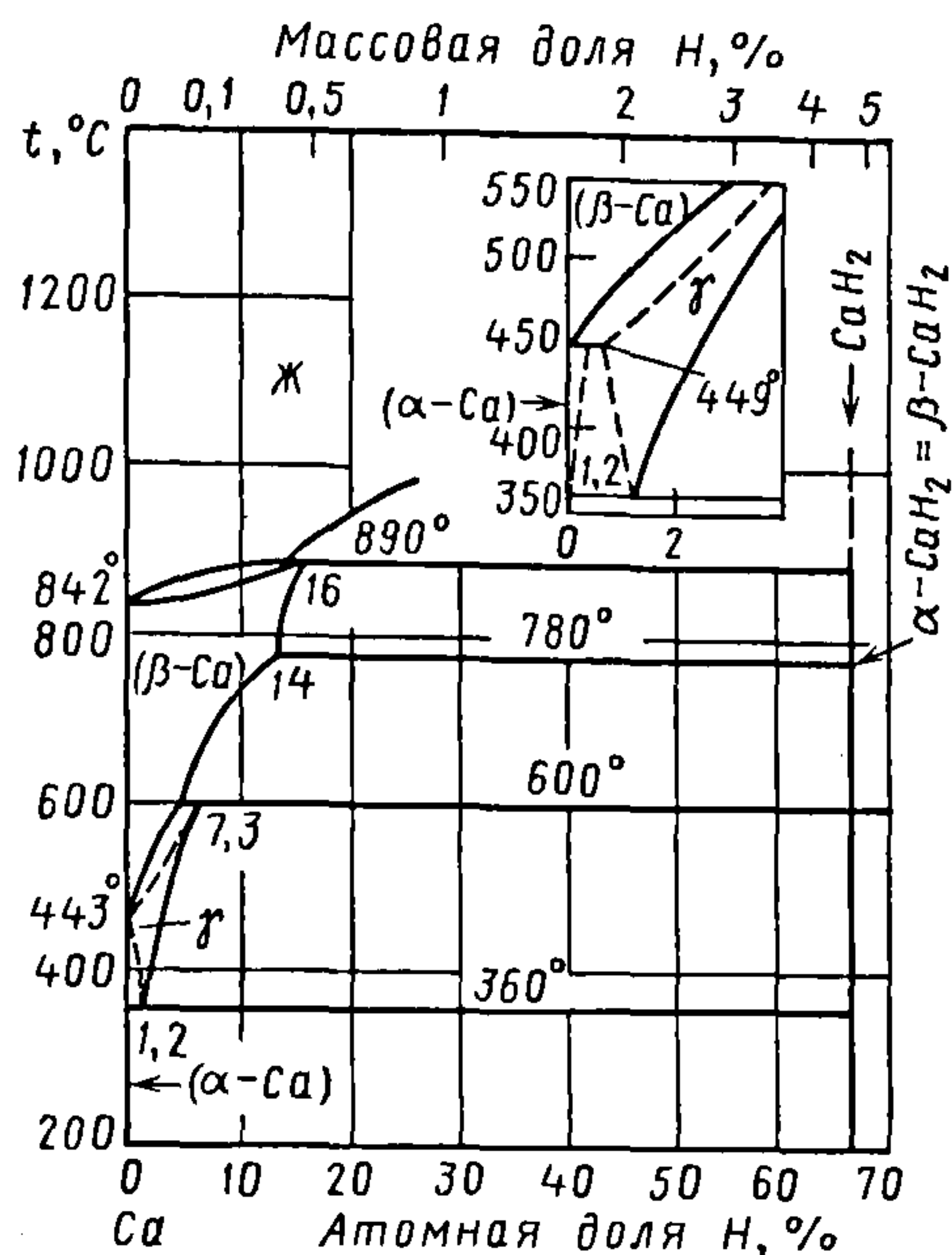


Рис. 4.2. Фазовая диаграмма равновесия кальций-водород

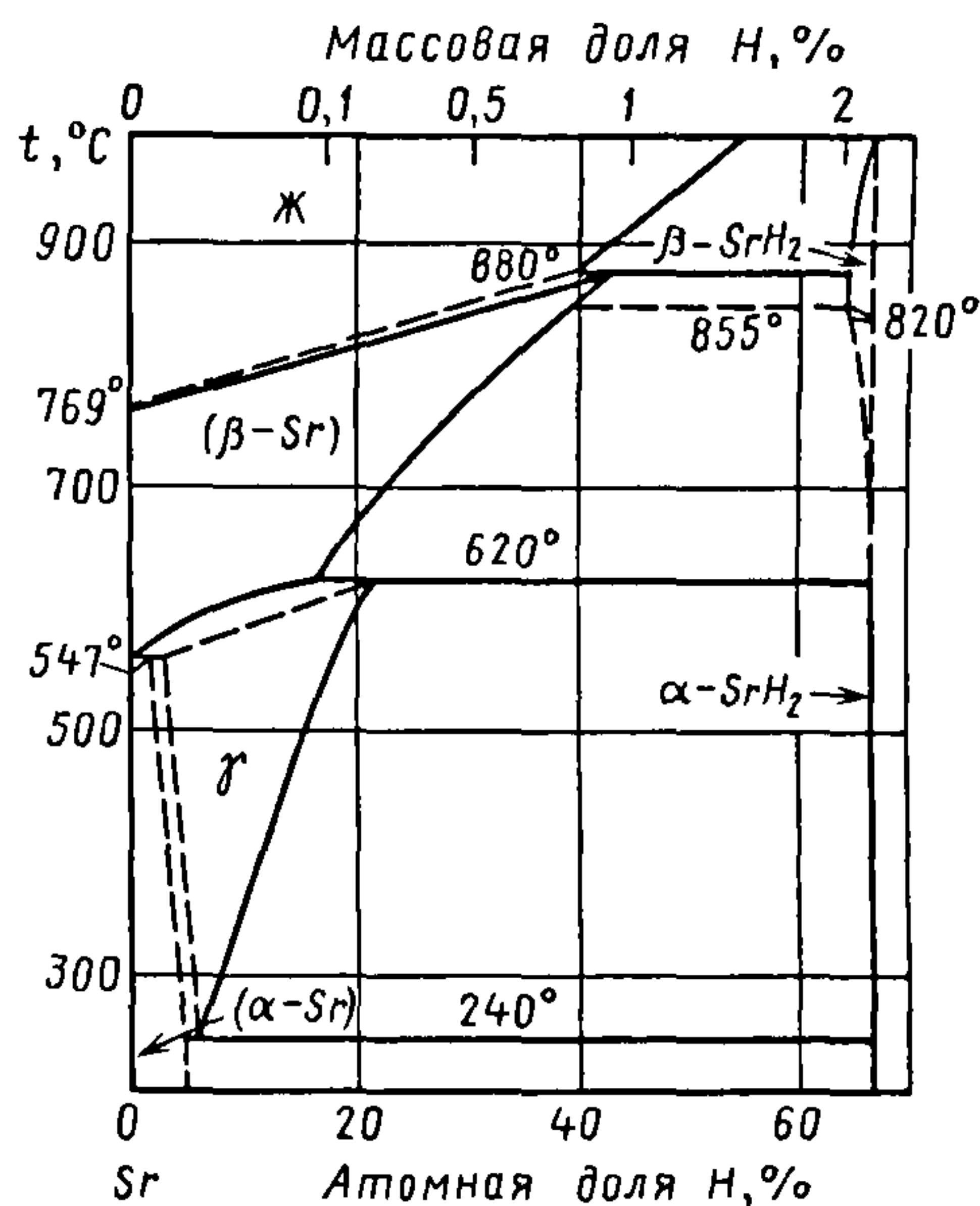


Рис. 4.3. Фазовая диаграмма равновесия стронций-водород

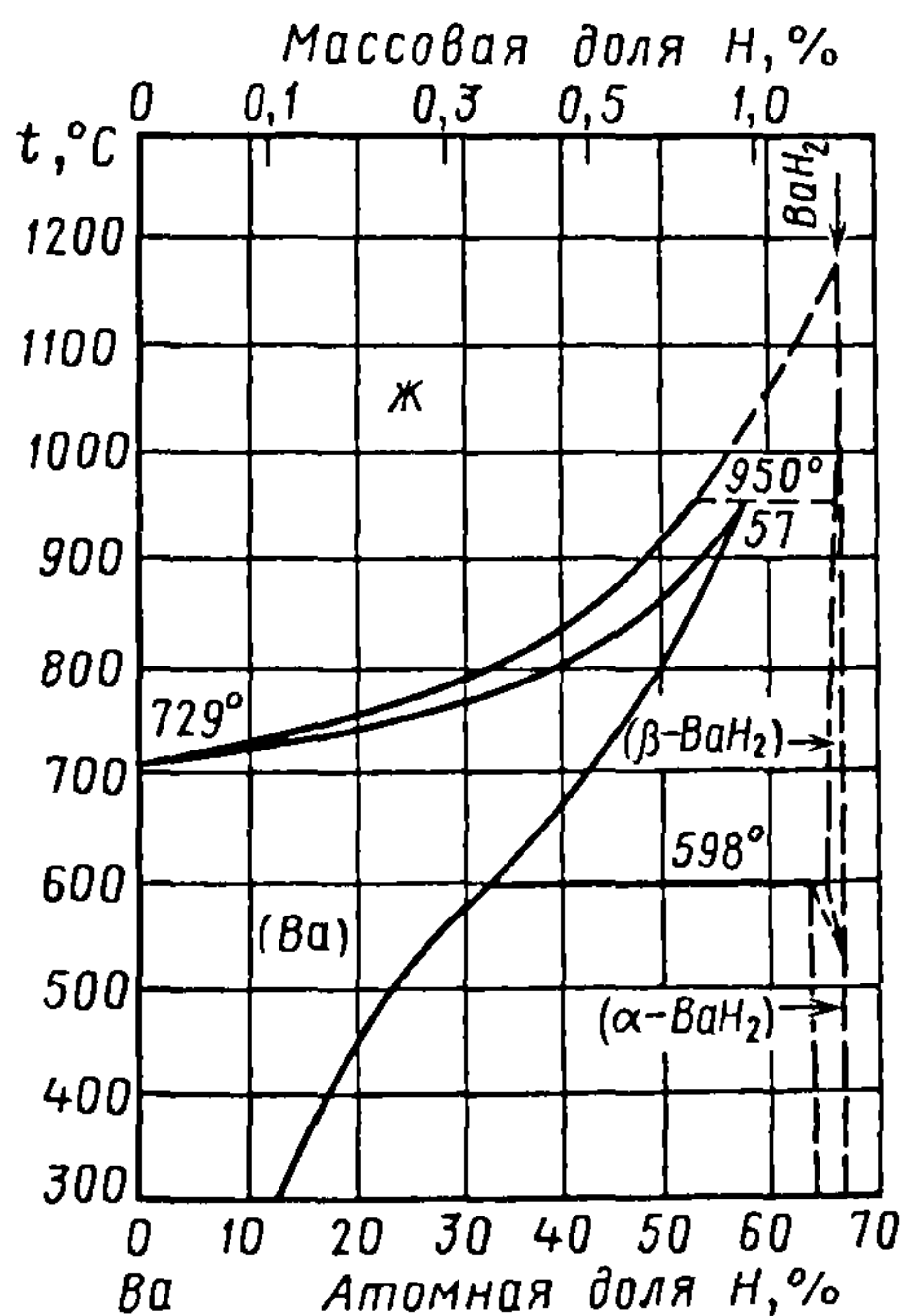


Рис. 4.4. Фазовая диаграмма равновесия барий-водород

Низкотемпературная модификация  $\alpha\text{-SrH}_2$  имеет ромбическую структуру. Фазовые равновесия в системе стронций-водород представлены на рис. 4.3.

В системе сплавов барий-водород гидрид  $\text{BaH}_2$  существует в двух модификациях. Низкотемпературная модификация гидроксида бария  $\alpha\text{-BaH}_2$  имеет ромбическую структуру, а высокотемпературная модификация  $\beta\text{-BaH}_2$  — кубическую. Фазовые равновесия в системе барий-водород представлены на диаграмме рис. 4.4.

В системе сплавов титан-водород максимальная растворимость водорода в  $\alpha\text{-Ti}$  составляет 6,7 атомной доли, %. При взаимодействии водорода с титаном кроме образования твердых растворов  $\alpha$  происходит появление фазы  $\text{TiH}_{1,5...2,0}$  переменного состава, которая при температурах  $> 310\text{ K}$  имеет кубическую структуру, а ниже этой температуры — тетрагональную. Фазовые равновесия в системе титан-водород представлены на диаграмме рис. 4.5.

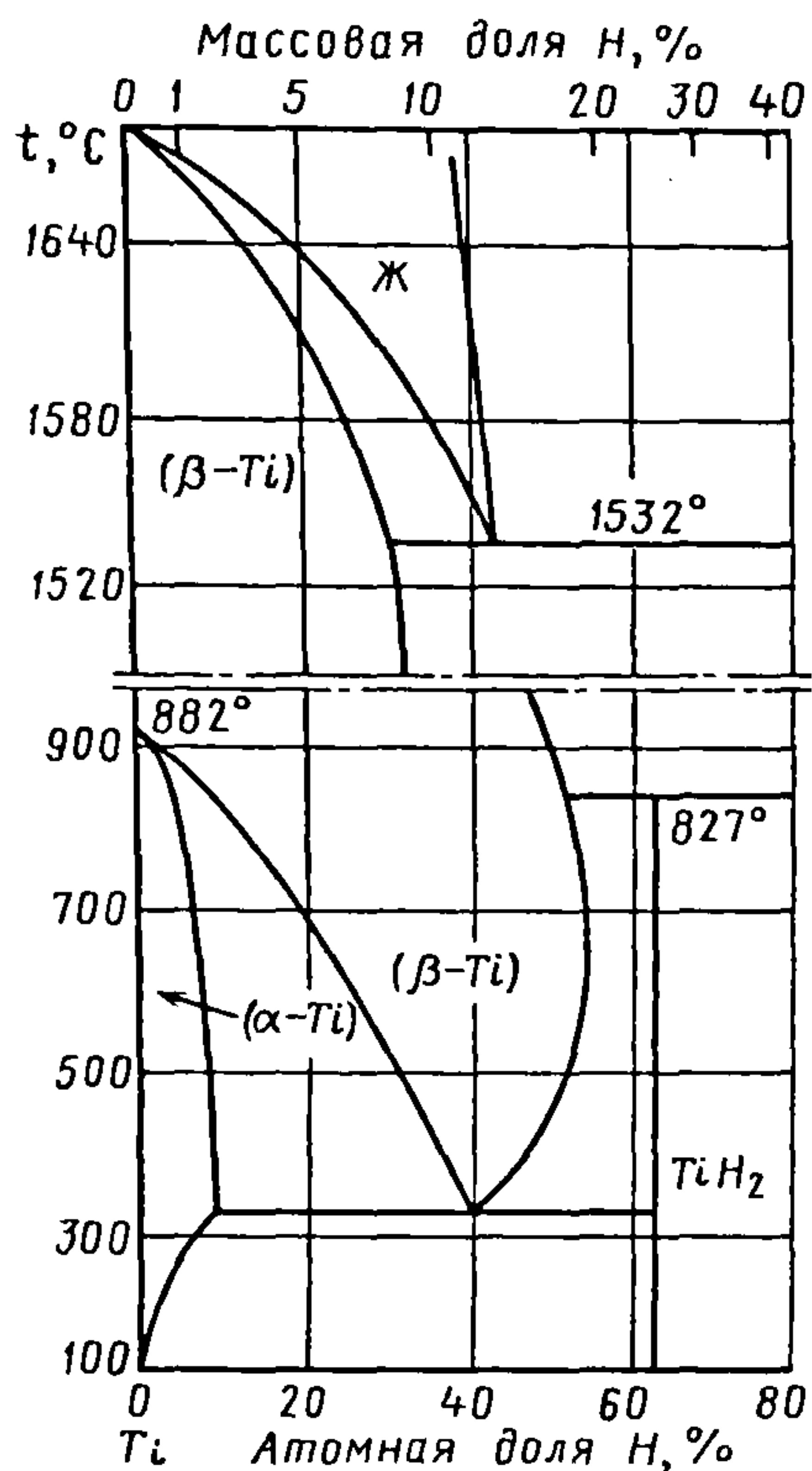


Рис. 4.5. Фазовая диаграмма равновесия титан-водород

В системе сплавов ванадий-водород установлен ряд превращений: образование  $\epsilon$ - и  $\beta$ -фаз соответственно при 470 и

446 К, эвтектоидный распад  $\epsilon$ -фазы на  $(\alpha+\beta)$ -фазу при 437 К и перитектоидное образование  $\delta$ -фазы из  $(\eta + \epsilon)$ -фазы при 222 К. Фазовые равновесия в системе ванадий-водород представлены на диаграмме рис. 4.6.

#### Оксиды

Высокая электроотрицательность кислорода ведет к тому, что в химических соединениях в хорошем приближении его можно представить как ион  $\text{O}^{2-}$ . Его электронные состояния образуют валентную зону, в то время как  $s$ -состояния катионов металла расширяются в зону проводимости, в обычных условиях пустую. Что же касается  $d$ -состояния переходного металла, то из-за большого расстояния между катионами образуется либо очень узкая зона  $d$ -типа, либо состояние  $d$ -типа оказывается вообще локализованным на атомах металла.

Если расстояние (по энергии) между дном зоны проводимости и  $d$ -уровнями переходного металла достаточно велико, получается типичный ионный кристалл-диэлектрик. Иногда, однако, ширина зоны проводимости оказывается достаточной, чтобы энергия  $d$ -состояния оказалась выше ее дна. При этом происходит «перетекание» электронов с  $d$ -уровней в зону проводимости и оксид ведет себя как металл, например  $\text{TiO}$ .

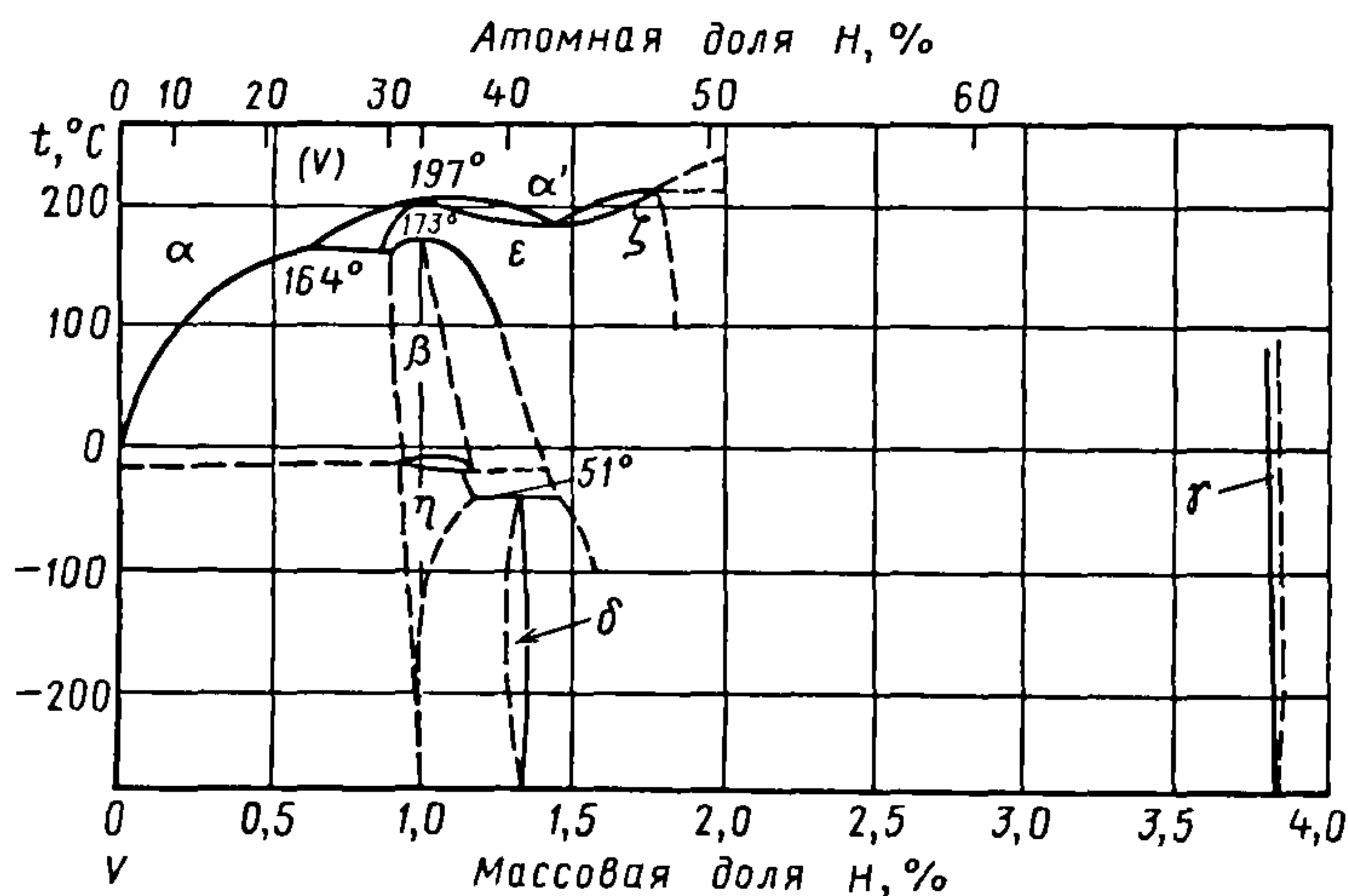


Рис. 4.6. Фазовая диаграмма равновесия ванадий-водород



Фазовые равновесия в системе кальций–кислород представлены на рис. 4.7, где показаны два варианта фазовой диаграммы при давлении кислорода 0,1 МПа эвтектического типа: в одном случае с монотектикой и расслоением компонентов (Ca + CaO) в жидком состоянии (I), в другом – без монотектики и расслоения (II). Температура плавления эвтектики Ca + CaO определена равной ~1112 К, в эвтектическом сплаве атомная доля кислорода 0,3 %, при температуре 1623 К растворимость кислорода в жидком кальции составляет 10 атомных долей, %. В системе кальций–кислород установлено существование двух стабильных фаз: оксида кальция CaO с температурой плавления 2886 К и CaO<sub>2</sub>.

В системе равновесия стронций–кислород установлено существование соединений: SrO с температурой плавления 2693 К и SrO<sub>2</sub>.

В системе равновесия барий–кислород выявлен ряд химических соединений: оксида бария BaO с температурой плавления 2290 К и пероксида бария BaO<sub>2</sub>.

Фазовые равновесия в системе титан–кислород представлены на диаграмме

рис. 4.8. Кислород обладает значительной растворимостью в α-Ti, резко повышая при этом температуру полиморфного превращения в титане. При 1993 К протекает перитектическая реакция  $\text{Ж} + \alpha\text{-Ti} \leftrightarrow \beta\text{-Ti}$ . Максимальная растворимость кислорода в β-Ti составляет 8 атомных долей, %, при 1993 К. Температура плавления твердого раствора кислорода в β-Ti достигает максимума, равного 2158 К, при атомной доле кислорода 24 %.

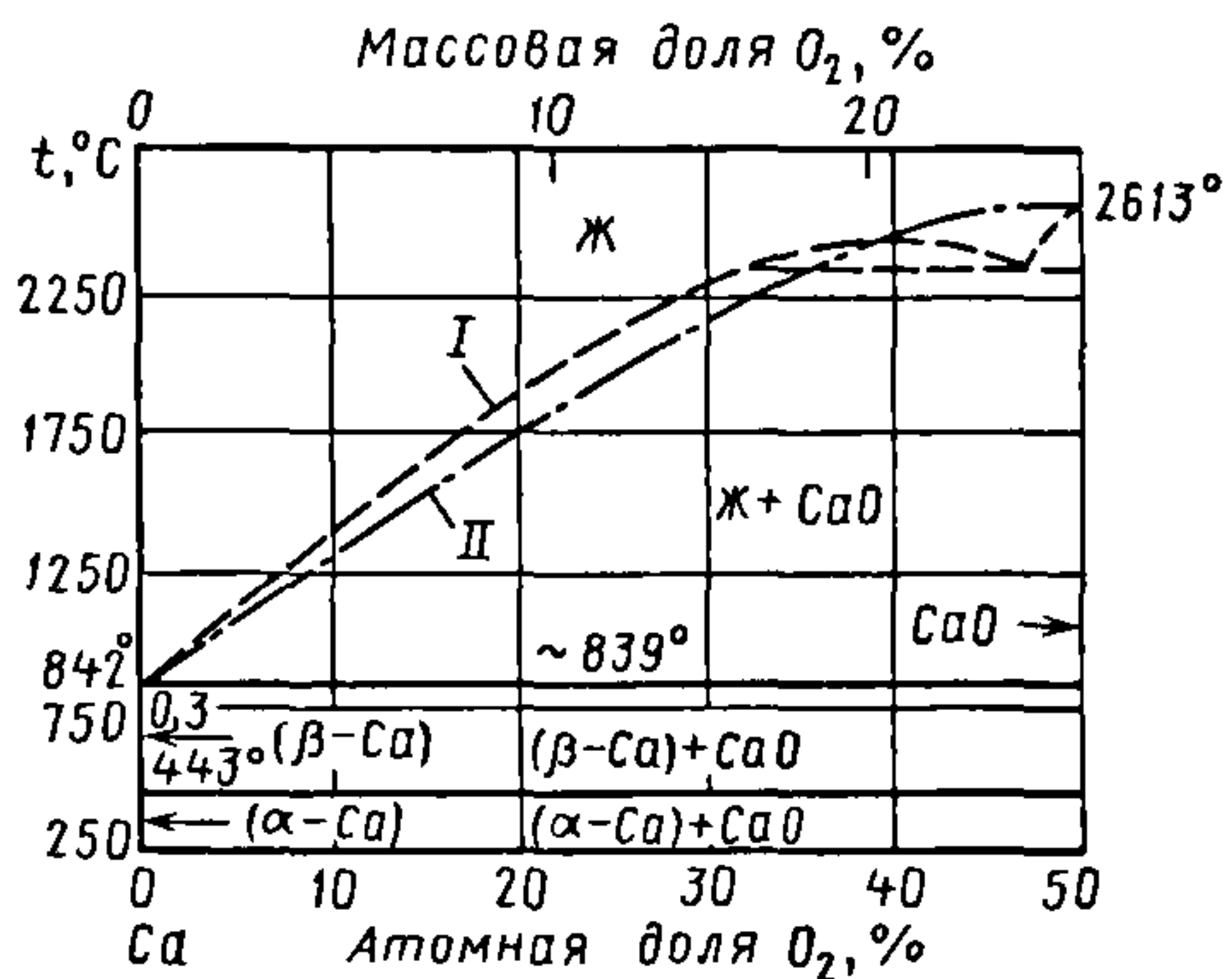


Рис. 4.7. Фазовая диаграмма равновесия кальций–кислород

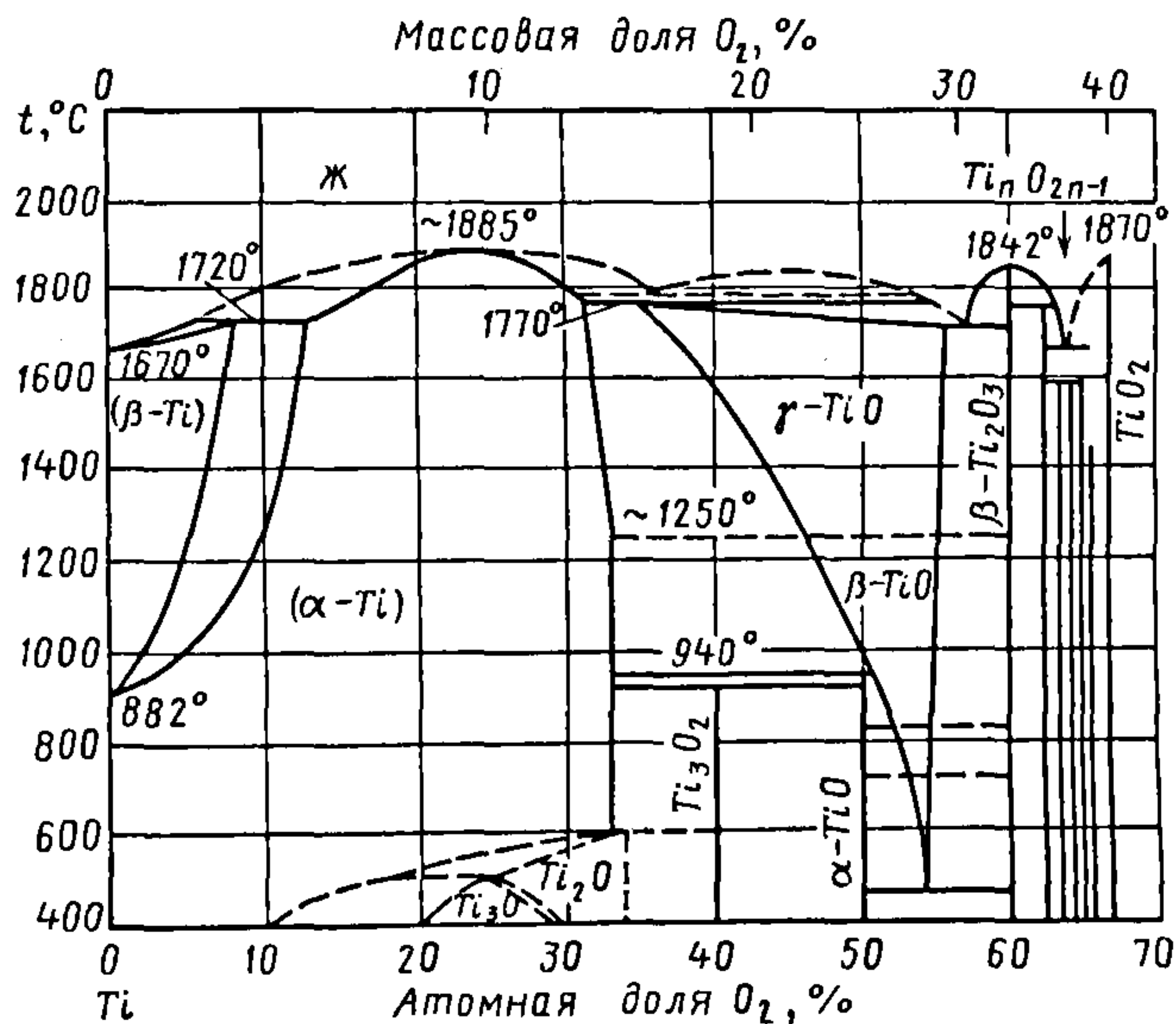


Рис. 4.8. Фазовая диаграмма равновесия титан–кислород





Фазовые равновесия в системе кальций–азот представлены на диаграмме рис. 4.10. Кальций взаимодействует с азотом уже при комнатной температуре, образуя субнитрид  $\text{Ca}_2\text{N}$ , при нагреве в атмосфере азота образуется нитрид  $\text{Ca}_3\text{N}_2$ . Кристаллизация эвтектики  $\beta\text{-Ca}+\text{CaN}$  происходит при температуре 1053 К и содержании азота ~1,9 атомной доли, %.

В системе сплавов стронций–азот установлено образование шести соединений:  $\text{Sr}_2\text{N}$ ,  $\text{Sr}_8\text{N}_5$ ,  $\text{Sr}_3\text{N}_2$ ,  $\text{SrN}$ ,  $\text{Sr}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Sr}(\text{N}_3)$ , причем реакция взаимодействия стронция с молекулярным азотом начинается при температуре 653 К.

В системе сплавов барий–азот установлено существование пяти химических соединений:  $\text{Ba}_2\text{N}$ ,  $\text{Ba}_3\text{N}_2$ ,  $\text{Ba}_3\text{N}_4$ ,  $\text{BaN}_2$ ,  $\text{Ba}(\text{N}_2)_3$ .

Фазовые равновесия в системе титан–азот представлены на диаграмме рис. 4.11. Азот относится к группе элементов, значительно растворяющихся в  $\alpha\text{-Ti}$  и резко повышающих температуру ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ )-полиморфного превращения титана. Азот, растворяясь в титане, повышает не только температуру его полиморфного превращения, но и температуру плавления сплавов. При атомной доле азота ~35 % и температуре 1373 К образуется нитрид  $\text{Ti}_2\text{N}$  ( $\epsilon$ -фаза), при температуре 3563 К – кубический нитрид  $\text{TiN}_x$  ( $\delta$ -фаза).

В системе сплавов ванадий–азот (рис. 4.12) установлены две промежуточные фазы:  $\beta\text{-V}_2\text{N}_{1-y}$  и  $\delta\text{-VN}_{1-x}$ . При температуре  $< 793$  К существует упорядоченная низкотемпературная фаза  $\delta'\text{-VN}_{1-x}$  (стехиометрический состав  $\text{V}_{32}\text{N}_{36}$ ). Предельная растворимость азота в ванадии возрастает от атомной доли 2,6 % при 773 К до атомной доли 10,7 % при 1773 К.

В системе сплавов кальций–углерод выявлено существование соединения  $\text{CaC}_2$  с температурой плавления 2433 К. Соединение  $\text{CaC}_2$  имеется в четырех полиморфных модификациях, стабильных в следующих температурных интервалах:  $\text{CaC}_2$  (I) 25...723 К,  $\text{CaC}_2$  (II) 298 К и

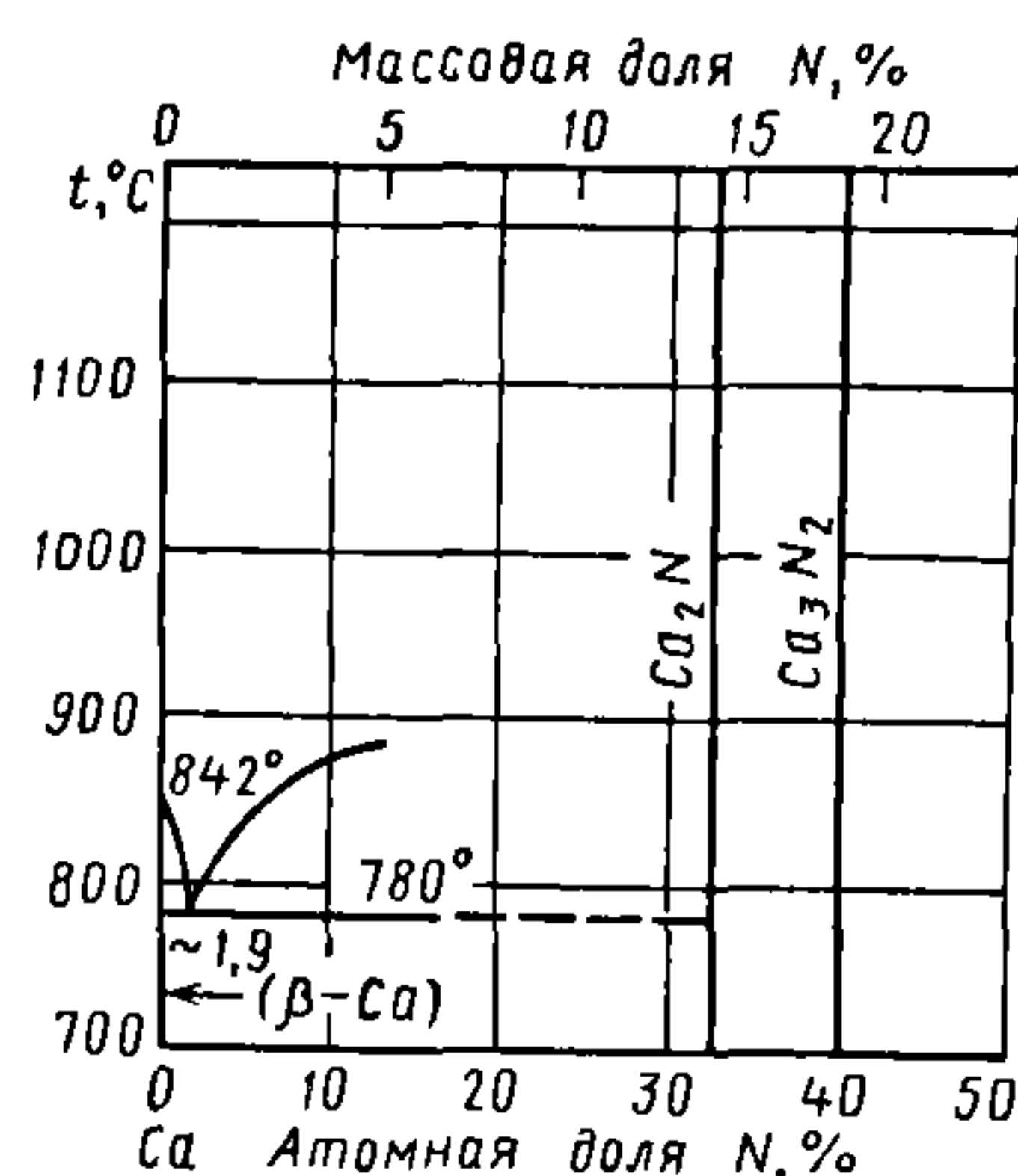


Рис. 4.10. Фазовая диаграмма равновесия кальций–азот

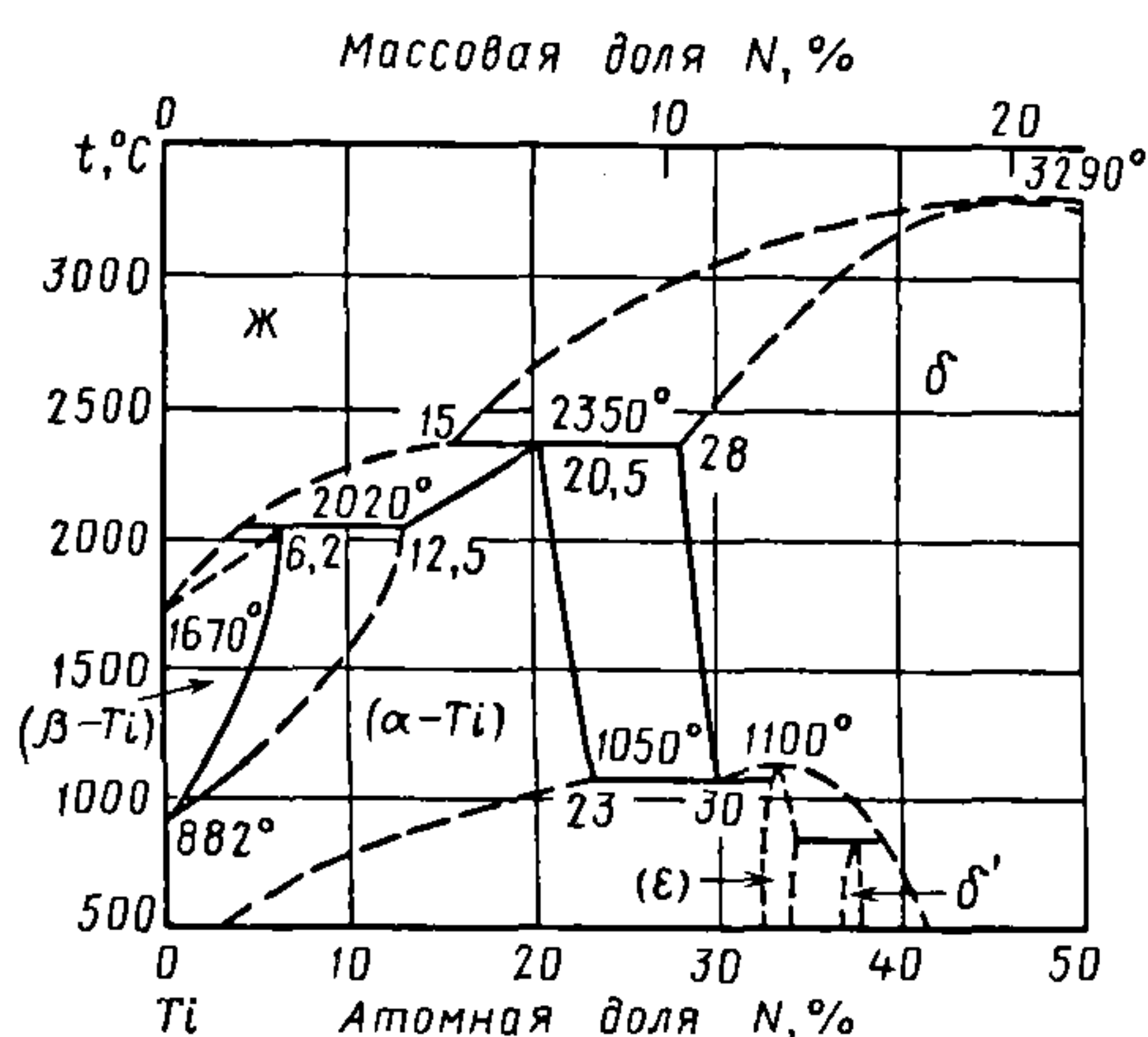


Рис. 4.11. Фазовая диаграмма равновесия титан–азот

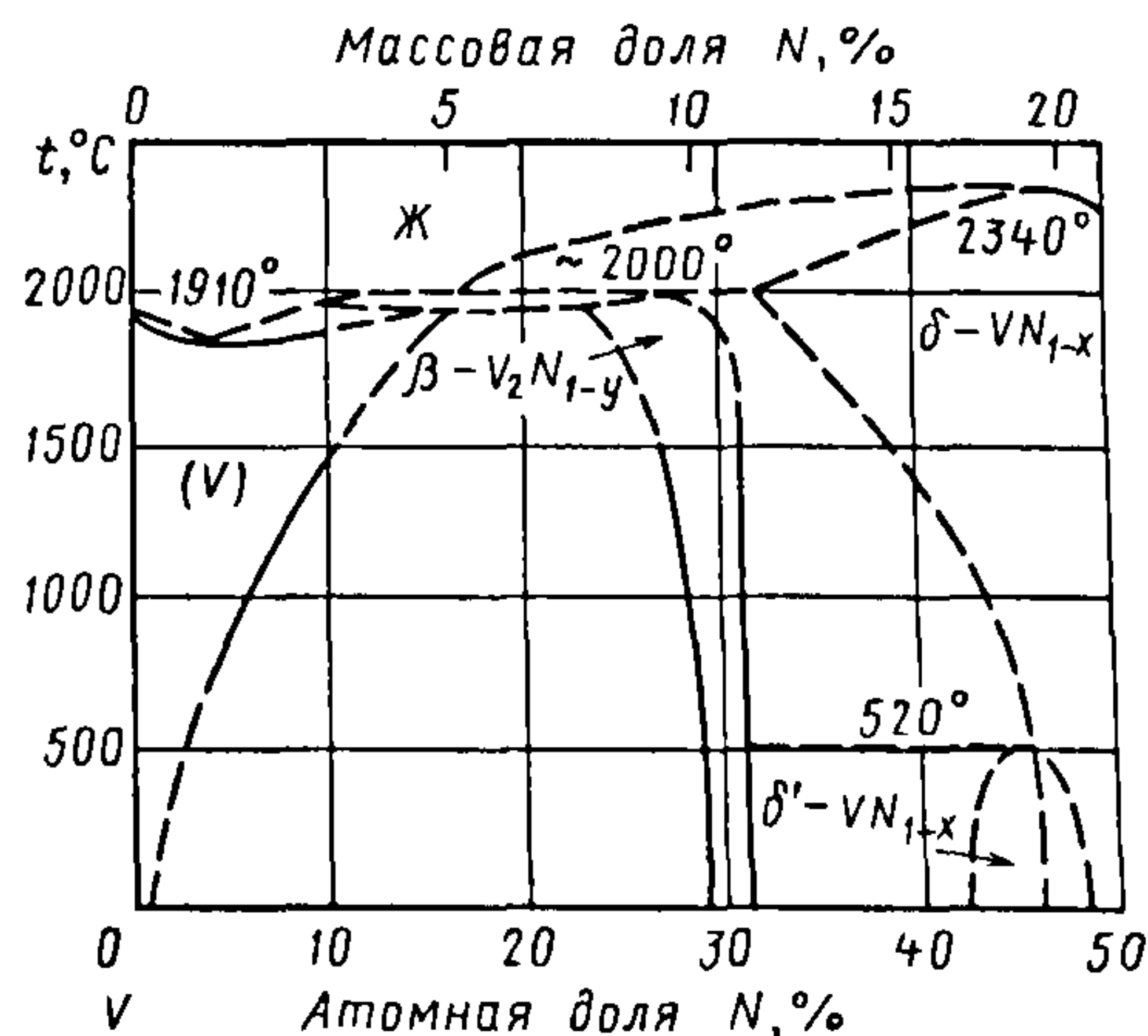


Рис. 4.12. Фазовая диаграмма равновесия ванадий–азот

> 523 К,  $\text{CaC}_2$  (III) 623...723 К,  $\text{CaC}_2$  (IV) 708...773 К.

В системе сплавов стронций–углерод установлено наличие соединения  $\text{SrC}_2$ , существующего в трех полиморфных модификациях. Высокотемпературная модификация стабильна при температуре 643 К.

В системе сплавов барий–углерод зафиксировано три соединения:  $\text{BaC}_2$ ,  $\text{BaC}_6$  и  $\text{BaC}_8$ .

В системе сплавов титан–углерод (рис. 4.13) обнаружено существование одного соединения  $\text{TiC}(\delta)$  с температурой плавления 3346 К. Растворимость углерода в титане при эвтектической температуре составляет 0,55 атомной доли, %. Наличие углерода повышает температуру ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ )-превращения титана от 1155 до 1193 К (температуры перитектоидной реакции образования  $\alpha\text{-Ti}$ ). Растворимость углерода в  $\beta\text{-Ti}$  при температуре 1193 К равна 0,5 атомной доли, %, а в  $\alpha\text{-Ti}$  –

2 атомным долям, %. При температуре 863 К в углеродной подрешетке карбида титана  $\text{TiC}$  происходит упорядочение в интервале составов  $\text{TiC}_{0,46} \leftrightarrow \text{TiC}_{0,60}$  [ $(\delta \leftrightarrow \delta')$ -превращение].

В системе сплавов ванадий–углерод (рис. 4.14) обнаружено существование двух соединений:  $\text{VC}_{1-x}(\delta)$  и  $\text{V}_2\text{C}(\beta)$ . Растворимость углерода в ванадии при 973 К составляет 0,13 атомной доли, %. В соединении  $\text{V}_2\text{C}$  установлены три полиморфные модификации. Низкотемпературная модификация  $\beta_p$  стабильна при температуре < 1073 К.

Для описания адсорбционно-десорбционных взаимодействий в системе твердое тело–газ применяются два различных способа. В первом случае измерения степени превращения  $\alpha$  при изменении времени  $\tau$  проводятся при постоянной температуре, во втором – при возрастании температуры по линейному закону.

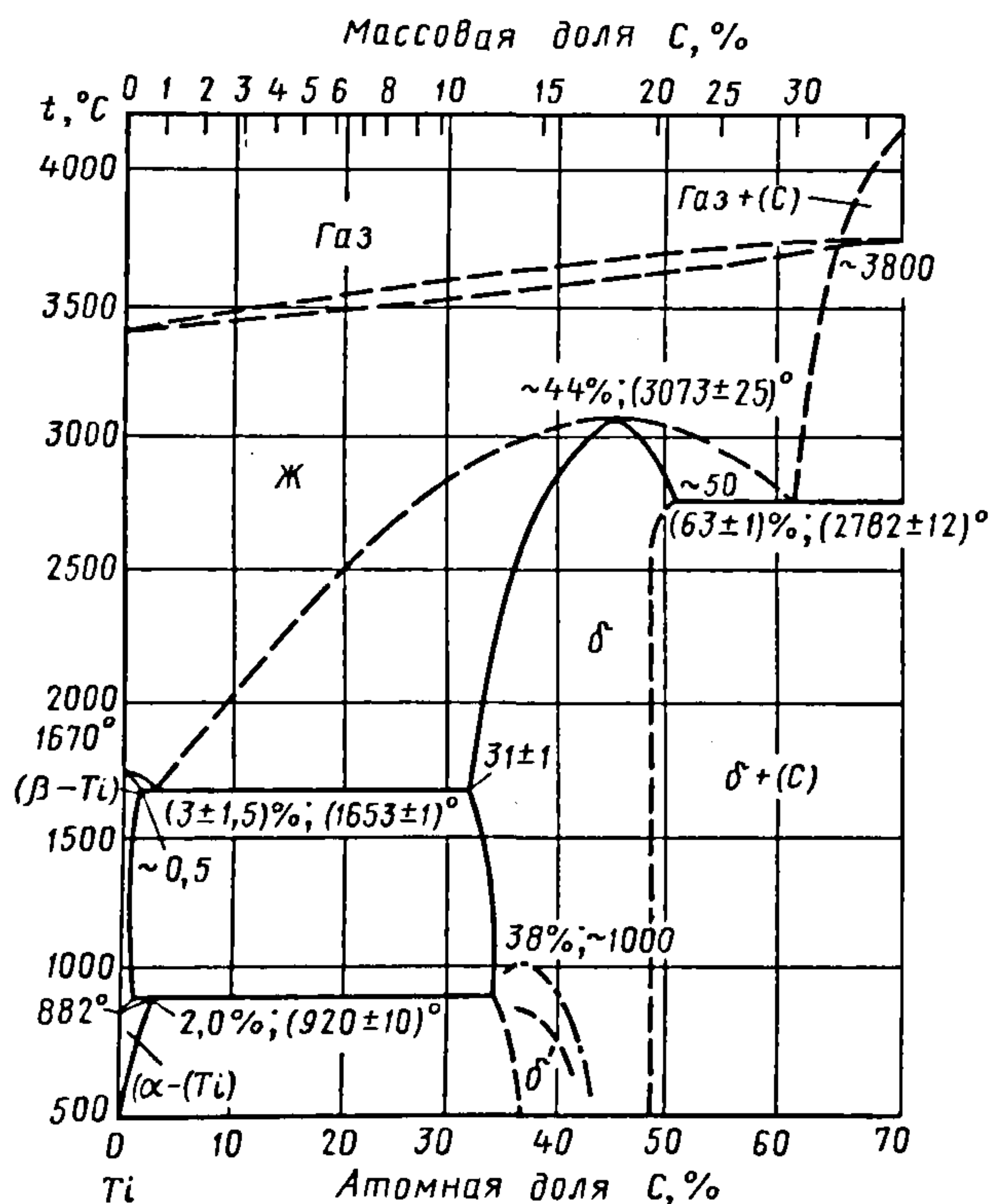
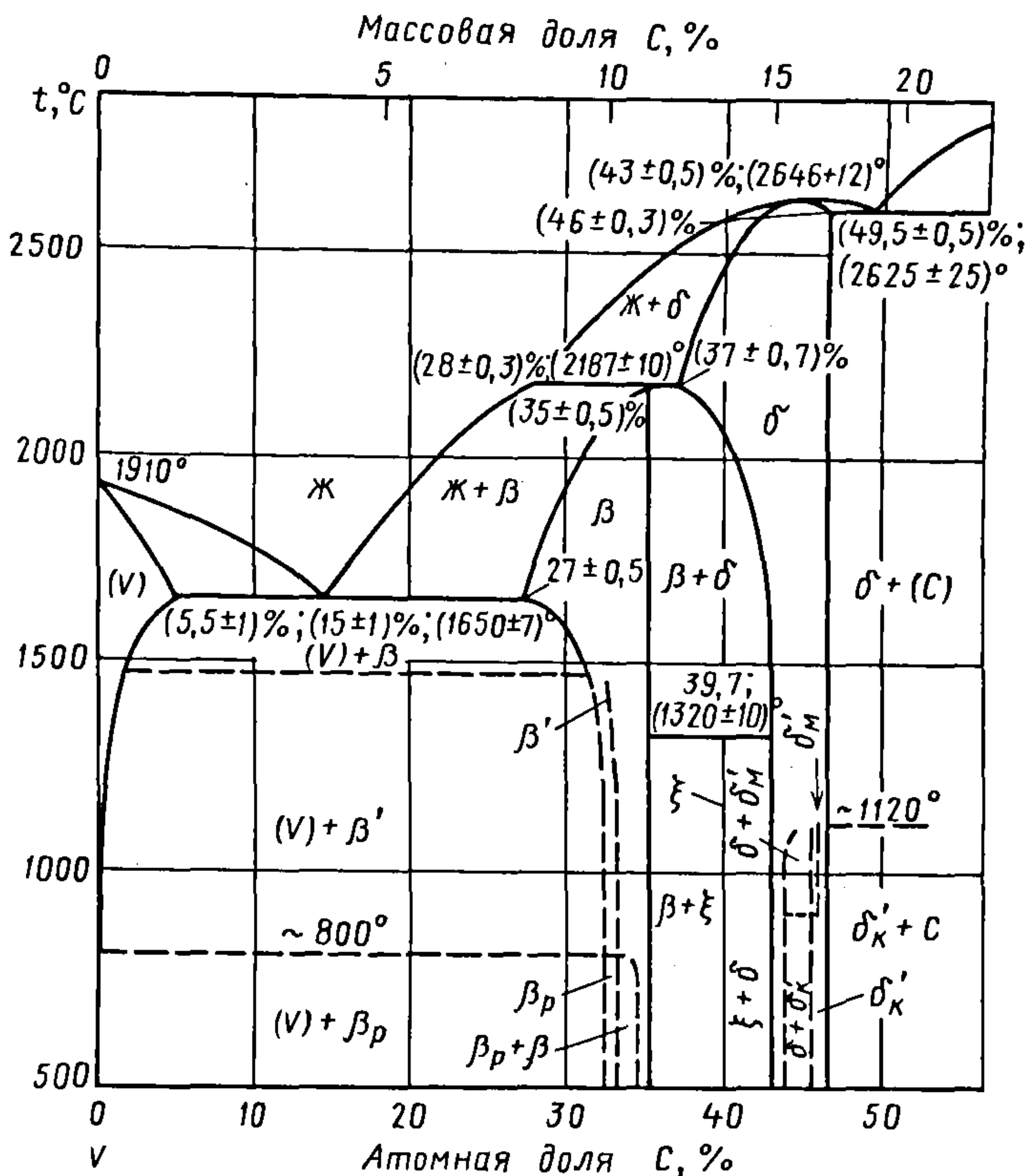


Рис. 4.13. Фазовая диаграмма равновесия титан–углерод



Рис. 4.14. Фазовая диаграмма равновесия ванадий-углерод:  
Ж – жидкий раствор;  
 $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\xi$  – твердая фаза



В любом твердофазном процессе скорость определяющей стадии может контролироваться или диффузией, или химической реакцией. Известны также промежуточные режимы и переходные области между диффузионными и химическими механизмами процесса.

Характерный вид кривых  $\alpha = f(\tau)$  для изотермических условий рассматривают на примере обобщенной кривой "степень превращения"  $\alpha$  от "приведенного времени"  $\tau$ . Значение времени здесь приведены к масштабу  $\tau_{0,5} = 1$  при  $\alpha = 0,5$  (рис. 4.15).

Различные участки кривой могут изменяться в широком интервале значений. Некоторые из них могут быть пренебрежимо малыми или отсутствовать полностью. Точки на кривой  $\alpha = f(\tau)$ : A – начальный процесс; B – индукционный период; C – период ускорения; D – точка пе-

региба; достигаемая при максимальной скорости процесса; E – период замедления; F – завершение реакции.

Направление химической реакции в термодинамической системе металл-газ характеризуется термодинамическими константами геттерирования. При выборе пары «металл геттера-откачиваемый газ»

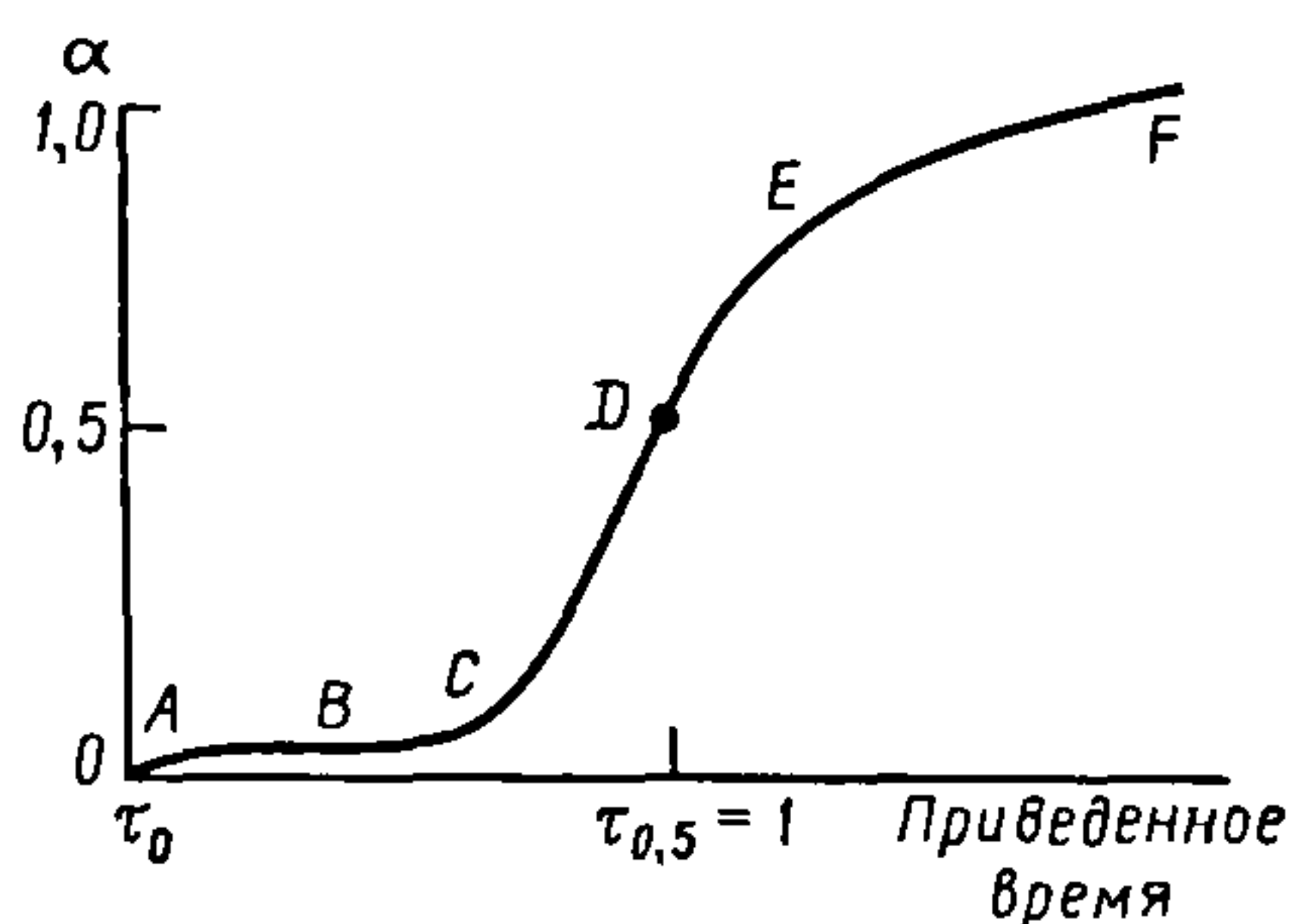


Рис. 4.15. Обобщенная кривая степень превращения  $\alpha$  – "приведенное время"

при данной температуре и давлении газа необходимо определить возможность образования той или иной фазы и сравнить энергию диссоциации газовой молекулы с энергией связи предполагаемой фазы.

К термодинамическим константам геттерирования относятся:

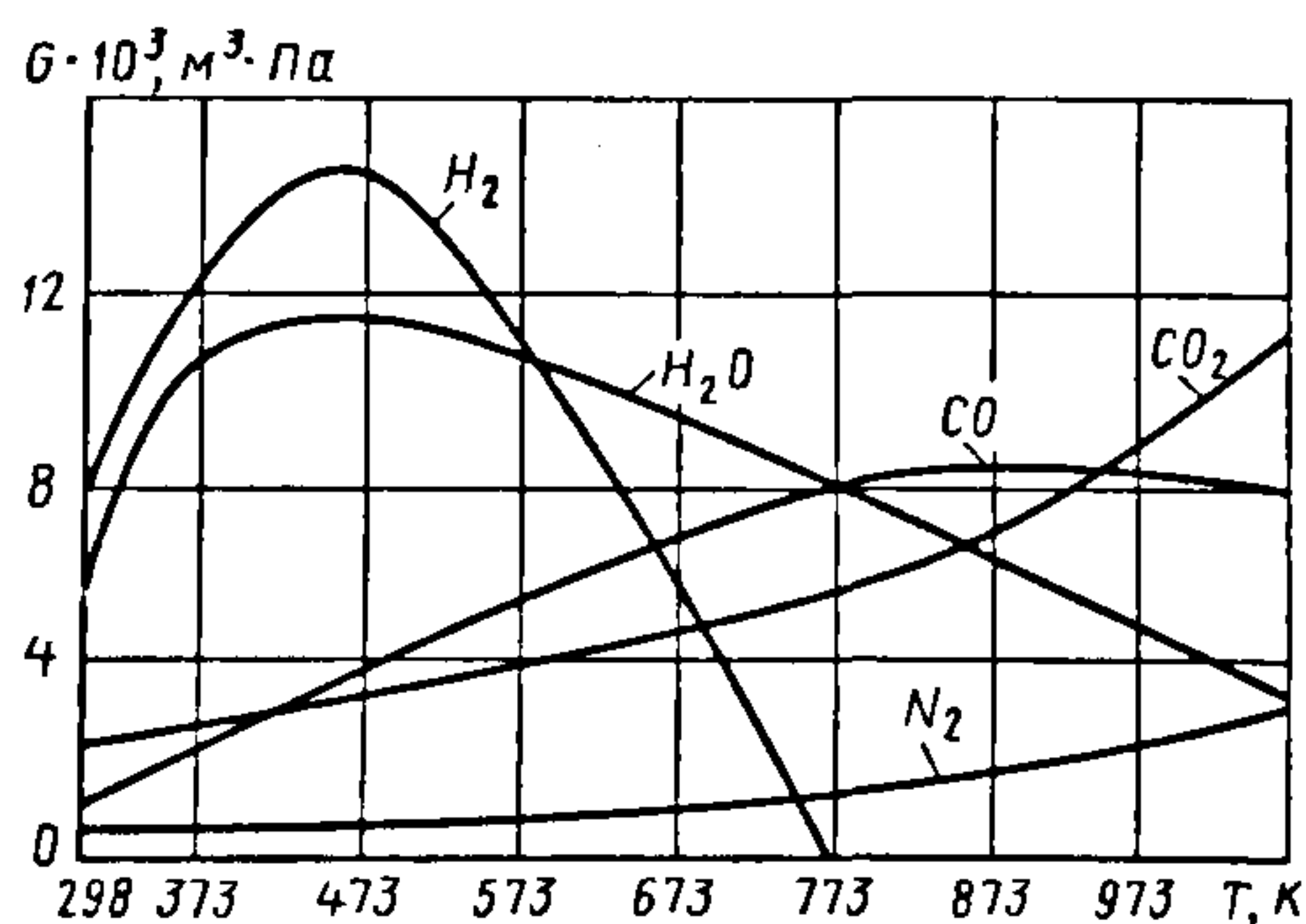
- энергия диссоциации газовой молекулы;
- энергия связи атомов в кристаллической решетке металла;
- тепловой эффект испарения металла и энтропийный коэффициент уравнения Клаузиуса–Клапейрона;
- коэффициент конденсации металла;
- плотность металла;
- работа выхода электрона металла;
- сорбционная емкость геттера.

Номенклатура материалов распыляемых геттеров представлена в табл. 4.27, а нераспыляемых – в табл. 4.28.

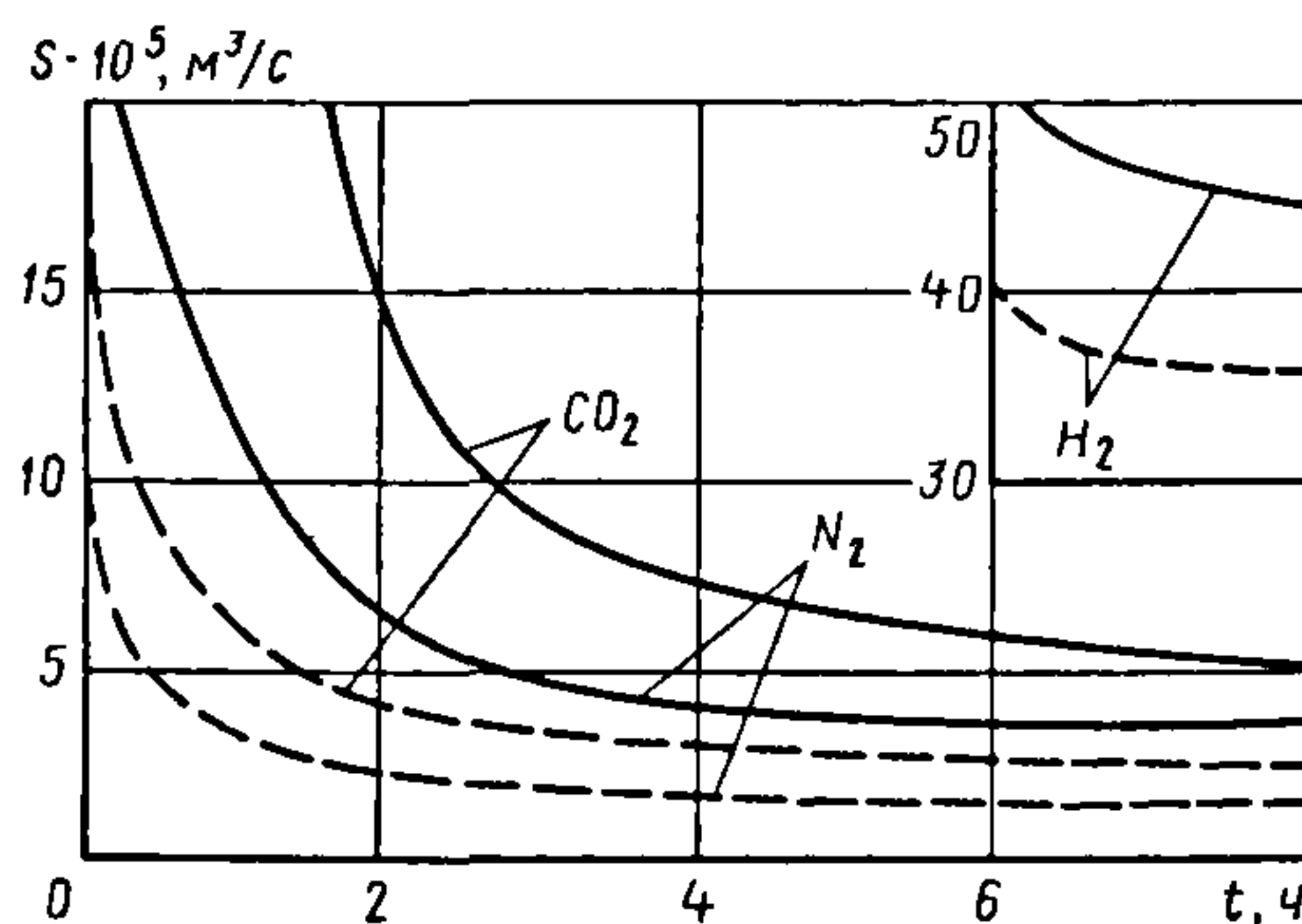
Оптимальная температура активирования нераспыляемых титановых геттеров, полученных методом свободной засыпки и имеющих пористость 70 %, составляет 1023...1123 К, время активирования 20...30 мин. Состав газов, выделяющихся при активировании, представлен в табл. 4.29. Диапазон рабочих температур геттера равен 573...773 К. При этом есть разница в скорости поглощения и сорбционной емкости различных газов. Зависимости сорбционной емкости  $G$  от  $T$  и скорости поглощения  $S$  от времени для различных газов показаны на рис. 4.16 и 4.17. Предельное давление, полученное с помощью такого геттера, достигает  $2 \cdot 10^{-8}$  Па.

**4.29. Состав и количество газов, выделяющихся при активировании нераспыляемого геттера с площадью поверхности  $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  при нагреве до температуры  $T$**

$T, \text{ К}$	Количество выделяемых газов, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}$	Состав выделенных газов, %					
		$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$
373	$1,6 \cdot 10^{-4}$	100	–	–	–	–	–
473	$3,1 \cdot 10^{-4}$	9,2	85,4	2,1	–	–	3,3
573	$1,12 \cdot 10^{-3}$	2,9	35,5	36,7	5,9	19	–
873	$1,3 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	14	86	–
Всего	$1,7 \cdot 10^{-3}$						



**Рис. 4.16. Зависимость сорбционной емкости  $G$  нераспыляемых титановых геттеров от температуры  $T$  для различных газов**



**Рис. 4.17. Зависимость скорости сорбции  $S$  различных газов нераспыляемых геттеров от времени  $t$  и рабочей температуры: — — — — 298 К; — — — — 473 К**



#### 4.18. ВАКУУМНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Вакуумная техника предъявляет к конструкционным материалам ряд специальных требований, которым они должны удовлетворять наряду с традиционными прочностными и физико-химическими характеристиками. В соответствии с этим материалы должны отвечать следующим требованиям:

- иметь давление паров при рабочей температуре, значительно меньшее рабочего;
- характеризоваться минимальной проницаемостью в рабочих условиях;
- обладать минимальной проницаемостью в рабочих условиях;
- обеспечивать вакуумную плотность при малой толщине;
- быть коррозионно-стойким, отличаться повышенными пределами выносливости и ползучести.

Материал, давление насыщенного пара которого при рабочей температуре сравнительно велико, в вакууме испаряется. При этом существенно сокращается срок службы тел нагрева. Частицы испаряемого материала, взаимодействуя с обрабатываемым в вакууме изделием, нарушают технологический процесс, приводят к снижению качества обработки, а осаждаясь, например на поверхностях изоляторов, делают их электропроводными.

На рис. 4.18 и 4.19 приведены температурные зависимости давления пара и скорости испарения для некоторых материалов.

Материалы элементов установок, работающих на границе раздела вакуумной и окружающей сред (вакуумные камеры, вакуумные трубопроводы, корпуса вакуумной запорной арматуры, разделительные оболочки механических вакуумных вводов), должны обладать высокой вакуумной плотностью, низким газосодержанием, легким обезгаживанием, хорошими свариваемостью с образованием вакуумно-

плотного соединения и обрабатываемостью.

Газовыделение материалов при рабочих давлениях и температурах зависит от количества газов, растворенных в их объеме и адсорбированных на поверхности. Уровень газовыделения весьма критичен к способу предварительной обработки.

Проницаемость свойственна многим материалам, однако сильно зависит от рода газа. Так, серебро проницаемо для кислорода; железо, никель, платина, палладий – для водорода; стекло – для гелия и водорода; резина для гелия, водорода и азота.

Для функциональных узлов, содержащих тонкостенные элементы и особенно гибкие деформируемые оболочки (сильфоны, мембраны, трубчатые элементы), очень важно обеспечить герметичность в течение требуемого срока службы,

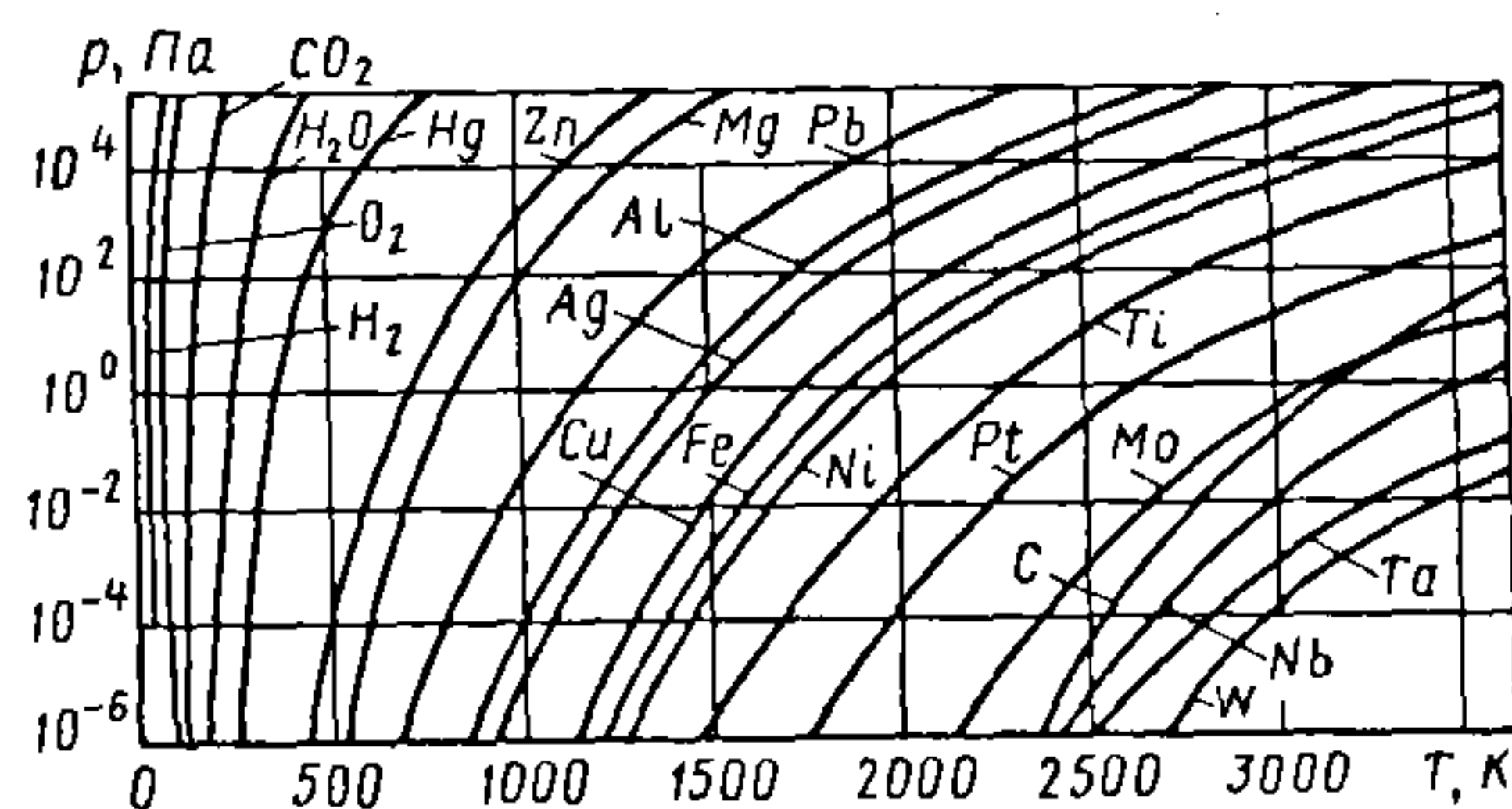


Рис. 4.18. Зависимость давления пара от температуры

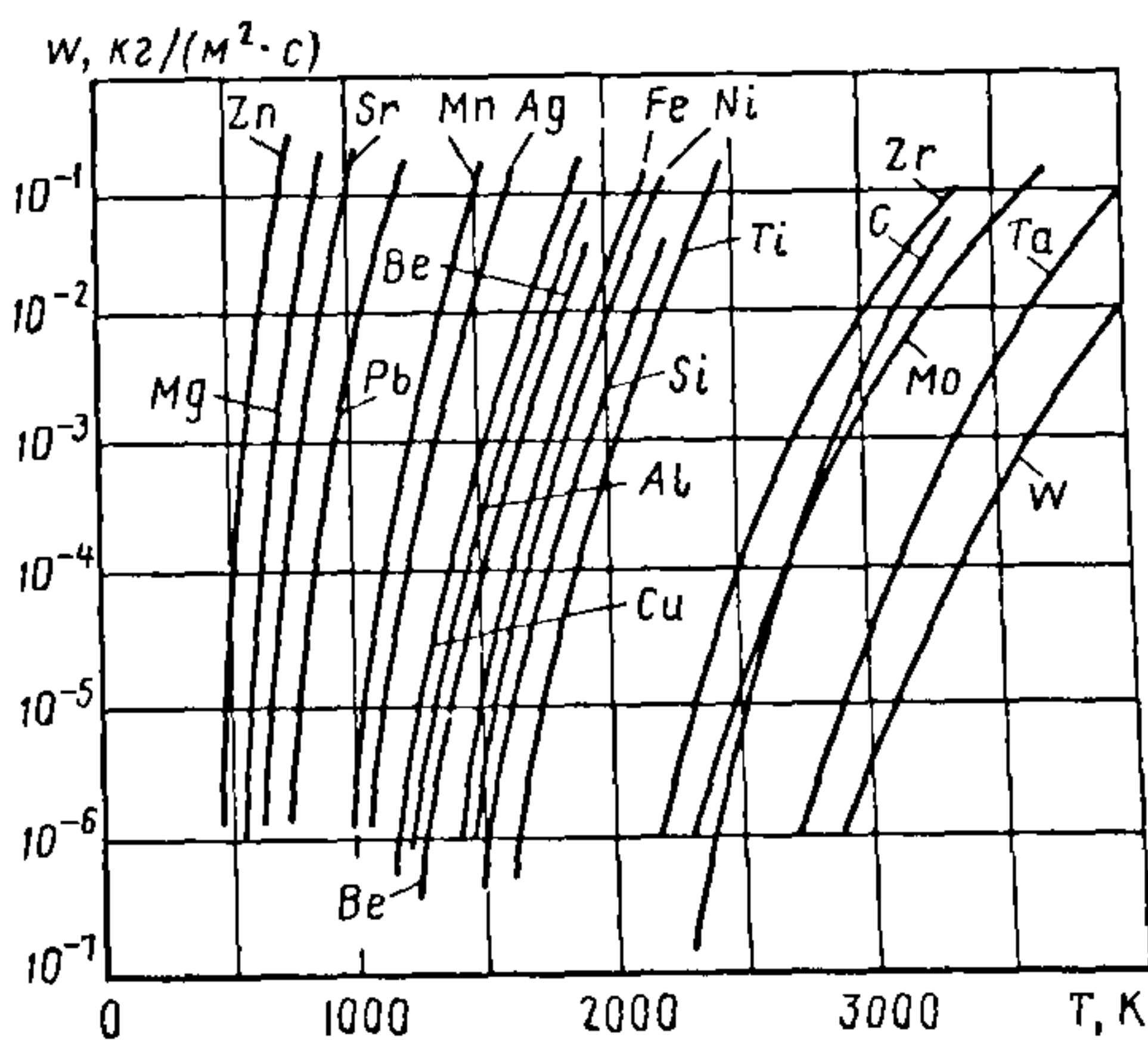


Рис. 4.19. Зависимость скорости испарения от температуры

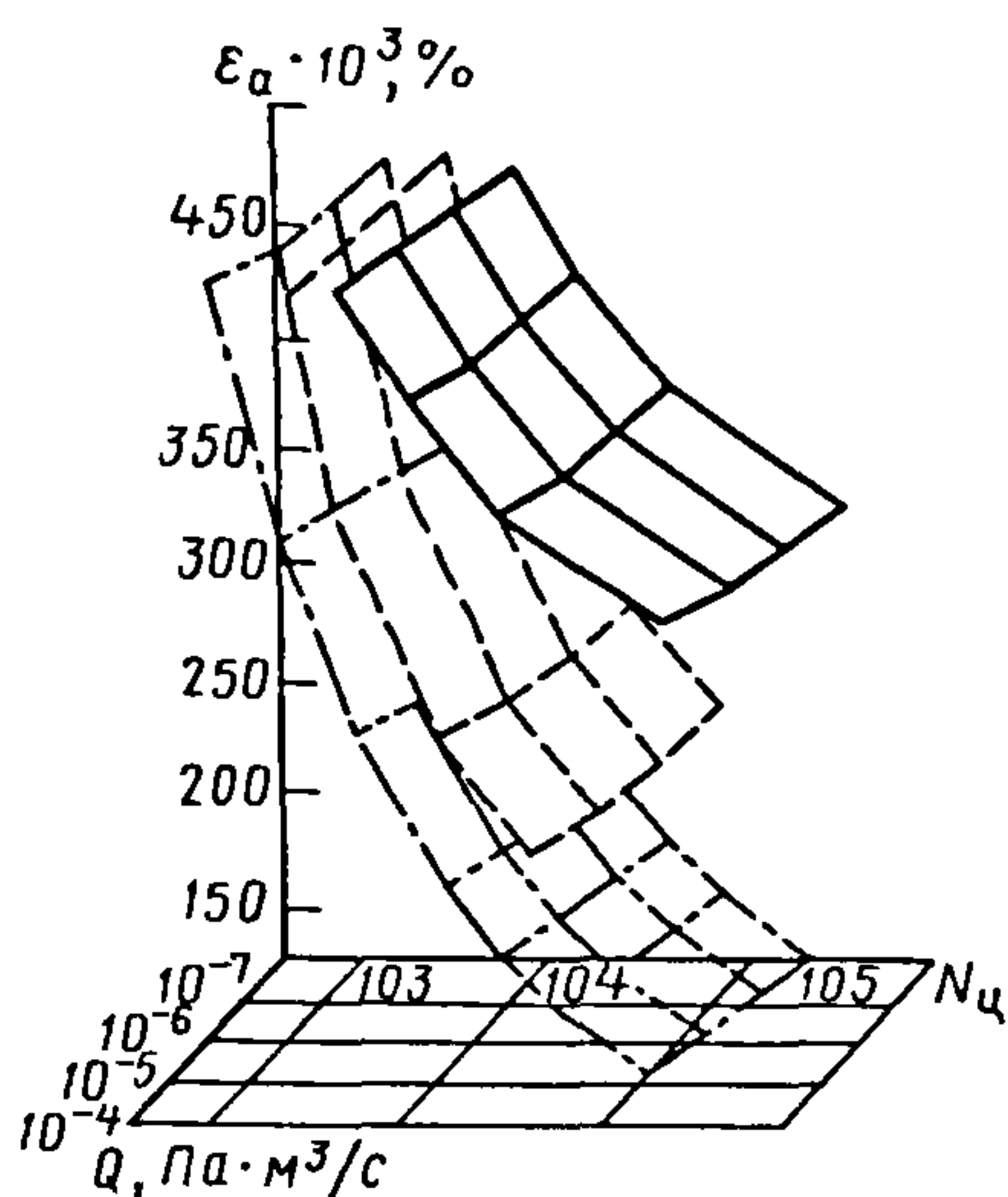


Рис. 4.20. Обобщенная диаграмма кривых усталости по критерию герметичности ( $N_{ц}$  – число циклов;  $\varepsilon_a$  – амплитуда деформации;  $Q$  – поток проницаемости); сплошные, штриховые и штрихпунктирные линии – для сталей соответственно 12X13H10T, 20X13 и 36HX10

в том числе в условиях периодического нагружения. При этом следует учитывать, что критерием работоспособности является не сопротивление усталости, а допускаемый газовый поток, проникающий через оболочку. Этот поток в свою очередь зависит от прочностных параметров материала.

В качестве иллюстрации этого утверждения на рис. 4.20 приведена экспериментальная диаграмма, отражающая зависимость потока проницаемости  $Q$  для

сталей 12X18H10T, 20X13 и 36HX10 от амплитуды деформации и числа циклов в диапазоне температур 373...673 К при допускаемом суммарном потоке проницаемости  $1 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ .

Литые материалы не удовлетворяют требованиям герметичности, так как для них характерна пористая структура. Листовой и сортовой прокат имеет различную вакуумную плотность в разных направлениях. Наибольшей вакуумной плотностью обладают материалы, подвергнутые переплаву в вакууме.

Требования коррозионной стойкости материалов обусловлены недопустимостью образования оксидов на поверхности, которые легко разлагаются и имеют более высокое давление пара, чем основной металл.

Таким образом, коррозия увеличивает газовыделение материалов, уменьшает прочность тонкостенных деталей, вызывает при соприкосновении с окисляющими газами межкристаллитную коррозию и появление натекаций. Требования коррозионной стойкости наиболее критичны для сверхвысоковакуумных систем, регулярно прогреваемых до температур 673...773 К.

В ряде случаев (например, в магнитных электроразрядных насосах, магнитных вводах движения, манометрических преобразователях) необходимо применять немагнитные материалы.

В табл. 4.30–4.37 приведены некоторые наиболее важные вакуумные характеристики материалов.

#### 4.30. Газовыделение металлов

Материал	Предварительная обработка материала	Удельный поток газовыделения, Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	Длительность предварительной откачки, ч
Низко- углеродистая сталь	—	4,12·10 <sup>-4</sup>	1
		2,4·10 <sup>-4</sup>	2
		1,08·10 <sup>-4</sup>	4
		7,35·10 <sup>-5</sup>	6
		5,36·10 <sup>-5</sup>	8
		4,12·10 <sup>-5</sup>	10
	Отжиг в вакууме при T= 693 К	4·10 <sup>-10</sup> ; 1,2·10 <sup>-8</sup>	Любая



Окончание табл. 4.30

Материал	Предварительная обработка материала	Удельный поток газовыделения, $\text{Па} \cdot \text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Длительность предварительной откачки, ч
Коррозионно-стойкая сталь	—	$2,4 \cdot 10^{-4}$	1
		$1,08 \cdot 10^{-4}$	2
		$5,94 \cdot 10^{-5}$	4
		$4,12 \cdot 10^{-5}$	6
		$3,09 \cdot 10^{-5}$	8
		$2,54 \cdot 10^{-5}$	10
		$1,07 \cdot 10^{-4}$	1
		$1,97 \cdot 10^{-5}$	5
	Отжиг в вакууме при $T = 673 \text{ К}$	$4 \cdot 10^{-10}$ ; $1,2 \cdot 10^{-8}$	Любая
Медь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,11 \cdot 10^{-5}$	1
		$8,35 \cdot 10^{-7}$	5
	Промывка в бензине и ацетоне	$6,12 \cdot 10^{-5}$	1
		$1,03 \cdot 10^{-5}$	5
	Отжиг в вакууме при $T = 693 \text{ К}$	$1,06 \cdot 10^{-10}$ ; $9,3 \cdot 10^{-9}$	Любая
Латунь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$1,95 \cdot 10^{-5}$	1
		$1,53 \cdot 10^{-6}$	5
	Промывка в бензоле и ацетоне	$2,22 \cdot 10^{-4}$	1
		$8,9 \cdot 10^{-6}$	5
	—	$3,34 \cdot 10^{-4}$	1
		$1,2 \cdot 10^{-4}$	5
Дуралюмин	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	$4,73 \cdot 10^{-5}$	1
		$3,9 \cdot 10^{-6}$	5
	Промывка в бензоле и ацетоне	$2,8 \cdot 10^{-4}$	1
		$1,4 \cdot 10^{-4}$	5
	—	$5,57 \cdot 10^{-4}$	1
		$1,9 \cdot 10^{-4}$	5
Алюминий	—	$(4 \dots 9) 10^{-6}$	2
Никель		$(6,5 \dots 8,0) 10^{-6}$	
Вольфрам		$1,3 \cdot 10^{-6}$	
Тантал		$6 \cdot 10^{-6}$	
Молибден		$(4,6 \dots 8,5) 10^{-2}$	
Вакуумная резина для уплотнения		$1,24 \cdot 10^{-2}$	10
Полистирол		$2,67 \cdot 10^{-5}$	
Полиэтиленовая пленка		$9,3 \cdot 10^{-5}$	
Целлофан		$1,35 \cdot 10^{-3}$	
Ткань Петрянова		$9,3 \cdot 10^{-4}$	

## 4.31. Вакуумные характеристики фторопластов

Материал	Температура, К	Удельный поток газовыделения, Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	Температура, К	
			начала выделения фторида водорода	резкого увеличения газовыделения
Фторопласт-3	393	$6,7 \cdot 10^{-4}$	—	—
	423	$8 \cdot 10^{-4}$		
Фторопласт-4	493	$(2,6 \dots 4,0) \cdot 10^{-4}$	513	593
	548	$8 \cdot 10^{-3}$		
Фторопласт-42	423	$6,7 \cdot 10^{-4}$	458	—

## 4.32. Вакуумные характеристики стекла

Стекло	Максимальная температура обезгаживания, К	Количество выделившегося газа, Па·м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	Массовая доля, %			
			H <sub>2</sub> O	CO <sub>4</sub> +N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	других газов
C49-2	723	$4 \cdot 10^{-1}$	65,6	12,9	16,9	4,6
C87-1	723	$5,33 \cdot 10^{-1}$	23,0	18,0	56,0	3,0
C48-1	873	$8 \cdot 10^{-1}$	21,8	26,5	42,2	9,5
C48-3	1053	$6,7 \cdot 10^{-1}$	20,5	30,5	47,0	3,0
П-15	773	$4,65 \cdot 10^{-1}$	36,0	37,0	22,0	5,0

4.33. Газосодержание сталей, Па·м<sup>2</sup>/кг

Сталь	Газ		
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
12X18H10T	2,3	5,1	6,5...11,0
10	9,0	3,5	2,2
20	2,3	3,5	2,2
30ХГСА	3,0	3,4	1,3

## 4.34. Газопроницаемость материалов

Газ	Материал	Темпе- ратура, К	$q'$ , Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	Газ	Материал	Темпе- ратура, К	$q'$ , Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	
H <sub>2</sub>	Fe	298	$4 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-11}$	H <sub>2</sub>	Корро- зионно- стойкая сталь	298	$7 \cdot 10^{-11} \dots 7 \cdot 10^{-14}$	
		323	$5 \cdot 10^{-8} \dots 6 \cdot 10^{-9}$			323	$2 \cdot 10^{-10} \dots 5 \cdot 10^{-12}$	
N <sub>2</sub>		1095	$2,22 \cdot 10^{-6}$		Mo	298	$1 \cdot 10^{-14}$	
		CO	1387			$2,22 \cdot 10^{-5}$	323	$2 \cdot 10^{-12}$
CO			965			$2,22 \cdot 10^{-6}$	471	$2,22 \cdot 10^{-6}$
		CO	1266			$2,22 \cdot 10^{-5}$	1860	$2,22 \cdot 10^{-5}$
H <sub>2</sub>			Ni		681	$2,22 \cdot 10^{-6}$	Cu	298
		889			$2,22 \cdot 10^{-8}$	323		$2 \cdot 10^{-14} \dots 4 \cdot 10^{-15}$
	Pd	298	$(5 \dots 8) 10^{-6}$	813	$2,22 \cdot 10^{-6}$			
		323	$(5 \dots 8) 10^{-5}$	1048	$2,22 \cdot 10^{-5}$			
	Al	298	$1 \cdot 10^{-11}$	O <sub>2</sub>	Ag	913		$2,22 \cdot 10^{-6}$
		773	$2,295 \cdot 10^{-8}$			1119		$2,22 \cdot 10^{-5}$
		873	$2,265 \cdot 10^{-8}$		H <sub>2</sub>	Pt	293	$1 \cdot 10^{-11}$
			702	$2,22 \cdot 10^{-6}$				
		844	$2,22 \cdot 10^{-5}$					

Примечание.  $q'$  — удельный поток, определяемый проницаемостью (при  $\Delta p = 10^5$  Па).



4.35. Газопроницаемость стекол

Газ	Материал	Темпе- ратура, К	$q'$ , Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	Газ	Материал	Темпе- ратура, К	$q'$ , Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)
He	Стекло С38-1	473 673	$10^{-9}$ $5,9 \cdot 10^{-9}$	He	Стекло С39-2	573 723	$5,3 \cdot 10^{-3}$ $1,8 \cdot 10^{-11}$
	Стекло С40-1	473 673	$1,172 \cdot 10^{-9}$ $1,181 \cdot 10^{-9}$		Кварц	423 473	$7,82 \cdot 10^{-10}$ $1,49 \cdot 10^{-9}$
	Стекло С48-1	373 673	$1,14 \cdot 10^{-11}$ $1,39 \cdot 10^{-9}$			573 673	$3,38 \cdot 10^{-9}$ $6,6 \cdot 10^{-9}$
	Стекло С49-2	373 673	$7,6 \cdot 10^{-12}$ $1 \cdot 10^{-9}$			773 873	$1,11 \cdot 10^{-8}$ $1,76 \cdot 10^{-8}$
	Стекло С47-1	373 673	$6,05 \cdot 10^{-12}$ $7,25 \cdot 10^{-10}$			973 1073	$2,35 \cdot 10^{-8}$ $3,06 \cdot 10^{-8}$
	Стекло С87-1	473 673	$3,1 \cdot 10^{-12}$ $8,5 \cdot 10^{-11}$			1173 1273	$3,88 \cdot 10^{-8}$ $4,86 \cdot 10^{-8}$
	Стекло С88-1	423 673	$6,4 \cdot 10^{-13}$ $1 \cdot 10^{-10}$			873 973	$1,34 \cdot 10^{-9}$ $2,25 \cdot 10^{-9}$
	Стекло С89-1	423 673	$4,0 \cdot 10^{-13}$ $8,0 \cdot 10^{-11}$			1173	$6,85 \cdot 10^{-9}$
	Стекло С89-2	423 623	$2,7 \cdot 10^{-13}$ $2,0 \cdot 10^{-11}$			973 1173	$< 10^{-15}$ $9 \cdot 10^{-13}$
	Стекло С90-1	423 623	$7,1 \cdot 10^{-14}$ $2,0 \cdot 10^{-11}$			1173 873	$5,8 \cdot 10^{-10}$ $3,0 \cdot 10^{-10}$
	Стекло С48-3	523 723	$2,3 \cdot 10^{-13}$ $1 \cdot 10^{-11}$			973 1173	$4,5 \cdot 10^{-10}$ $1,27 \cdot 10^{-9}$
				H <sub>2</sub>	Керами- ка	1173	$4,2 \cdot 10^{-13}$
				O <sub>2</sub>			
				Ar			
				Ne			

Примечание. Для кварца значения  $q'$  при  $\Delta p = 10^3$  Па, для керамики – при  $\Delta p = 1$  Па, остальные значения – при  $\Delta p = 10^5$  Па.

4.36. Газопроницаемость полимеров

Газ	Материал	Температура, К	$q'$ , Па·м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	Давление, Па
H <sub>2</sub>	Фторопласт-4	293	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$10^5$
		323	$1,1 \cdot 10^{-10}$	
He		293	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$1,33 \cdot 10^2$
N <sub>2</sub>			$1,1 \cdot 10^{-10}$	
O <sub>2</sub>			$2,5 \cdot 10^{-10}$	
H <sub>2</sub>	Полиэтилен высокой прочности	298	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$10^5$
	Полиамид		$7,3 \cdot 10^{-8}$	
		323	$2,3 \cdot 10^{-7}$	
	Полиэтилен (пленка)	298	$4,4 \cdot 10^{-8}$	
		323	$9,4 \cdot 10^{-8}$	

## 4.37. Коэффициент диффузии газов в металлах и сплавах

Газ	Металл	Температура, К	Коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с	Газ	Металл	Температура, К	Коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с
H <sub>2</sub>	Коррозионно-стойкая сталь	1023	$3,4 \cdot 10^{-10}$	CO	Ni	973	$2,5 \cdot 10^{-12}$
						1223	$4 \cdot 10^{-12}$
						1323	$1,4 \cdot 10^{-11}$
O <sub>2</sub>	Ni	355	$8,6 \cdot 10^{-13}$	H <sub>2</sub>	Сплав АМЦ	723	$2,1 \cdot 10^{-10}$
		398	$3,4 \cdot 10^{-12}$				
		438	$1,05 \cdot 10^{-11}$		W	550	$10^{-12}$
		498	$6,41 \cdot 10^{-11}$			600	$10^{-11}$
		553	$1,19 \cdot 10^{-10}$		Pd	350	$10^{-10}$
		1173	$1,5 \cdot 10^{-14}$			600	$10^{-8}$
		1223	$6,8 \cdot 10^{-14}$		Ti	1500	$5,510^{-12}$
		1273	$2,36 \cdot 10^{-13}$			2000	$6,810^{-11}$
		1323	$7,8 \cdot 10^{-13}$		Cu	900	$10^{-12}$
		298	$2 \cdot 10^{-24}$			1270	$10^{-10}$
CO							



## Глава 5

# ВАКУУМНЫЕ ГЕРМЕТИЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

### 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

По конструктивным признакам вакуум-плотные герметичные соединения подразделяют на три группы: неразъемные, разъемные и подвижные.

*Неразъемные* вакуум-плотные соединения получают сваркой, пайкой, склеиванием и герметизацией эпоксидными смолами. К *разъемным* относят штуцерные, штуцерно-ниппельные и фланцевые соединения, уплотненные резиновыми или металлическими прокладками, герметиками, расплавляемыми металлами-уплотнителями, а также герметичные муфтовые соединения. В *подвижных* соединениях для уплотнений используют жидкие металлы, масла, прокладки из антифрикционных вакуумно-плотных материалов, манжеты, шлифованные и притертые контактные поверхности.

Выбор вида соединения, способа его конструктивной реализации и материала определяется назначением соединения. При этом основными критериями служат: степень вакуума, состав остаточных газов, рабочая температура, условия взаимодействия с окружающей средой, влияние излучений.

В зависимости от степени вакуума применяют уплотнения для низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума.

В вакуумных системах, подвергаемых обезгаживанию при  $T = 723...773$  К, неразъемные вакуумные соединения выполняют сваркой или пайкой высокотем-

пературными припоями, для разъемных соединений применяют металлические уплотнения или термостойкие вакуумные резины с местным охлаждением. Низкотемпературные неразъемные соединения получают сваркой, пайкой и склеиванием.

В вакуумных герметичных соединениях наиболее часто применяют следующие сочетания материалов: металл-металл, металл-стекло, стекло-стекло, металл-керамика, стекло-керамика.

Качество уплотнения определяется допускаемым потоком натекания, составляющим для сварных соединений металл-металл и металл-стекло соответственно  $5 \cdot 10^{-9}$  и  $8 \cdot 10^{-11}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

Для динамической вакуумной системы допускаемый удельный поток натекания  $q$ , Па·м<sup>3</sup>/(с·м), предельное давление  $p$ , Па, быстрота откачки  $S$ , м<sup>3</sup>/с, и длина соединения  $L$ , м, связаны зависимостью  $q < pS/L$ .

Для изолированных вакуумных систем допускаемый удельный поток натекания определяется допускаемым повышением давления в единицу времени  $(dp/dt)$ , объемом сосуда  $V$  и длиной уплотнения  $L$ :  $q < (dp/dt)(V/L)$ .

Допускаемые значения удельного потока натекания, Па·м<sup>3</sup>/(с·см), для наиболее распространенных вакуумных соединений приведены ниже:

Высоковакуумное уплотнение с медными прокладками . . . . .	$3 \cdot 10^{-9}$
Уплотнение на основе эластомерных прокладок . . . . .	$6 \cdot 10^{-9}$
Сверхвысоковакуумное уплотнение . . . . .	$1,5 \cdot 10^{-18}$

## 5.2. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Способы сварки, используемые в вакуумной технике, можно разделить на две группы.

Первая группа объединяет способы сварки плавлением, осуществляемой нагревом кромок свариваемых деталей до расплавления и соединением их без механического воздействия. К этой группе относятся газовая, дуговая, электронно-лучевая, лазерная и плазменная сварка. Вторая группа объединяет способы сварки давлением, осуществляемой сжатием свариваемых деталей с нагревом или без него. К этой группе относятся различные виды контактной и холодной сварки.

Для получения вакуумно-плотных соединений в вакуумной технике наиболее распространена дуговая сварка в защитных газах. Для дуговой сварки используют плавящиеся и неплавящиеся электроды. В последнем случае шов образуется из присадочного металла или вследствие оплавления стыковых кромок. Дуговую сварку ведут как постоянным, так и переменным током.

При сварке постоянным током используют две схемы подсоединения детали и электрода к источнику питания прямой и обратной полярности. В первом случае электрод является катодом, деталь — анодом, во втором — наоборот.

Так как большая часть тепловой энергии выделяется на положительном

полюсе, дуговая сварка постоянным током по схеме прямой полярности характеризуется глубоким проплавлением и узким швом (рис. 5.1, а). Такой способ целесообразен для сварки массивных деталей. Сварка по схеме обратной полярности характеризуется неглубоким проплавлением и широким швом (рис. 5.1, б), поэтому рекомендуется для соединения тонкостенных деталей.

Сварка постоянным током предпочтительна для немагнитных металлов и сплавов.

При дуговой сварке переменным током образуется узкий сварной шов средней глубины (рис. 5.1, в). В ходе дуговой сварки в защитных газах тепловая энергия выделяется в виде дуги переменного тока, горящей между двумя неплавящимися электродами в среде водорода, и переносится на свариваемый металл в результате диссоциации и рекомбинации молекулярного водорода. Молекулярный водород, подаваемый через держатель электродов, диссоциирует в дуге до атомарного, который рекомбинирует при контакте с более холодным свариваемым металлом. При этом температура в зоне сварки может достигать 4273 К.

Дуговую сварку в среде водорода применяют для соединения трудносвариваемых материалов, в том числе алюминия и хрома, однако этот способ непригоден для получения вакуумно-плотных соединений сплавов, содержащих никель и склонных к растворению водорода с последующим образованием трещин и пор (например, сталь 12Х18Н10Т).

При дуговой сварке в защитных газах (аргоне, гелии) тепловая энергия создается дугой, горящей между неплавящимся вольфрамовым электродом и свариваемыми деталями. В установках переменного тока используют ток напряжением ~100 В, силой 250...300 А, в установках постоянного тока — напряжением 45...75 В, силой 15...175 А (в мощных установках — до 300 А). Преимущество ис-

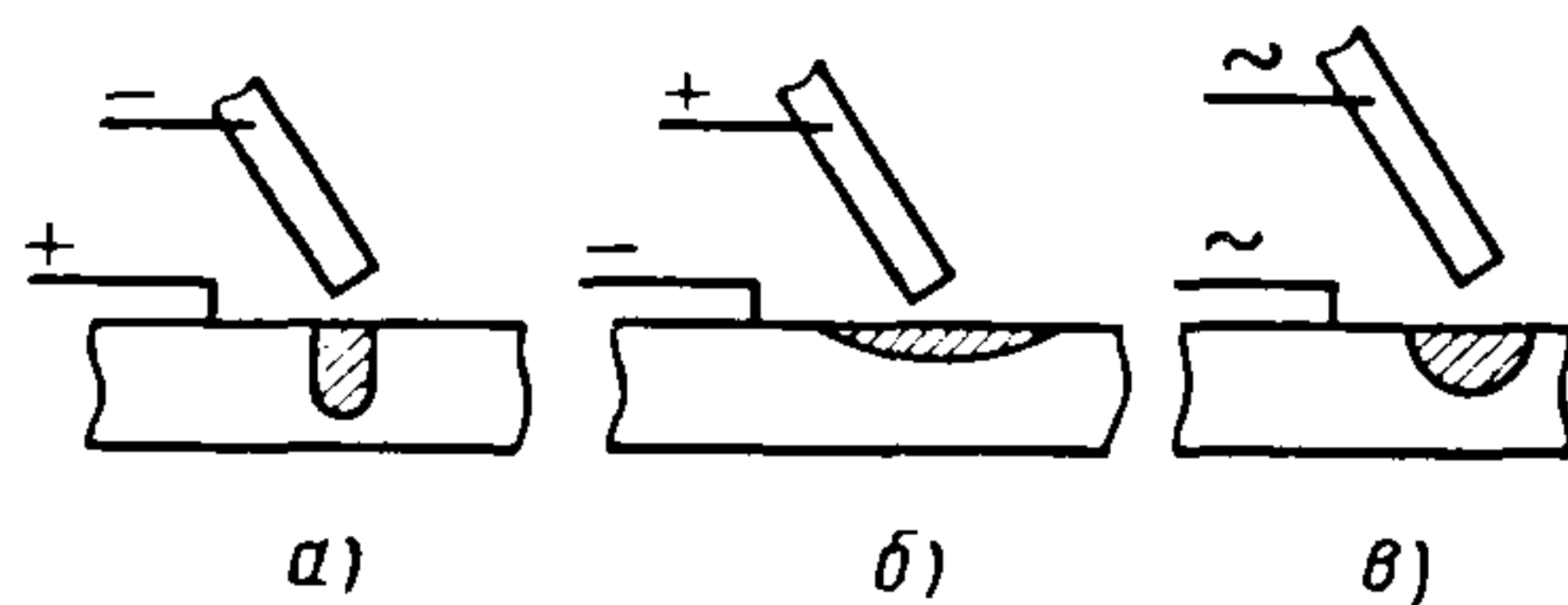


Рис. 5.1. Виды проплавления при дуговой сварке:

а — глубокое, узкий шов (постоянный ток, прямая полярность); б — неглубокое, широкий шов (постоянный ток, обратная полярность); в — среднее (переменный ток)



пользования инертных газов — их химическая инертность и нерастворимость в металлах.

Наибольшее применение на практике нашла аргонодуговая сварка. В зависимости от материала ее ведут постоянным или переменным током.

Для сварки алюминия и магния обычно используют переменный ток, для сварки коррозионно-стойких сталей, никеля, меди, серебра и титана — постоянный. При сварке алюминия постоянным током применяют схему обратной полярности, так как в этом случае электронная эмиссия металла в области сварки и бомбардировка поверхности положительными ионами способствует удалению оксидной пленки и повышению качества соединения.

Особенности дугового разряда в среде аргона — высокое напряжение зажигания вследствие большого потенциала этого газа и малое напряжение горения (12...24 В) при длине дуги 1...3 мм, объясняемое повышенной подвижностью электронов в аргоне, отсутствием расхода энергии на диссоциацию молекул газа и другими факторами.

В вакуумной технике распространены две разновидности аргонодуговой сварки: в воздухе с местным обдувом кромок соединяемых деталей аргонem и в камерах, наполненных аргонem.

При сварке в воздухе кромки соединяемых деталей обдуваются аргонem, который подается между центральным вольфрамовым электродом и керамическим наконечником сварочной горелки под небольшим избыточным давлением (порядка 1 кПа) и не только защищает от окисления нагретый и расплавленный металл в зоне сварки, но и способствует ионизации пространства, в котором горит дуга.

Сварку в воздухе с местным обдувом аргонem, характеризующуюся высокой производительностью, используют, когда к чистоте шва (отсутствие загрязнений и оксидов) не предъявляют повышенных требований. В противном случае приме-

няют сварку в камере, из которой предварительно откачивают воздух до давления 1,33...0,133 Па и наполняют ее аргонem с минимальной долей примесей (0,01 %  $O_2$ ; 0,01 %  $N_2$ ). В камере размещают приспособления для закрепления деталей и электроды.

Аргонодуговую сварку не рекомендуют для выполнения конструкций с толщиной кромок > 4 мм. При использовании медных охладителей или специальных накладок можно сваривать тонкостенные детали (до 0,15 мм).

Электронно-лучевая сварка основана на использовании энергии, образующейся при столкновении потока ускоренных электронов со свариваемыми деталями. При этом электроны передают часть своей энергии атомам и молекулам материала деталей; в результате температура в зоне действия потока электронов повышается. Электронно-лучевую сварку выполняют в вакууме ( $5 \cdot 10^{-3}$  Па), что позволяет сохранить чистоту свариваемых металлов.

Кроме того, отсутствие деформации свариваемых деталей и высокие физико-механические характеристики материала сварного шва исключают его последующую механическую и термическую обработку. По прочности сварные соединения, получаемые электронно-лучевой сваркой, значительно превосходят аналогичные соединения, выполненные аргонодуговой сваркой.

Локальный нагрев зоны сварки позволяет сваривать тонкостенные детали. В этом случае можно создать пятно фокусировки луча площадью 0,1 мм<sup>2</sup> и менее, что позволяет достичь высокой точности сварки. Глубокое проникновение электронов в материал, подвергаемый электронной бомбардировке, позволяет резко уменьшить площадь зоны расплава (рис. 5.2).

Электронно-лучевую сварку применяют для получения вакуумно-плотного соединения изделий из коррозионно-стойких сталей вольфрама, молибдена, титана, бериллия и тантала, а также различных сочетаний конструкционных материалов.



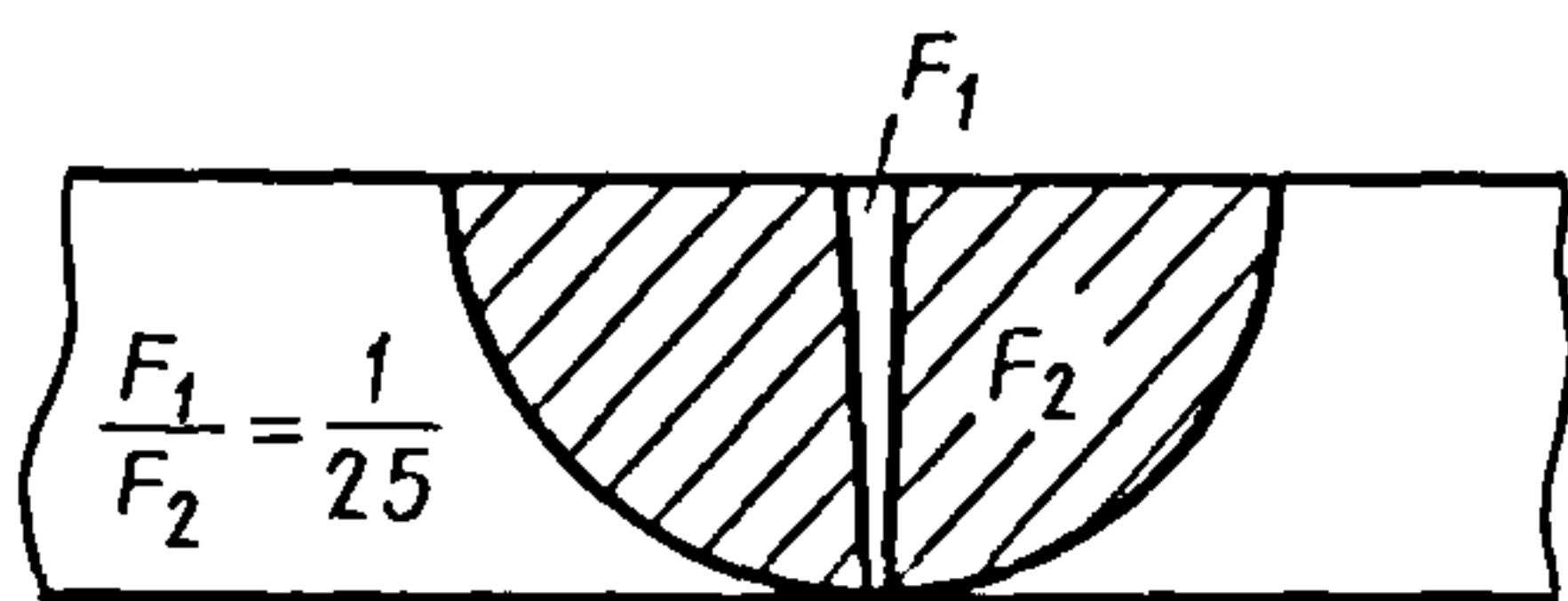


Рис. 5.2. Схема расплавления материала при сварке:

$F_1$  и  $F_2$  – площади расплавленной зоны при электронно-лучевой и дуговой сварке)

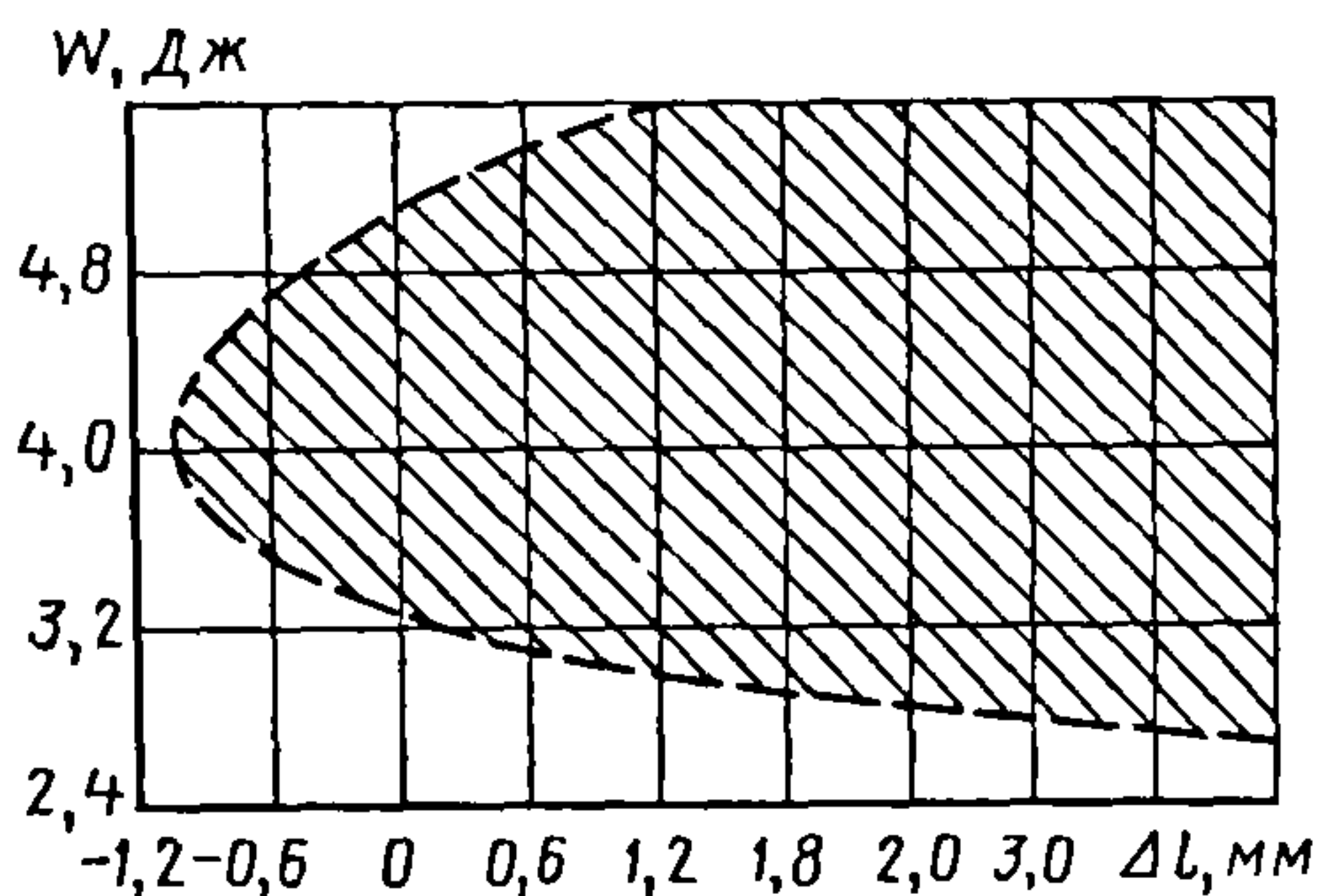


Рис. 5.3. Зависимость энергии излучения  $W$  от фокусировки  $\Delta l$

При лазерной сварке используют как твердотельные, так и газовые лазеры. Плотность лазерного потока, направленного на свариваемые детали, может достигать  $10^7 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Излучение может быть как непрерывным, так и импульсным. При лазерной обработке отсутствует механический контакт между соединяемыми деталями и устройствами, служащими для передачи энергии к месту сварки. Это исключает возможность попадания в зону шва посторонних примесей при газовой, аргонодуговой и контактной сварке. Малая площадь поперечного сечения сфокусированного светового пучка позволяет проводить сварку в труднодоступных местах.

Кроме того, лазерный луч проходит через любую пропускающую свет среду. Так, лазером можно сваривать детали, находящиеся в замкнутом оптически прозрачном объеме. Лазерной сваркой как в вакууме, так и в обычной атмосфере уда-

ется соединять детали толщиной 0,01... 1,0 мм из любых металлов в любых комбинациях. Технологию лазерной сварки используют для соединения стекол. При лазерной сварке основной задачей управления лазерным лучом является уменьшение его энергии до такого значения, при котором материал свариваемых деталей нагревается до температуры плавления, но не испаряется.

Для получения необходимой энергии излучения  $W$  в оптической системе лазерной сварочной установки используют линзы с большим фокусным расстоянием или смещают свариваемые поверхности относительно фокальной плоскости (дефокусировка  $\Delta F$ ). На рис. 5.3 заштрихована область оптимальных соотношений  $W$  и  $\Delta l$ , при которых обеспечивается высококачественная лазерная сварка.

Плотность потока энергии излучения  $\varphi$ , Вт/см<sup>2</sup>, в месте падения луча связана с размером фокального пятна соотношением

$$\varphi = W / (\tau_n F_\phi),$$

где  $W$  – энергия излучения с учетом потерь в оптической системе, Дж;  $\tau_n$  – время импульса, с;  $F_\phi$  – площадь фокального пятна, см<sup>2</sup>.

Из бесконтактных методов сварки весьма распространены плазменные методы. Плазменно-дуговой нагрев применяют для сварки практически любых материалов вакуумной техники. При плазменной сварке используют горелки с дугой прямого действия, в которых дуга горит между электродом и изделием и струя плазмы совпадает с дугой. Высокие напряжение и мощность при сфокусированном факеле обеспечивают получение сварных швов высокого качества. При плазменно-дуговом нагреве наиболее целесообразна сварка оплавлением, при которой свариваемые детали перемещаются относительно струи плазмы. Свариваемые кромки оплавляются; при необходимости их защищают инертным газом (рис. 5.4).

Плазменная сварка характеризуется глубоким проваром и равномерностью



шва при постоянном расстоянии от сопла до металла.

К сварке давлением относятся способы соединения, при которых металлы свариваются в твердом состоянии при совместной пластической деформации, иногда сопровождающейся нагревом. К этому виду сварки относится электроконтактная, холодная, диффузионная в вакууме, а также ультразвуковая и термокомпрессионная.

Контактная сварка заключается в разогреве свариваемых деталей пропусканием тока и последующем механическом сжатии. Контактная сварка может быть точечной, шовной и стыковой. В вакуумной технике точечную сварку применяют лишь как вспомогательное средство для предварительного соединения и взаимной ориентации соединяемых деталей, поскольку вид сварки не позволяет получить вакуумно-плотные соединения. Шовную сварку используют достаточно широко. Давление, прикладываемое к роликам, постоянно: при этом сварочный ток может быть непрерывным или импульсным, так что области сварки от двух последовательных импульсов перекрывают одна другую (рис. 5.5).

Из некоторых металлов, таких как медь, алюминий, коррозионно-стойкие стали, можно получать вакуумно-плотные соединения холодной сваркой. При этом свариваемые поверхности, тщательно обезжиренные и очищенные от пленки оксидов, сжимают специальными приспособлениями (давление, МПа, для алюминия 170...250, для меди 500...750. Контактующие поверхности из коррозионно-стойких сталей необходимо плакировать слоем меди. Если в процессе сварки контактирующие поверхности, предохраняемые от загрязнений и окисления (например, в вакууме), нагревать, качество сварки повышается и давление, необходимое для сварки, уменьшается.

Температура и давление связаны уравнением

$$K = \frac{T}{T_{\text{пл}}} \frac{\sigma}{\sigma_{\text{с.д}}} \approx 4,$$

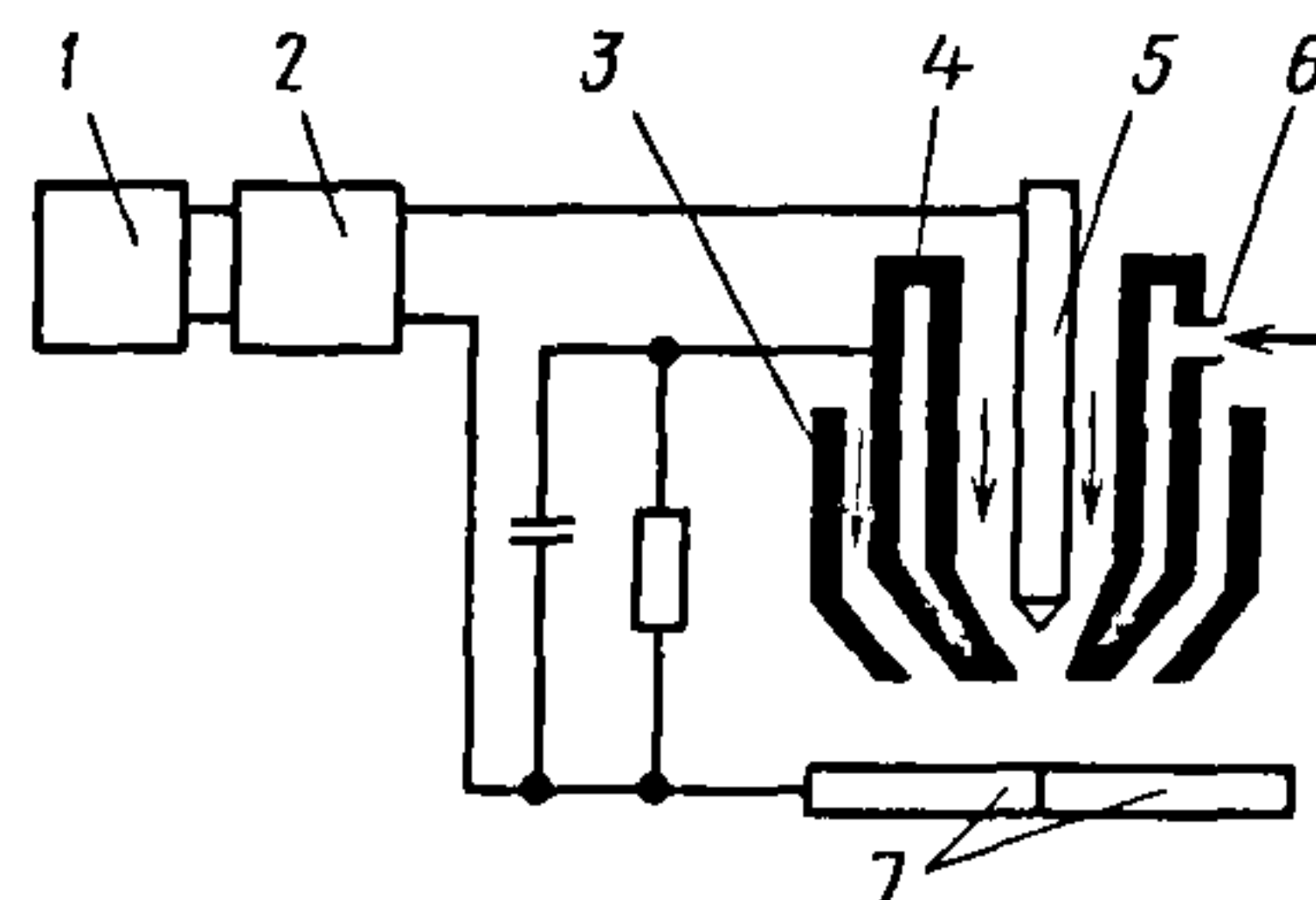


Рис. 5.4. Схема плазменной сварки:

1 — источник питания; 2 — высокочастотный генератор; 3 и 4 — сопла для подачи соответственно защитного и плазмообразующего инертных газов; 5 — электрод; 6 — трубка подачи охлаждающей воды; 7 — свариваемые детали

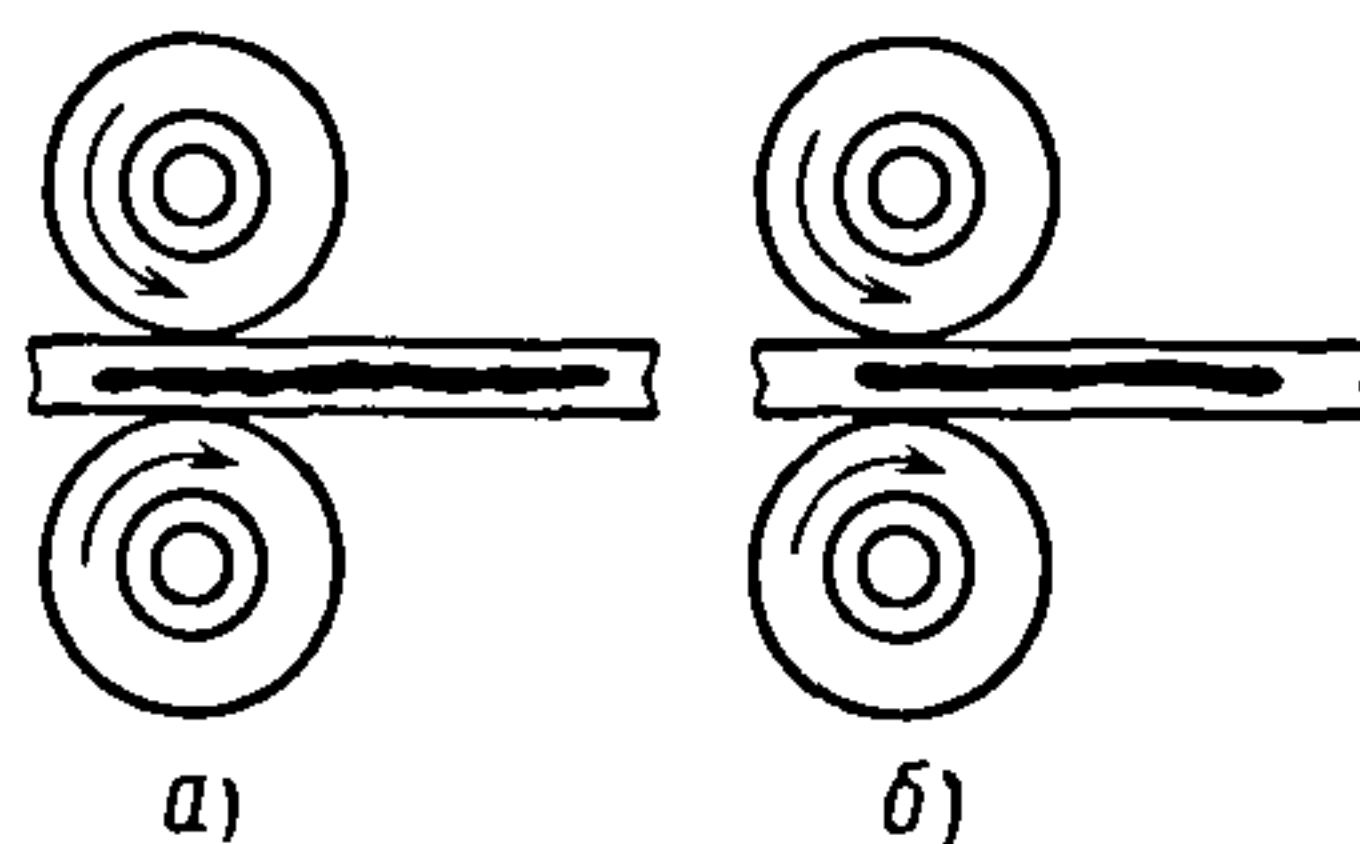


Рис. 5.5. Схемы шовной контактной сварки в импульсном (а) и непрерывном (б) режимах

где  $K$  — коэффициент, зависящий от свариваемых материалов (для меди  $K = 20$ , для титана  $K = 28$ );  $T$  — температура сварки, К;  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления металла, К;  $\sigma$  — удельная нагрузка, необходимая для сварки, Па;  $\sigma_{\text{с.д}}$  — сопротивление деформации металла, равное утроенному пределу текучести  $\sigma_T$  металла при данной температуре, Па.

Широко распространена диффузионная сварка в вакууме. Процесс диффузионной сварки состоит из трех стадий: физического взаимодействия, свидетельствующего о фактическом контакте поверхностей; химического взаимодействия (схватывания) при необходимом уровне активации поверхностей; объемного взаимодействия в зоне контакта, определяемого диффузионными процессами и сопровождающегося равномерным распределением напряжений.

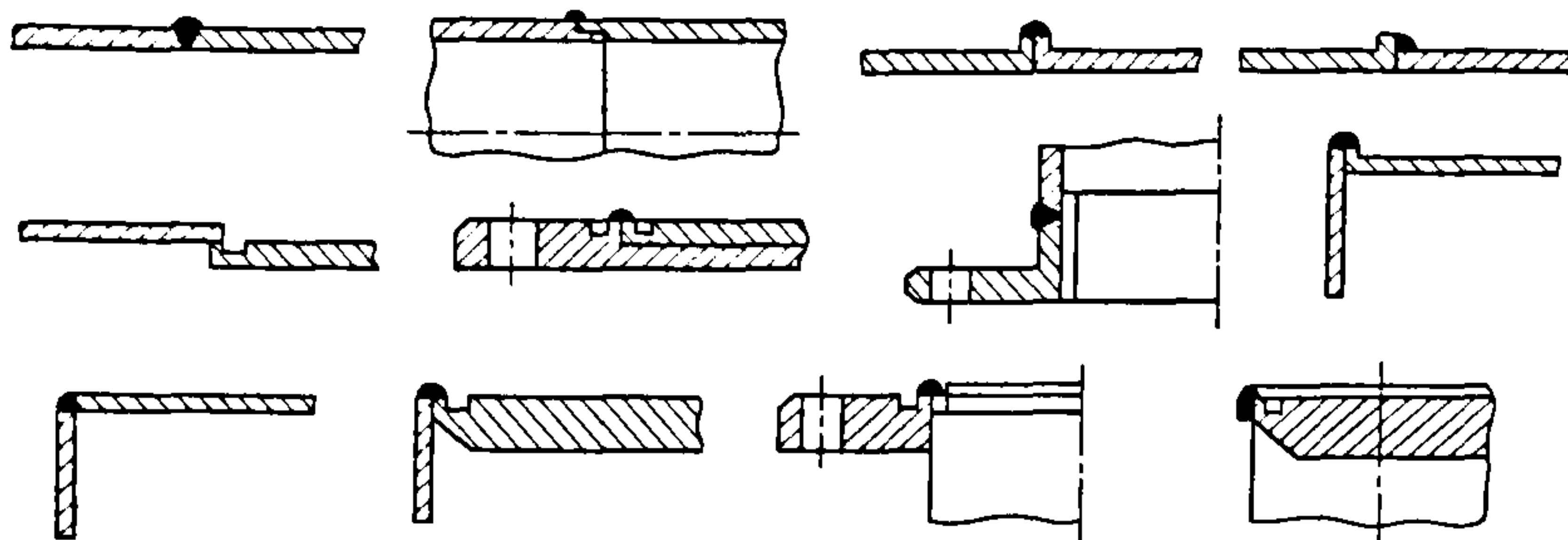


Рис. 5.6. Сварные соединения

Процесс диффузионной сварки осуществляют в вакууме при давлении порядка  $10^{-2}$  Па. Иногда вакуумные объемы заполняют инертным или восстановительным газом. Свариваемые детали нагревают в собранном состоянии до температуры, равной 0,5...0,7 температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых металлов при относительно небольшом давлении. Рабочая среда способствует удалению поверхностных оксидов благодаря их разложению (диссоциации) в вакууме или восстановлению, а также частичному растворению в основном металле.

Диффузионная сварка позволяет изготавливать вакуумно-плотные соединения как однородных, так и разнородных металлов, а также неметаллических материалов с металлами и сплавами. В вакуумной технике применяют сварные стеклометаллические и металлокерамические соединения, которые требуют дополнительной подготовки поверхности.

Газовую сварку в вакуумной технике ограниченно применяют вследствие неизбежного интенсивного образования оксидов или науглероживания металлов в зоне сварки, что исключает возможность получения надежных сварных вакуумно-плотных соединений.

Примеры сварных соединений приведены на рис. 5.6.

### 5.3. ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Пайку широко используют для получения вакуумно-плотных соединений металла с металлом, а также металла с керамикой и стеклом.

Пайка основана на способности металлов смачиваться расплавленным припоем при проникновении его в зазор между соединяемыми деталями и последующей взаимной диффузии припоя в основной металл и основного металла в припой с образованием сплавов в виде твердых растворов или химических соединений.

В вакуумной технике широко применяют пайку нагревом соединяемых деталей специальными внешними нагревателями, прямым пропусканием электрического тока или токами высокой частоты (индукционный нагрев) в среде водорода или вакууме. Кроме того, для соединения деталей используют электроконтактную пайку в воздухе.

В среде водорода паяют никель, бескислородную медь, ковар, различные стали, железоникелевые сплавы, константан и другие металлические материалы, не вступающие в реакцию с водородом. Водород защищает металлы от воздействия воздуха, восстанавливает оксиды и обеспечивает возможность пайки без применения флюсов.

Наилучшим для пайки считается водород, осушенный до точки росы (233... 223 К) и содержащий  $\leq 0,003... 0,005$  % кислорода. Так как тонкая очистка водорода требует частой регенерации или замены очищающих веществ, в производстве нередко используют водород с пониженными требованиями к содержанию примесей, достаточно активно восстанавливающий оксиды таких металлов, как никель, медь, константан. В таком водо-



роде труднее восстанавливаются оксиды на поверхности деталей из ковара, железоникелевых сплавов, железа, углеродистых сталей и особенно коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и других сплавов, содержащих хром. При этом детали покрываются устойчивой, плотной и прочной пленкой, совершенно не смачиваемой припоями. Однако необходимо отметить, что пайка в водороде даже тонкой очистки может быть затруднена или невозможна вследствие выделения паров воды и кислорода из обрабатываемых деталей, внутренней арматуры или футеровки печей.

В вакууме паяют преимущественно детали из труднообжигаемых (молибден, титан) в водороде или реагирующих с ним (бронза, медь) металлов, а также если к чистоте шва и прилегающих к нему зон предъявляют повышенные требования. Наилучшие результаты получают при пайке мало- и крупногабаритных деталей в вакууме со значительным газовыделением. Для улучшения условий пайки в вакууме детали из молибдена и титана перед пайкой покрывают гальваническим способом последовательно слоями меди, никеля, а иногда и серебра. Так, для молибдена толщина слоя меди 3...5 мкм, слоя никеля 7...10 мкм. Такие покрытия исключают вызывающую появление течей межкристаллитную коррозию таких сплавов, как, например, ковар, и улучшают смачиваемость молибдена и титана.

Растекаемость припоев и характер диффузионных процессов при пайке в значительной степени зависят от состояния поверхности деталей, их взаимного расположения и крепления, а также формы и размещения припоев. Пайкой целесообразно соединять детали с шероховатой поверхностью, так как микронеровности способствуют лучшему растеканию припоев вследствие капиллярного эффекта и получению более прочных соединений.

Растекаемость характеризуется отношением площади, занимаемой припоем до расплавления, к площади, занимаемой

им после расплавления. Смачиваемость может быть удовлетворительной лишь при полном отсутствии на соединяемых поверхностях оксидов и других соединений, наличие которых на отдельных участках может привести к нарушениям герметичности шва при его достаточной механической прочности. Перед пайкой детали очищают: обезжиривают в горячем трихлорэтилене, обрабатывают кислотами и щелочами.

Глубина проникновения расплавленного припоя в зону пайки под действием капиллярных сил зависит от зазора между деталями, который обычно составляет 0,05...0,15 мм. Зазор принимают с учетом геометрических размеров и конструктивных особенностей деталей, а также свойств соединяемых металлов с учетом их температурного коэффициента линейного расширения.

Слишком малые зазоры припой может не заполнить, что вызывает появление пустот в шве, уменьшает прочность, герметичность, ухудшает другие характеристики соединения. При больших зазорах действие капиллярных сил может оказаться недостаточным для затягивания припоя в шов, что также снижает прочность и вакуумную плотность соединений.

Обычно применяют припой в виде колец из проволоки или фольги. Проволочный припой лучше располагать над швом, по возможности ближе к зазору, что способствует действию капиллярных сил и позволяет одновременно использовать силу тяжести припоя. Припой в виде фольги целесообразно закладывать в зазор между плоскостями соединяемых деталей.

В зависимости от назначения паяных соединений применяют пайку твердыми или мягкими припоями. При пайке твердыми припоями с температурой плавления  $> 823$  К соединение обладает значительной механической прочностью. Соединения, получаемые пайкой мягкими припоями, которые плавятся при температуре  $< 673$  К, имеют незначительную прочность.

При пайке твердыми припоями получают прочные вакуумно-плотные швы, способные выдерживать нагрев и сохраняющие необходимые теплопроводность и электрическую проводимость. Давление паров припоев в вакууме не должно быть выше давления паров соединяемых металлов при минимальном содержании в них примесей.

Пайку мягкими припоями применяют для получения вакуумно-плотных соединений, в том числе при периодической разгерметизации соединения нагреванием до температуры плавления припоя.

Для пайки деталей электровакуумных приборов применяют припой на основе серебра, меди и золота (табл. 5.1).

### 5.1. Припой для пайки деталей электровакуумных приборов

Припой (состав)	$T_{пл}$ , К	Соединяемые металлы	Ширина зазора, мм
Медный	1356	Ковар–ковар, сталь–сталь	0...50
Серебряный	1233	Медь–медь, медь–ковар	0...45
Медно-серебряный эвтектический (72 % Ag, 28 % Cu)	1053	Медь–медь, медь–ковар, медь–сталь	
Медно-серебряный фосфористый (15 % Ag, 80 % Cu, 5 % P)	913...973	Медь–медь, ковар–молибден, ковар–ковар	
Медно-серебряно-индиевый (85 % Cu, 10 % Ag, 5 % In)	1173...1223	Медь–медь, сталь– сталь, медь–сталь	
Индиевый (27 % Cu, 63 % Ag, 10 % In)	958...983	Медь–ковар, медь–медь, медь–сталь	
Индиевый (30 % Cu, 65 % Ag, 5 % In)	1043...1073		
Золотомедный (63 % Cu, 37 % Au)	1233		25...65

Для улучшения смачиваемости используют флюсы на основе тетрабората натрия  $Na_2B_4O_7$ . В зависимости от соединяемых материалов в состав флюсов вводят интенсификаторы, например фторид кальция  $CaF_2$ . Так, для пайки медных деталей применяют флюс, содержащий, %, 40  $Na_2B_4O_7$ , 40 борной кислоты  $H_3BO_3$  и 20 – соды  $Na_2CO_3$ , а деталей из стали 12X18H10T – флюс, состоящий, %, из 20  $Na_2B_4O_7$ , 70  $H_3BO_3$  и 10  $CaF_2$ .

Скорость взаимной диффузии и смачиваемость увеличиваются с повышением температуры и времени пайки. Однако во избежание структурных изменений и возможных деформаций деталей температура пайки должна не более чем на 313...323 К быть выше температуры плавления припоя. Продолжительность нагрева и вы-

держки деталей при температуре пайки должна быть достаточна для завершения диффузионных процессов и определяется размерами соединений, их расположением по отношению к источнику теплоты, активностью среды, размерами зазоров и др.

Примеры паяных соединений, широко используемых в вакуумной технике, приведены на рис. 5.7.

Для получения высококачественных вакуумно-плотных соединений существенное значение имеет правильный выбор зазора и допусков на размеры сопрягаемых деталей. При пайке мягкими припоями оптимальный зазор между соединяемыми деталями составляет 0,05...0,15 мм. Ориентировочные зазоры при пайке твердыми припоями указаны в табл. 5.1. При выборе допусков соединения для пайки



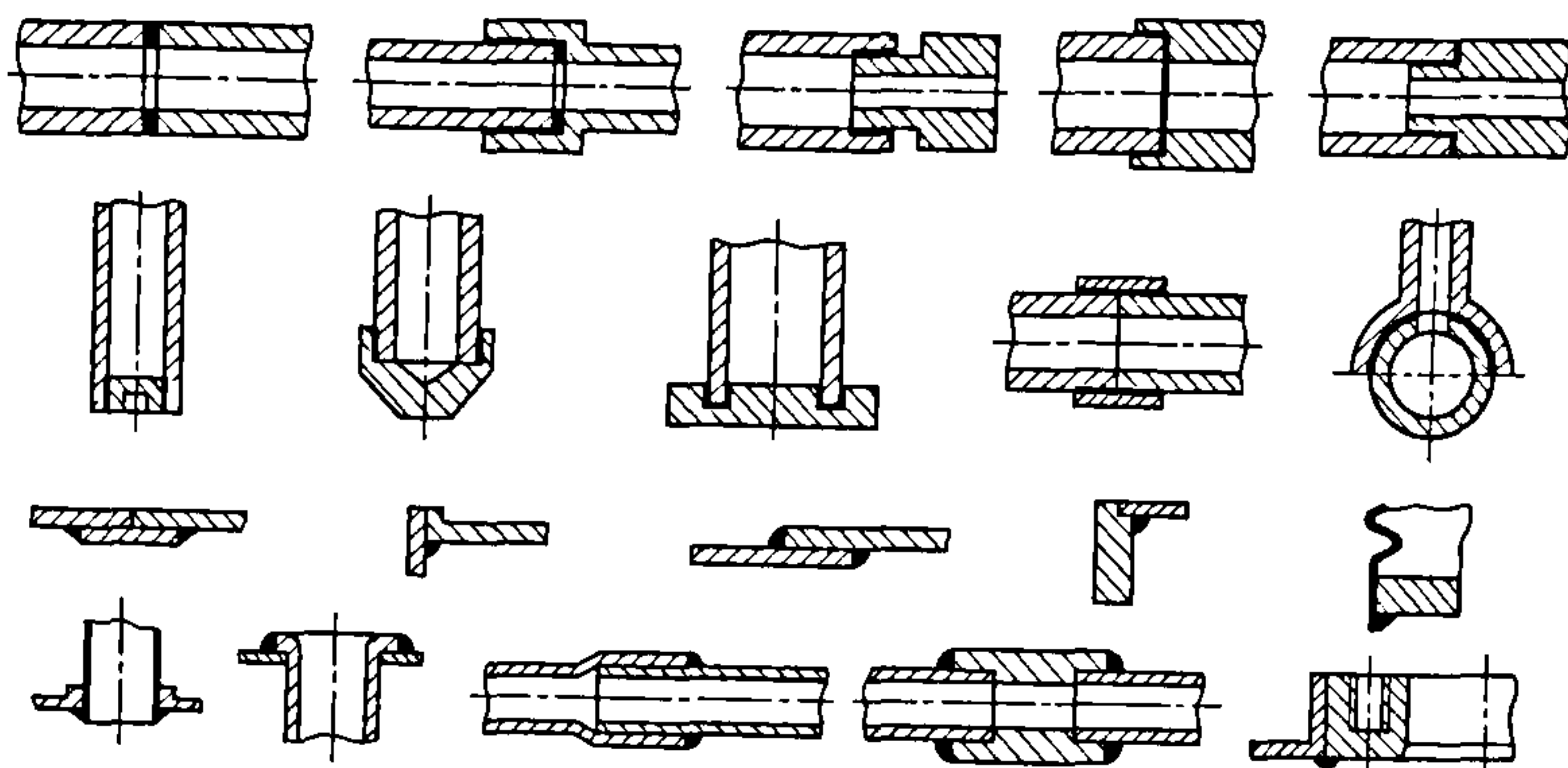


Рис. 5.7. Паяные соединения

деталей из однородных металлов температурное влияние не учитывают. Для пайки деталей из разнородных металлов допуски рассчитывают с учетом температурного расширения материалов каждой из сопрягаемых деталей.

**Пример.** Определить допуски соединения (рис. 5.8), если известны: номинальный диаметр  $D$  соединяемых пайкой поверхностей, наибольший  $S$  и наименьший  $s$  зазоры между деталями при пайке, температурные коэффициенты линейного расширения материалов вала  $\alpha_1$  и втулки  $\alpha_2$ ; температура пайки  $T_p = T_{пл} \dots 40$  К, где  $T_{пл}$  – температура плавления материала.

Наибольший  $S$  и наименьший  $s$  зазоры связаны с наибольшими  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  и наименьшими  $\delta_1$  и  $\delta_2$  допусками зависимостями

$$\begin{aligned} S &= (D + \Delta_2)(1 + \alpha_2 T_p) - (D - \Delta_1)(1 + \alpha_1 T_p) = \\ &= D(\alpha_2 - \alpha_1)T_p + \Delta_2(1 + \alpha_2 T_p) + \Delta_1(1 + \alpha_1 T_p); \\ s &= (D + \delta_2)(1 + \alpha_2 T_p) - (D - \delta_1)(1 + \alpha_1 T_p) = \\ &= (\alpha_2 - \alpha_1)T_p + \delta_2(1 + \alpha_2 T_p) + \delta_1(1 + \alpha_1 T_p). \end{aligned}$$

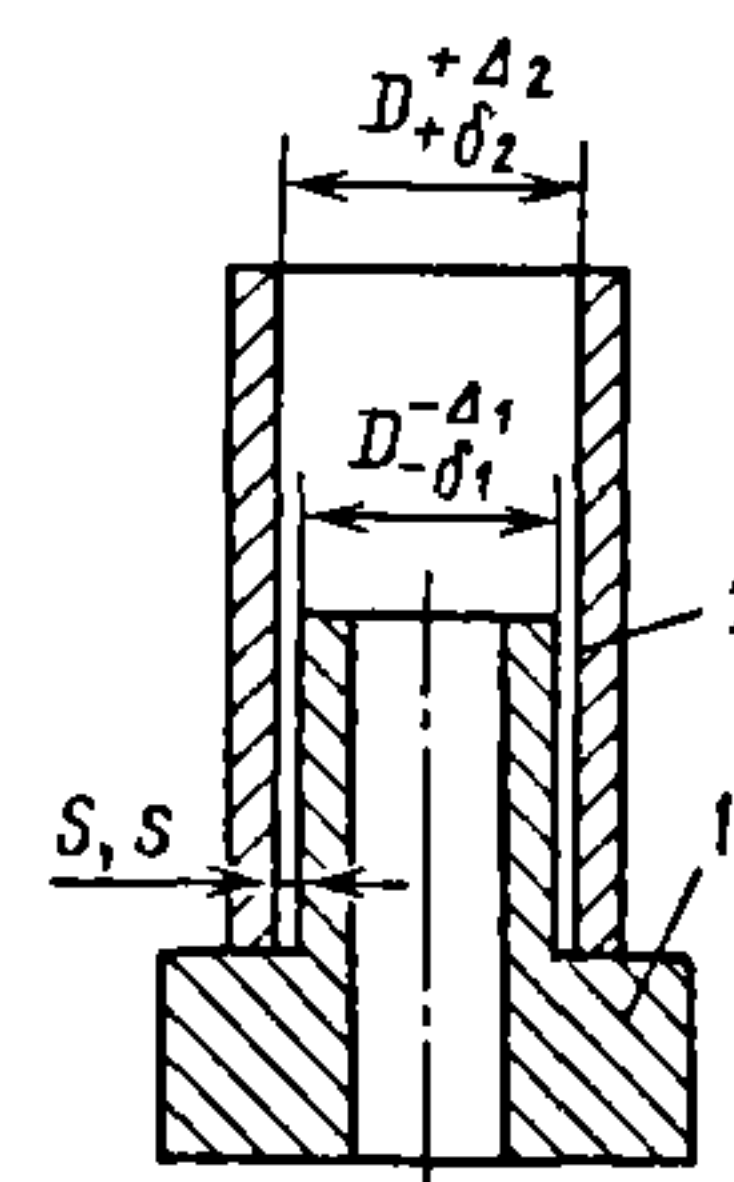
Отсюда можно определить допуски на размеры сопрягаемых деталей. По исходным данным выбираем допуски на охватываемую деталь по системе вала.

Масса припоя, кг, необходимого для образования высококачественного слоя,

$$M = 1,5V_p,$$

где  $V$  – объем максимального зазора между деталями при температуре пайки,  $\text{м}^3$ ;  $\rho$  – плотность материала припоя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Рис. 5.8. Схема к расчету допусков соединения из двух деталей, материалы которых имеют различные температурные коэффициенты линейного расширения:  
1 – вал; 2 – втулка



#### 5.4. ВАКУУМНО-ПЛОТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЛАЗУРЕЙ, СИТАЛЛОЦЕМЕНТОВ И ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ

Высокотемпературные глазури, изготавливаемые из различных порошкообразных стекол, иногда называют *стеклянными припоями*. Глазури предназначены для соединения деталей из стекла, керамики, металлов; температура размягчения глазури значительно ниже температуры размягчения соединяемых деталей, которые при сборке не должны деформироваться.

К свойствам глазури предъявляют ряд требований, трудно удовлетворяемых одновременно. Так, глазурь должна быть однородной по составу и не расстекловываться после расплавления (т.е. не переходить из стеклообразного состояния в кристаллическое) даже при длительном нагреве; иметь вязкость (при температуре

пайки)  $10^3 \dots 10^5$  Па·с и при этом обладать достаточной, но не слишком высокой текучестью; хорошо смачивать место спая. Глазурь и соединяемые материалы необходимо подбирать по температурным коэффициентам линейного расширения. Стекланные глазури должны активно взаимодействовать с поверхностями соединяемых деталей, т.е. образовывать химические соединения, твердые растворы и не разлагаться при нагревании в вакууме. Газовыделение при этом должно быть минимальным.

Этим требованиям наиболее полно отвечают глазури на основе оксида бора (температура размягчения 713...623 К), бариевые и цинк-боридные (823...883 К).

Глазурь получают из смеси размягченного стекла и 5%-ного спиртового раствора полнамидной смолы (соотношение 2:1). В вакуумной технике стекланные глазури используют, например, для получения вакуумно-плотных соединений стекланных деталей между собой, а также с металлическими или керамическими деталями. Металлические детали рекомендуется изготавливать из железоникелевого сплава, а поверхность их меднить.

Для получения, вакуумно-плотных соединений широко используют ситаллоцементы. Применение ситаллоцементов

позволило устранить основной недостаток глазурей – невозможность нагрева соединений до температуры  $> 573$  К.

Ситаллоцементом можно соединять детали при сравнительно низких температурах (например, ситаллоцементом СЦ 90-1 при  $T = 713$  К). При термообработке происходит кристаллизация ситаллоцемента, после чего его можно применять без опасения деформаций шва при температуре на несколько десятков градусов выше температуры, при которой выполнено соединение деталей. При температуре  $< 713$  К предпочтительнее применять ситаллоцемент СЦ 90-2, так как он имеет более низкую температуру кристаллизации ( $693 \pm 5$  К).

Эпоксидные смолы все чаще используют для получения неразъемных вакуумно-плотных соединений. Выбор смолы в каждом конкретном случае зависит от типа уплотнения, толщины клеевого слоя и возможности его нагрева для полимеризации.

Для склеивания материалов с одинаковыми или незначительно различающимися температурными коэффициентами линейного расширения предпочтительны смолы, отверждающиеся при нагреве; в противном случае следует применять смолы, полимеризующиеся при нормальной температуре.

Наиболее надежны охватывающие соединения, характеризующиеся взаимным перекрытием двух деталей, связанных находящейся между ними пленкой клея. Их применение особенно целесообразно при соединении трубопроводов. Охватывающие соединения могут быть телескопическими (рис. 5.9, а), ступенчатыми (рис. 5.9, б), с внешней (рис. 5.9, в) или внутренней (рис. 5.9, г) муфтой.

При конструировании клеевых соединений необходимо учитывать, что они хорошо работают на срез и плохо на разрыв, поэтому уплотнения на эпоксидной смоле, которые могут быть подвержены растяжению или сжатию, не следует выполнять торцовыми. В этом случае необходимо использовать конструкцию с пе-

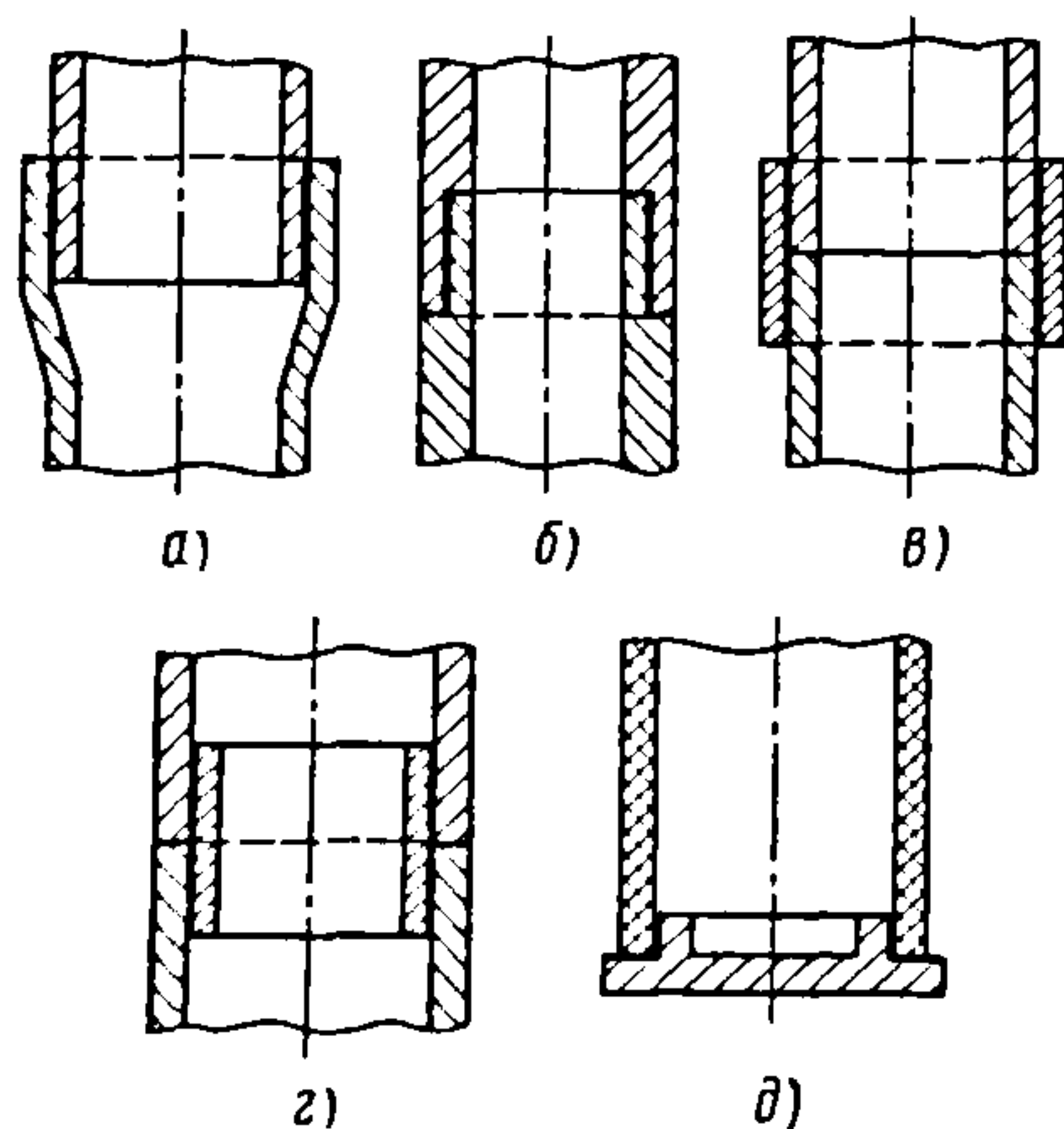


Рис. 5.9. Варианты соединения труб на эпоксидной смоле



рекрытием, например охватывающего типа. Торцовые соединения (рис. 5.9, д) применяют, когда детали подвергаются сдвигу или кручению.

Уплотнения на основе эпоксидных смол успешно применяют при изготовлении смотровых окон, а также вводов электродов и термопар.

### 5.5. РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Разъемные вакуумно-плотные соединения предназначены для обеспечения свободного доступа к внутренним устройствам вакуумных установок, облегчения монтажных работ и замены вышедших из строя элементов.

Выбор конструкции разъемного соединения для работы в конкретной вакуумной системе определяется предельным давлением в откачиваемой вакуумной камере, материалами и размерами соединяемых деталей, чистотой сборки, температурным режимом, условиями проверки на герметичность и условиями работы вакуумной установки.

В разъемных вакуумных соединениях используют как неметаллические, так и металлические уплотнители.

Соединения с неметаллическими уплотнителями (чаще всего резиной) просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, но имеют ограниченную термостойкость и повышенные газоотделение, проницаемость, хрупкость при низких температурах, что несколько сужает область их применения. Соединения этого типа используют в вакуумных системах при давлении  $\geq 5 \cdot 10^{-5}$  Па и температуре  $\leq 523$  К (термостойкие резины).

Степень сжатия резиновых уплотнителей зависит от марки резины, требуемой герметичности и вида соединения.

Резины практически несжимаемы, поэтому площадь сечения канавки под уплотнитель должна быть на 2...5 % больше площади сечения уплотнителя. Для достижения вакуумной плотности

соединения деформация резинового уплотнения в зависимости от его твердости должна составлять 20...40 %. Чтобы резиновый уплотнитель воспринимал только дозированную силу сжатия и не влиял на точность установки деталей соединения, последние рекомендуется затягивать до соприкосновения металлических поверхностей.

В установках с предельным остаточным давлением  $5 \cdot 10^{-6}$  Па, как правило, применяют вакуумные уплотнения с прокладками из резины марок 7889, 9024, ИРП-2043 и фторопласта-4. В сверхвысоковакуумных прогреваемых установках с предельным остаточным давлением до  $5 \cdot 10^{-6}$  Па используют уплотнения из полиамида, а также металлические прокладки из отожженной меди, индия, алюминия, а в некоторых ответственных случаях из золота.

Наиболее простой вариант уплотнения вакуумных шлангов форвакуумных систем (до  $10^{-2}$  Па) – с использованием оливок. Геометрические размеры, мм, оливок (рис. 5.10) рекомендуется выбирать из следующих соотношений:  $D = (1,5...1,3)d$ ;  $D_1 = d + (1,5...3,0)$ ;  $R = c + (0,3...0,5)D$ , где  $d$  – внутренний диаметр резинового вакуумного шланга. Если оливки гладкие, для надежной герметизации шлангов применяют гибкие ленточные хомуты.

Для уплотнения стеклянных и металлических трубок и стержней малого диаметра (до 25 мм) широко распространено зажимное штуцерное соединение с резиновым уплотнением.

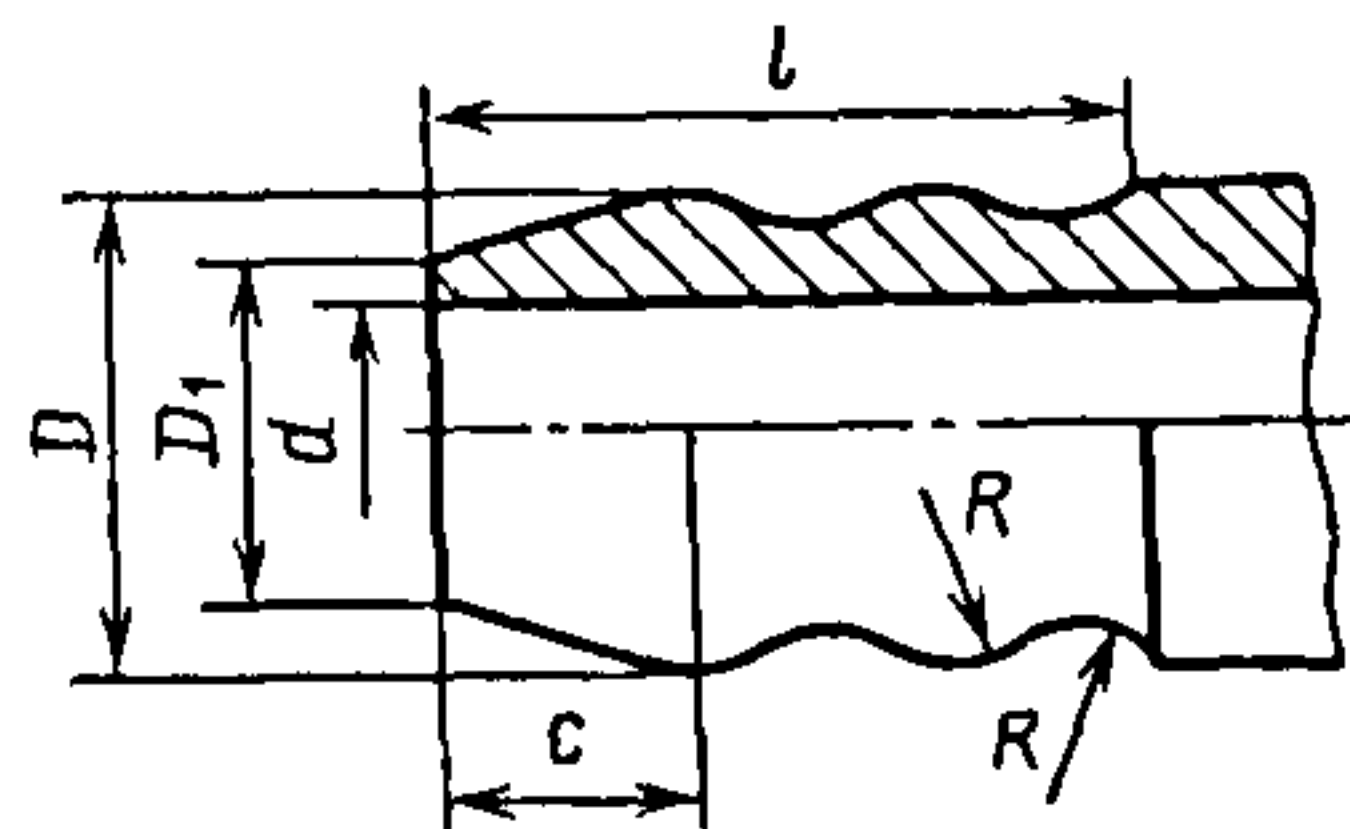


Рис. 5.10. Оливка для уплотнения вакуумного шланга

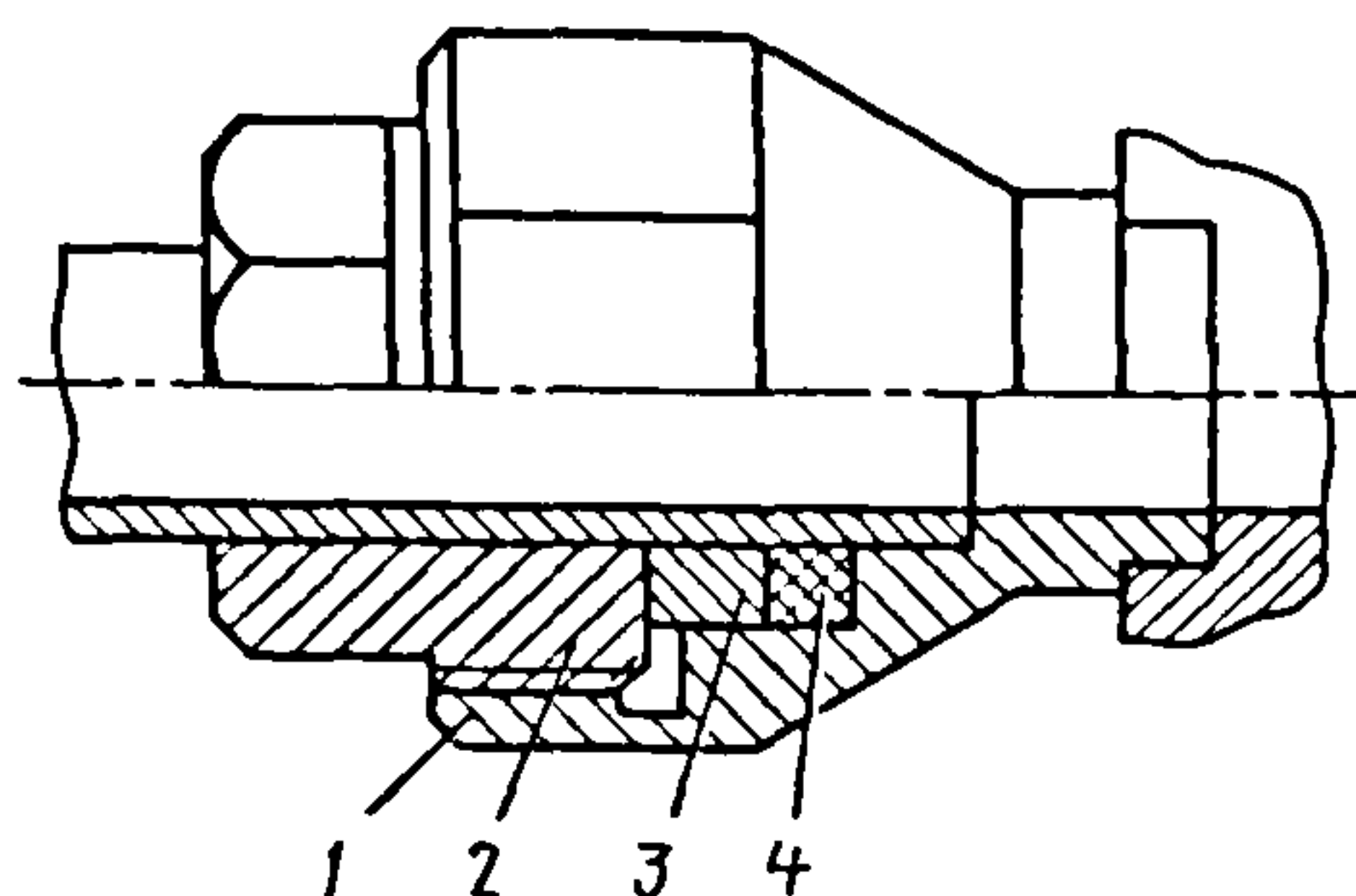


Рис. 5.11. Штуцерное соединение с резиновым уплотнением:  
1 – корпус; 2 – гайка; 3 – кольцо;  
4 – уплотнение

Штуцерные (рис. 5.11 и 5.12), штуцерно-ниппельные и фланцевые соединения с резиновыми и металлическими уплотнениями выполняют по ОСТ 11 868.003–76 ...ОСТ 11 868.010–76. В табл. 5.2 и 5.3 приведены размеры корпуса, гайки и кольца, изготовленных из сталей 20 и 12Х18Н10Т, в табл. 5.4 – размеры уплотнения из резины 9024.

Детали штуцерно-ниппельного соединения (рис. 5.13 и 5.14, табл. 5.5–5.7) выполняют из стали 20 или 12Х18Н10Т, уплотнение – из резины марки 9024 или 51-1578.

### 5.2. Размеры, мм, корпуса из стали 12Х18Н10Т (см. рис. 5.12, а)

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$h$	$h_1$	$h_2$	$L$	$l$	$l_1$	$S$
10	33	27×1,5	22	17	15	18	24	20	12	40	16	4	30
16	38	33×1,5	29	21	21	23	29	24	13	46	21	5	36
25	55	45×2,0	42	31	30	32	40	32	19	63	30	6	50

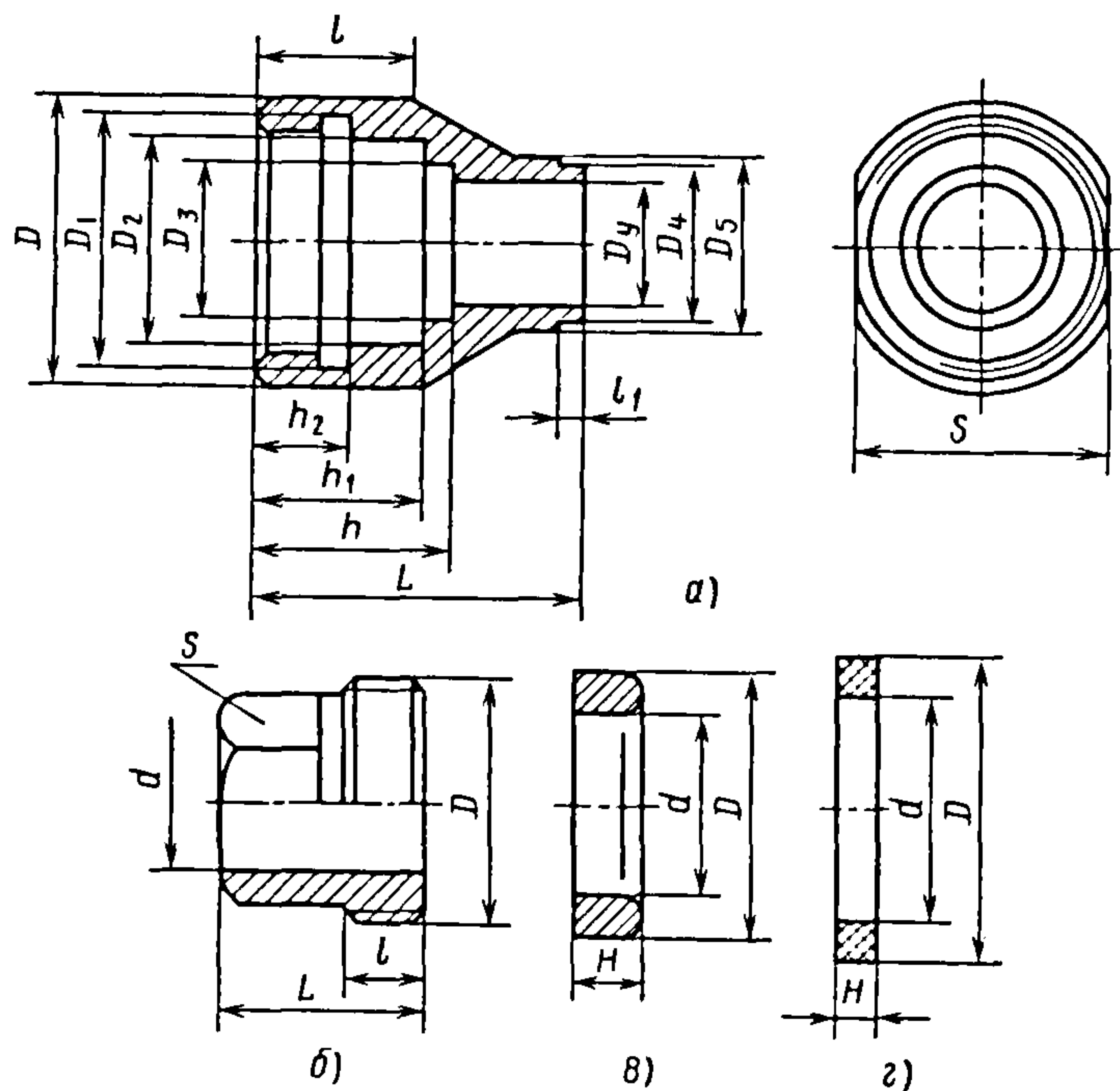


Рис. 5.12. Элементы штуцерного соединения:  
а – корпус; б – гайка; в – кольцо; г – уплотнение



**5.3. Размеры, мм, гайки и кольца из стали 20**

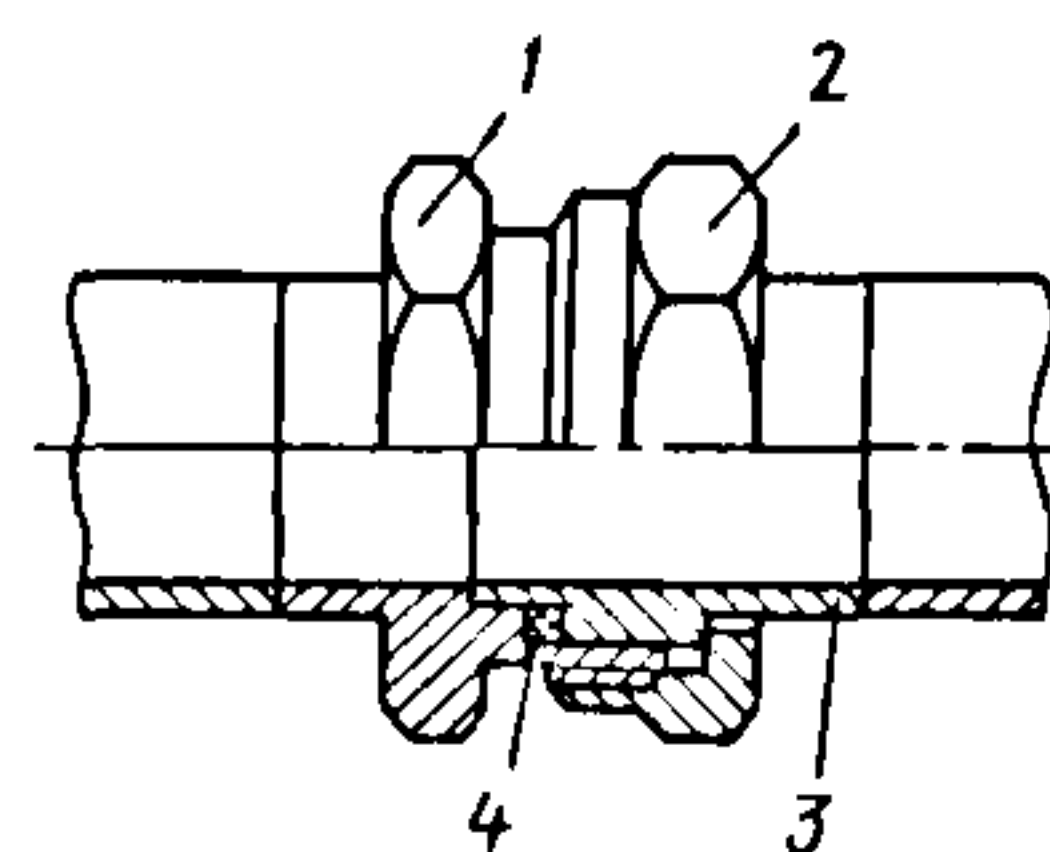
$D_y$	Размеры							
	гайки (см. рис. 5.12, б)					кольца (см. рис. 5.12, в)		
	$D$	$d$	$L$	$l$	$S$	$D$	$d$	$H$
10	M27×1,5	17	22	9	22	22	17	5,5
16	M33×1,5	21	24	9	27	29	21	6,5
25	M45×2,0	3	32	13	36	42	31	8,0

**5.4. Размеры, мм, уплотнения из резины 9024 (см. рис. 5.12, г)**

$D_y$	$D$	$d$	$H$
10	22±0,4	16±0,3	6±0,3
16	29±0,4	19±0,4	8±0,3
25	42±0,5	30±0,4	10±0,3

Телескопическое бесфланцевое уплотнение (рис. 5.15) очень удобно для регулирования длины трубопровода.

Для больших контуров (вакуумных камер, корпусов любых геометрических очертаний и др.) применяют бесфланцевые торцовые уплотнения (рис. 5.16). Ширина

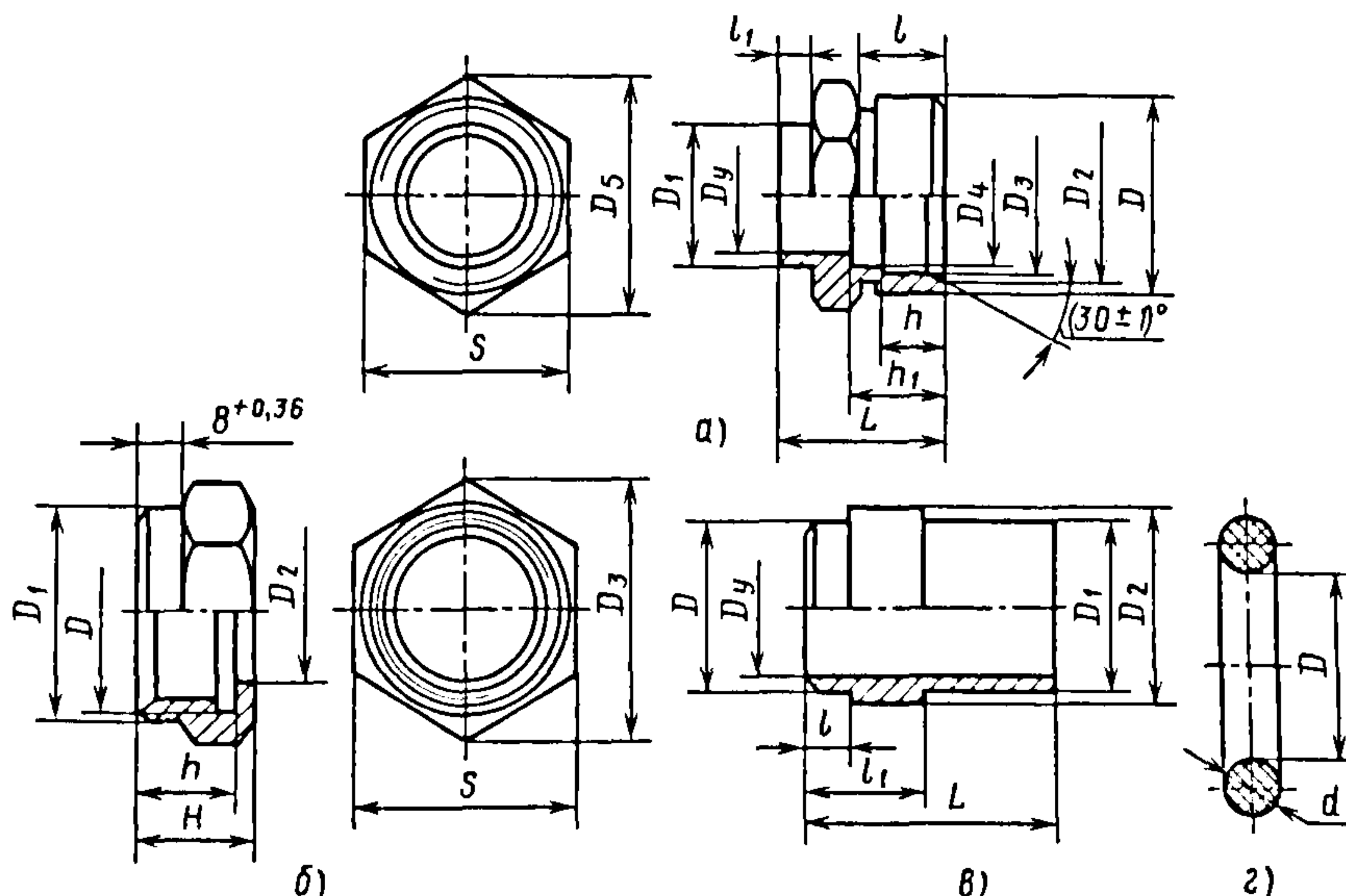


**Рис. 5.13. Штуцерно-ниппельное соединение с резиновым уплотнением:**  
1 – штуцер; 2 – гайка; 3 – ниппель;  
4 – уплотнение

**5.5. Размеры уплотнения (см. рис. 5.12, г), мм**

$D_y$	$D$	$d$
10	12	2,0
16	18	2,0
25	27	2,5

зоны уплотнения равна толщине обечаек 1; диаметр шнурового уплотнителя 2 больше толщины обечаек на 2...4 мм. Оптимальная для надежной герметизации деформация уплотнителя достигается регулированием внешних упоров 3. Сила сжатия уплотнителя создается атмосферным давлением или специальными прижимами. Флан-



**Рис. 5.14. Элементы штуцерно-ниппельного соединения:**  
а – штуцер; б – гайка; в – ниппель; г – уплотнение

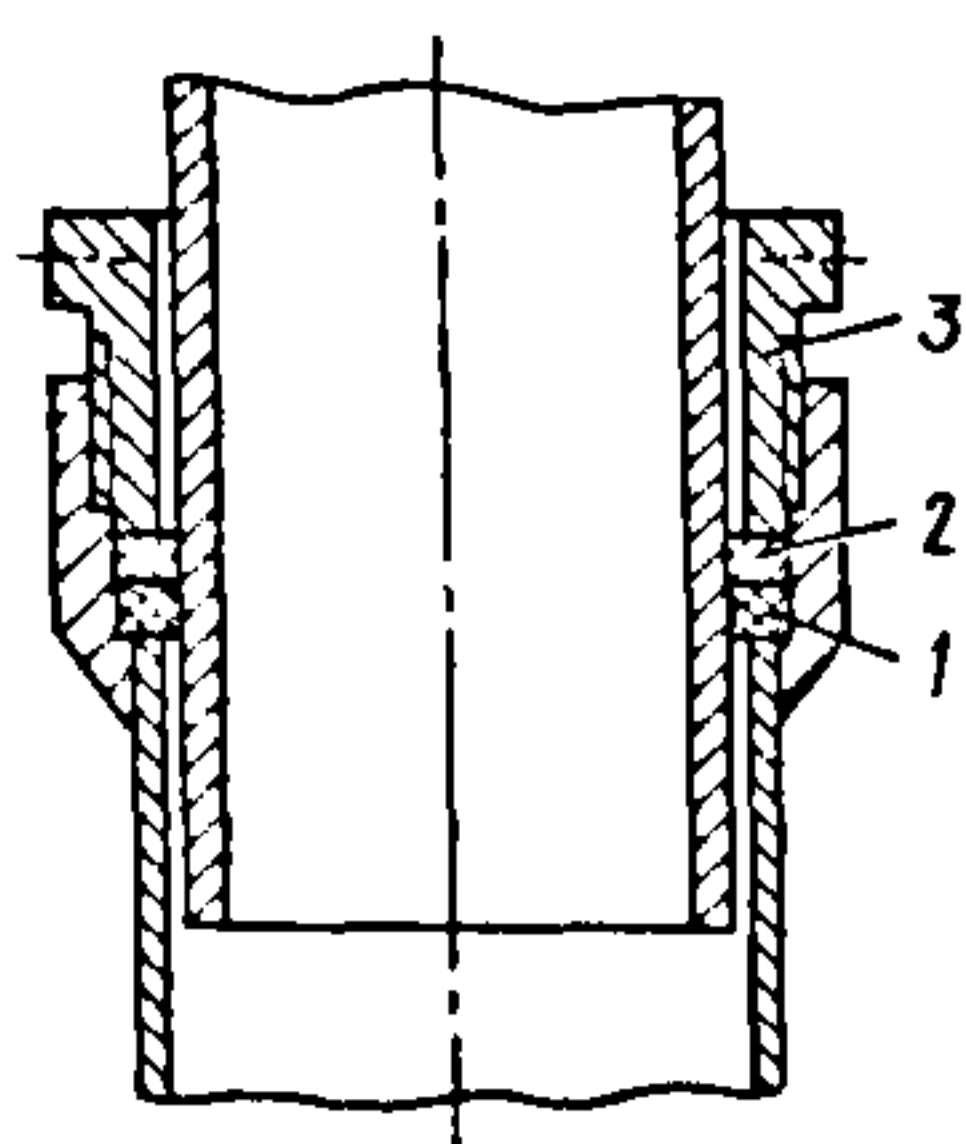


Рис. 5.15. Телескопическое уплотнение:  
1 – уплотнение; 2 – шайба; 3 – нажимная гайка

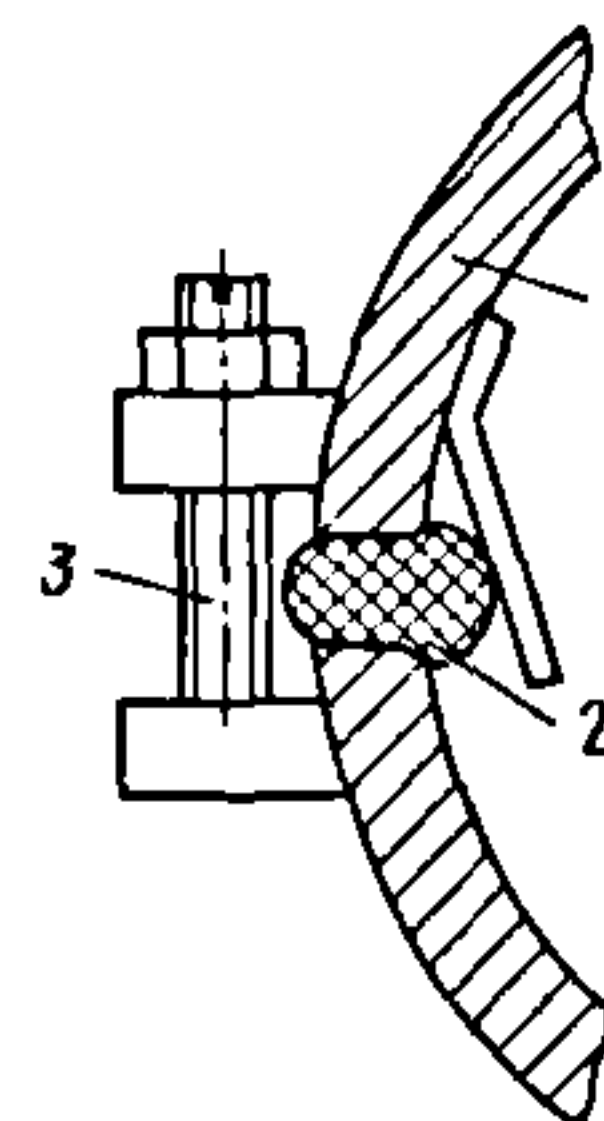


Рис. 5.16. Бесфлаицевое торцовое уплотнение  
для больших контуров

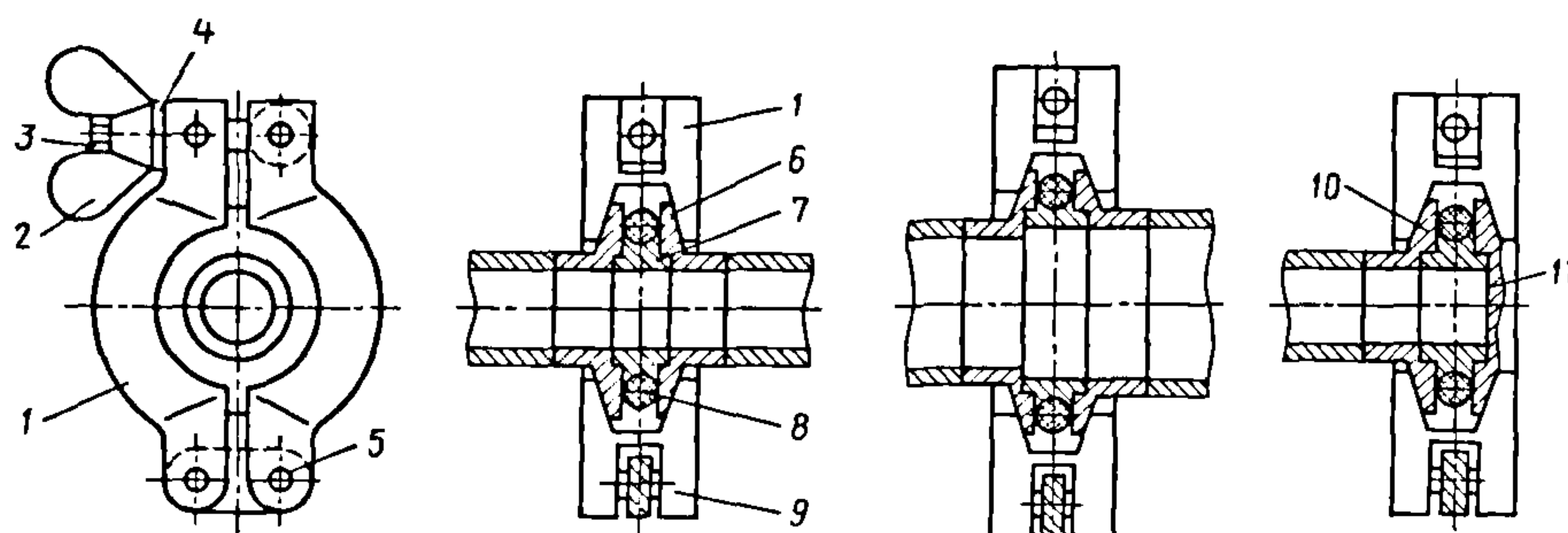


Рис. 5.17. Фланцевые соединения с накладными хомутами:  
1 – полукольцо; 2 – гайка; 3 – болт; 4 – шайба; 5 – штифт; 6, 10 – фланцы;  
7 – центрирующее кольцо; 8 – уплотнение; 9 – серьга; 11 – заглушка

#### 5.6. Размеры штуцера, мм, штуцерно-испытательного соединения (см. рис. 5.14, а)

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$L$	$S$	$l$	$l_1$	$h$	$h_1$
10	M20×1,5	12	17	16	12	25,4	30	22	13	6	9	14
16	M27×1,5	18	24	22	18	34,6	30	30	15	6	10	15
25	M39×1,5	28	34	32	28	47,3	33	41	17	7	13	19

#### 5.7. Размеры элементов, мм, штуцерно-ниппельного соединения

$D_y$	Размеры											
	гайки (см. рис. 5.14, б)							ниппеля (см. рис. 5.14, в)				
	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$H$	$S$	$h$	$D$	$D_1$	$D_2$	$L$	$l$
10	M20×1,5	23	12,5	31,5	16	27	14	12	12	16	30	6
16	M27×1,5	30	18,5	36,9	18	32	16	18	18	22	35	6
25	M39×1,5	43	28,5	53,1	21	45	18	27	27	32	40	6

цевые соединения с резиновыми прокладками конструктивно просты, надежны в эксплуатации, не требуют больших сил сжатия.

На рис. 5.17 и 5.18 показаны конструкция и элементы быстроразъемного фланцевого соединения с накладными хо-

мутах и резиновым уплотнением, работающего в диапазоне давлений  $1 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-6}$  Па при температуре окружающей среды 281...343 К. Размеры элементов соединения установлены ОСТ 11 868.005–76 (табл. 5.8–5.10).



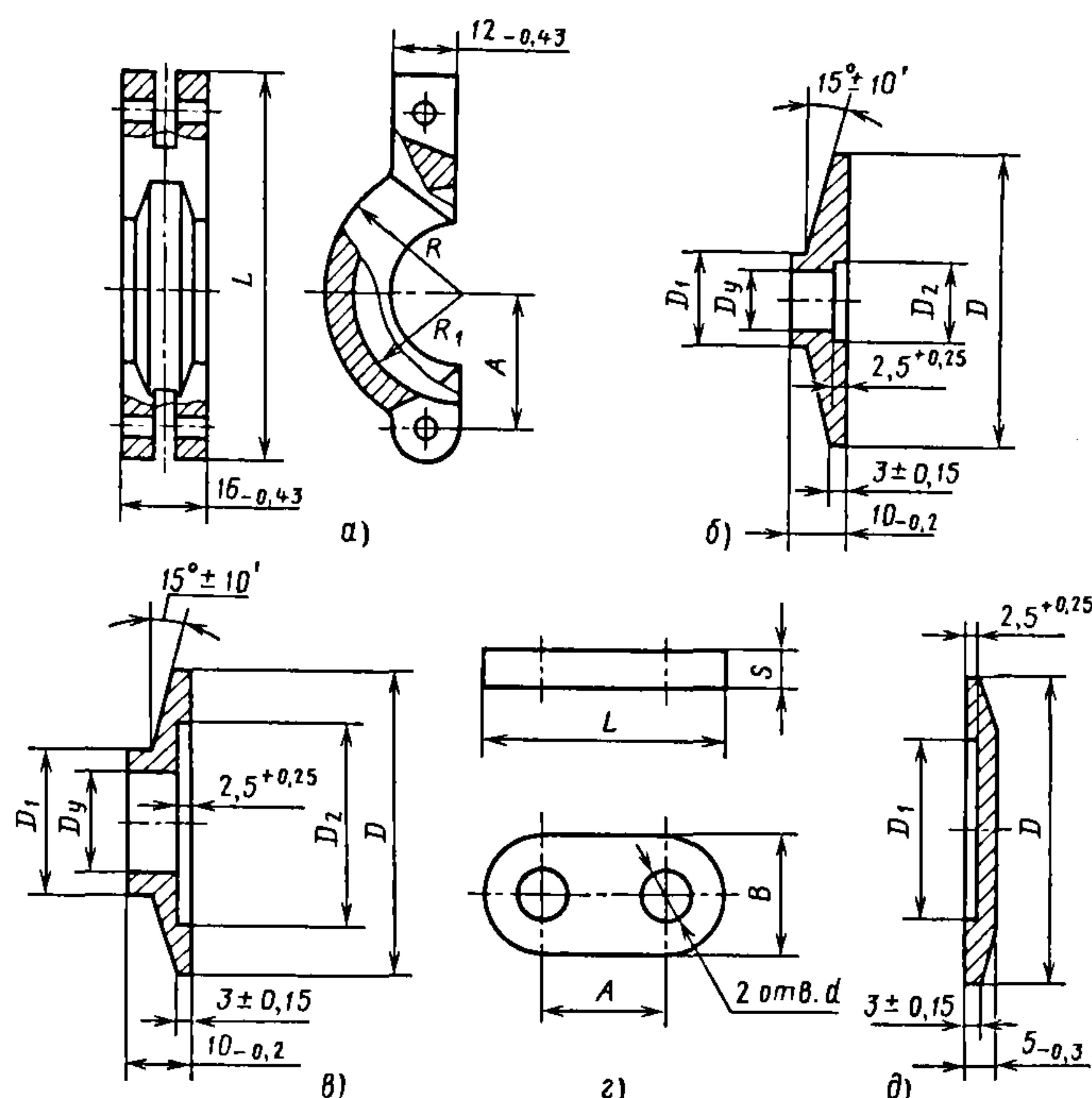


Рис. 5.18. Основные элементы соединения с накладными хомутами:  
а – полукольцо; б – базовый фланец; в – переходный фланец; г – серьга; д – заглушка

### 5.8. Размеры, мм, элементов соединения с накладными хомутами

$D_y$	Размеры						
	полукольца (см. рис. 5.18, а) из алюминиевого сплава АК7				базового фланца (см. рис. 5.18, б) из стали 20		
	$L$	$R$	$R_1$	$A$	$D$	$D_1$	$D_2$
10	62	22	17	26	30	14	12,2
16						20	18,2
25	75	27	22	34	40	30	27,2
40	90	35	30	40	55	45	42,2

### 5.9. Размеры переходного фланца (см. рис. 5.18, в), мм, из стали 20

соединения	$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$
	переходного фланца			
16	10	30	14	18,2
25	16	40	30	27,2
40	25	55	30	42,2

Конструкция и элементы фланцевого соединения с центрирующим кольцом и резиновым уплотнением для давлений  $1 \cdot 10^5 \dots 1,3 \cdot 10^5$  Па приведены на рис. 5.19 и 5.20 (табл. 5.11–5.19).

### 5.10. Размеры, мм, элементов в соединениях с накладными хомутами

$D_y$	Размеры					
	серьги (см. рис. 5.18, г) из стали 45					заглушки (см. рис. 5.18, д) из стали 20
	$L$	$B$	$S$	$A$	$d$	$D$
10	24	10	3,5	14	4	12,2
16						18,2
25						27,2
40	29	12	4,5	17	5	42,2

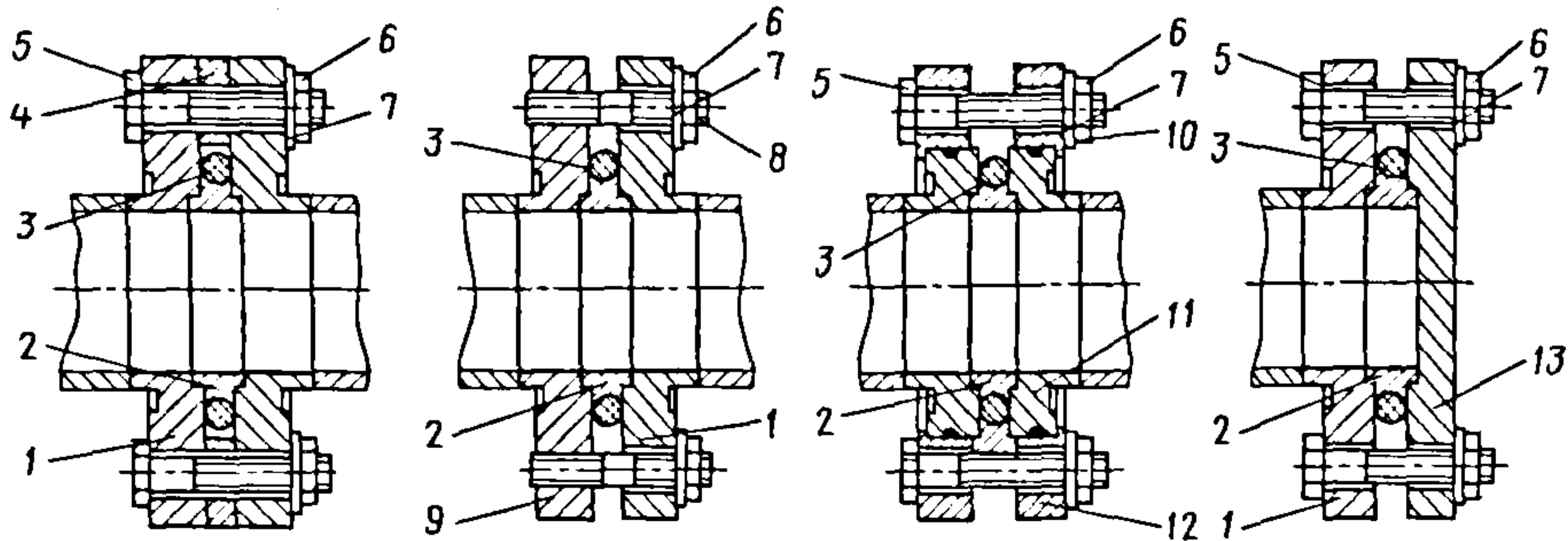


Рис. 5.19. Фланцевые соединения с резиновым уплотнением:

1, 11 – опорные фланцы; 2 – центрирующее кольцо; 3 – уплотнение; 4 – промежуточная шайба; 5 – болт; 6 – гайка; 7 – шайба; 8 – шпилька; 9 – резьбовой фланец; 10 – пружинное кольцо; 12 – накидной фланец; 13 – заглушка

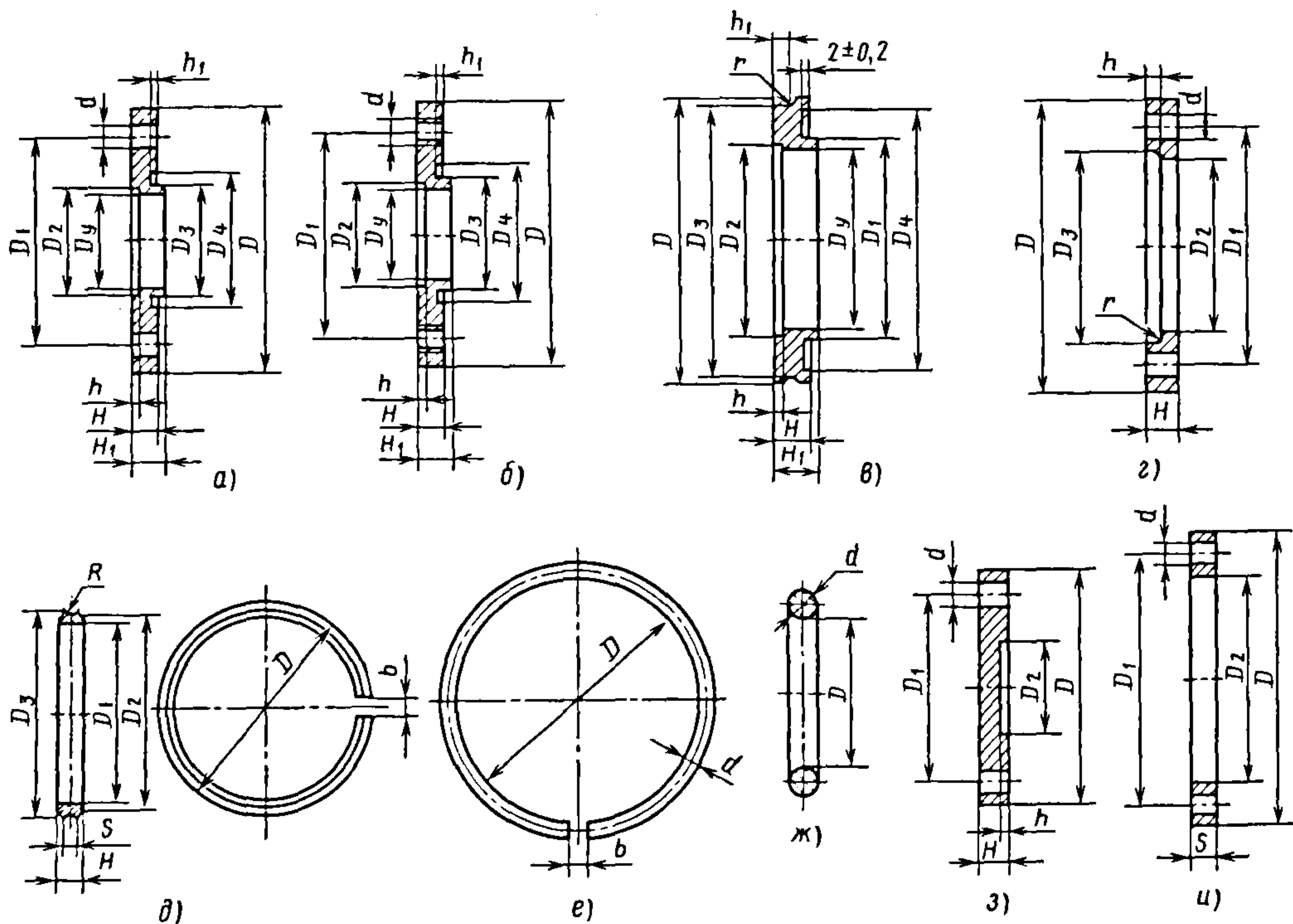


Рис. 5.20. Элементы фланцевого соединения с резиновым уплотнением:

а – фланец; б – резьбовой фланец; в – опорный фланец; г – накидной фланец; д – центрирующее кольцо; е – пружинное кольцо; ж – уплотнение; з – заглушка; и – промежуточная шайба



## 5.11. Размеры, мм, фланца (см. рис. 5.20, а) из стали 20 или 12X18H10T

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$H$	$H_1$	$h$	$h_1$	$d$	$n^*$	Позиционное отклонение отверстий диаметром $d$	
10	55	40	12,2	14	22	8	11	2,5	1,5	6,6	4	0,3	
16	60	45	18,2	20	28								
25	70	55	27,3	30	38								
40	100	80	42,2	45	53	12	14		3,0	9,0		8	0,5
63	130	110	66,0	70	78								
100	165	145	103	110	118								
160	225	200	—	170	178	16	17	—	4,0	11,0	12		
250	335	310	255	260	168								
400	510	480	405	410	418	20	21	4,5			14,0	16	1,0

\* Здесь и далее  $n$  — число отверстий под болты.

## 5.12. Размеры, мм, резьбового фланца (см. рис. 5.20, б) из стали 20 или 12X18H10T

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$H$	$H_1$	$h$	$h_1$	$d$	$n$	Позиционное отклонение отверстий диаметром $d$
10	55	40	12,2	14	22	8	11	2,5	1,5	M6	4	0,15
16	60	45	18,2	20	28							
25	70	55	27,3	30	38							
40	100	80	42,2	45	53	12	14	3,0	M8	8	0,25	
63	130	110	66,0	70	78							
100	165	145	103	110	118							
160	225	200	—	170	178	16	17	—	4,0	M10	12	0,5
250	335	310	255	260	168			4,5				
400	510	480	405	410	418	20	21				M12	

## 5.13. Размеры, мм, опорного фланца (см. рис. 5.20, в) из стали 20 или 12X18H10T

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$H$	$H_1$	$h$	$h_1$	$r$
63	95	70	66	92	90	12	14	2,5	5,0	1,5
100	130	110	103	127	125			—		2,5
160	180	170	—	175	175					
250	290	260	255	285	285			17	18	4,5
400	450	410	405	442	445					

**5.14. Размеры, мм, накладки фланца (см. рис. 5.20, г) из стали 20**

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$H$	$h$	$r$	$d$	$n$	Позиционное отклонение отверстий диаметром $d$
63	130	110	95,5	98,5	12	5,5	1,5	9	4	0,5
100	165	145	130,5	133,5					8	
160	225	200	180,7	185,7	16	6,5	2,5	11,0	12	
250	335	310	290,7	295,7					12	
400	510	480	450,8	458,8	20	10,0	4,0	14	16	1,0

**5.15. Размеры, мм, центрирующего кольца (см. рис. 5.20, д) из стали 20 или 12X18H10T**

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$H$	$S$	$b$	$R$
10	18	10	12	15,3	8,0	3,4	1,0	2,5
16	24	16	18	18,5				
25	33	25	27	28,5				
40	49	40	42	43,0				
63	76	63	66	78,0				
100	113	100	103	110,0	10,0	4,3	2,0	3,0
160	177	157	160	165,0				4,0
250	271	250	255	273,0				
400	427	400	405	412,0	14,0	5,9		

**5.16. Размеры, мм, пружинного кольца (см. рис. 5.20, е) из проволоки класса I (ГОСТ 9389-75)**

$D_v$	$D$	$d$	$b$
63	92	3,0	3
100	127		
160	175	5,0	
250	285		
400	442	8,0	

**5.17. Размеры, мм, уплотнения (см. рис. 5.20, ж) из резины 7889, 9024 или 51-1578**

$D_y$	$D$	$d$	$D_y$	$D$	$d$
10	14	5,0	100	105	5,0
16	18		160	160	6,0
25	28		250	260	8,0
40	42		400	400	
63	75				

**5.18. Размеры, мм, заглушки (см. рис. 5.20, з) из стали 20 или 12X18H10T**

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$H$	$h$	$d$	$n$	Позиционное отклонение отверстий диаметром $d$	
10	55	40	12,2	8	2,5	6,6	4	0,3	
16	60	45	18,2						
25	70	55	27,2						
40	100	80	42,2	12		9,0	8	0,5	
63	130	110	66,0						
100	165	145	103,0						
160	225	200	160,0	16	4,5	11,0			12
250	335	310	255,0						
400	510	480	405,0						



5.19. Размеры, мм, промежуточной шайбы (см. рис. 5.20, д)  
из стали 20 или 12X18H10T

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$S$	$d$	$n$	Позиционное отклонение отверстий диаметром $d$
63	130	110	96	3,9	9	4	0,5
100	165	145	128			8	
160	225	200	180	4,8	11	12	
250	335	310	290	6,4		14	16
400	510	480					

Для расчета потока натекания газа через резиновые уплотнения, схемы которых приведены на рис. 5.21, используется модель упругого контакта герметизирующего элемента с шероховатой поверхностью (модель А.Ротта).

Поток натекания газа (атмосферного воздуха)  $Q_n$ ,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ , через неподвижный контакт кольцевой прокладки круглого сечения диаметром  $d$  из вакуумной резины с металлической уплотняемой поверхностью с параметром шероховатости  $Ra$  равен

$$Q_n = 450 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{\Pi}{a} Ra^2 \Delta p e^{-3 \frac{p_d}{R}},$$

где  $T$  и  $M$  – температура, К, и молярная масса, кг/кмоль, натекающего газа соответственно;  $\Pi$  – периметр уплотнения, м;  $a$  – ширина контакта кольцевой прокладки с уплотняемой поверхностью, м;  $\Delta p = (p_r - p)$  – перепад давления газа на уплотнении [ $p_r$  – давление газа, равное атмосферному давлению  $p_{ат}$  (см. рис. 5.21, а) или давлению в промежуточной полости  $p_n$  (см. рис. 5.21, б);  $p$  – давление в вакуумной камере, Па]  $p_d$  – контактное давление уплотнительного элемента на уплотняемую поверхность;  $R$  – коэффициент уплотнения, Па.

Ширина контакта рассчитывается по формуле  $a = d(2\varepsilon - 0,15)$ , где  $\varepsilon$  – степень деформации прокладки, равная  $(d - h)/d$ ;  $d$  – диаметр недеформированной кольцевой прокладки;  $h$  – размер деформированной прокладки – см. рис. 5.21.

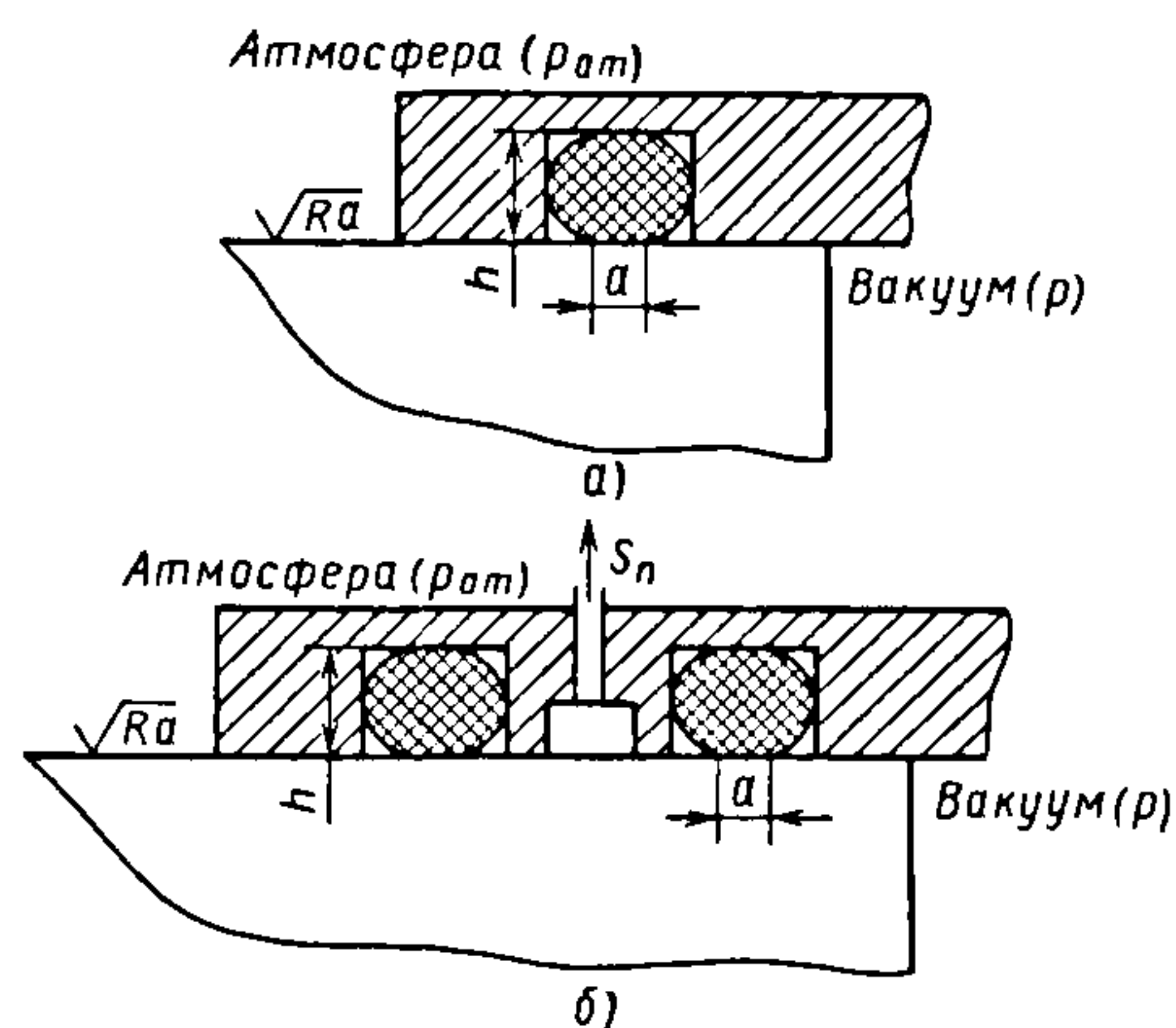


Рис. 5.21. Схемы уплотнения фланцевых соединений с одной кольцевой прокладкой (а) и с промежуточной откачкой  $S_n$  (б)

Контактное давление уплотнительного элемента на вал  $p_d = 1,25\varepsilon E$ , где  $E$  – модуль упругости материала уплотнительного элемента. Коэффициент уплотнения  $R \approx 0,05E$ .

Ниже будет приведен расчет потоков натекания газа  $Q_n$  через уплотнительные элементы с  $D_y$  40, для которого диаметр сечения кольцевой прокладки круглого сечения  $d = 3$  мм. Степень деформации  $\varepsilon$  выбираем равной 0,2. Ширина контакта уплотнительного кольца с уплотняемой поверхностью  $a = 0,75$  мм. Контактное давление уплотнительного кольца на уплотняемую поверхность  $p_d = 1,25E\varepsilon$  для резин марок ИРП-1345, ИРП-2043, 51-1578 и т.п. равно 3 МПа. Периметр уплотнения  $\Pi = \pi D_y = 3,14 \cdot 40 = 125,6$  мм.

Поток натекания газа  $Q_n$  через контакт уплотнительного кольца с уплотняемой

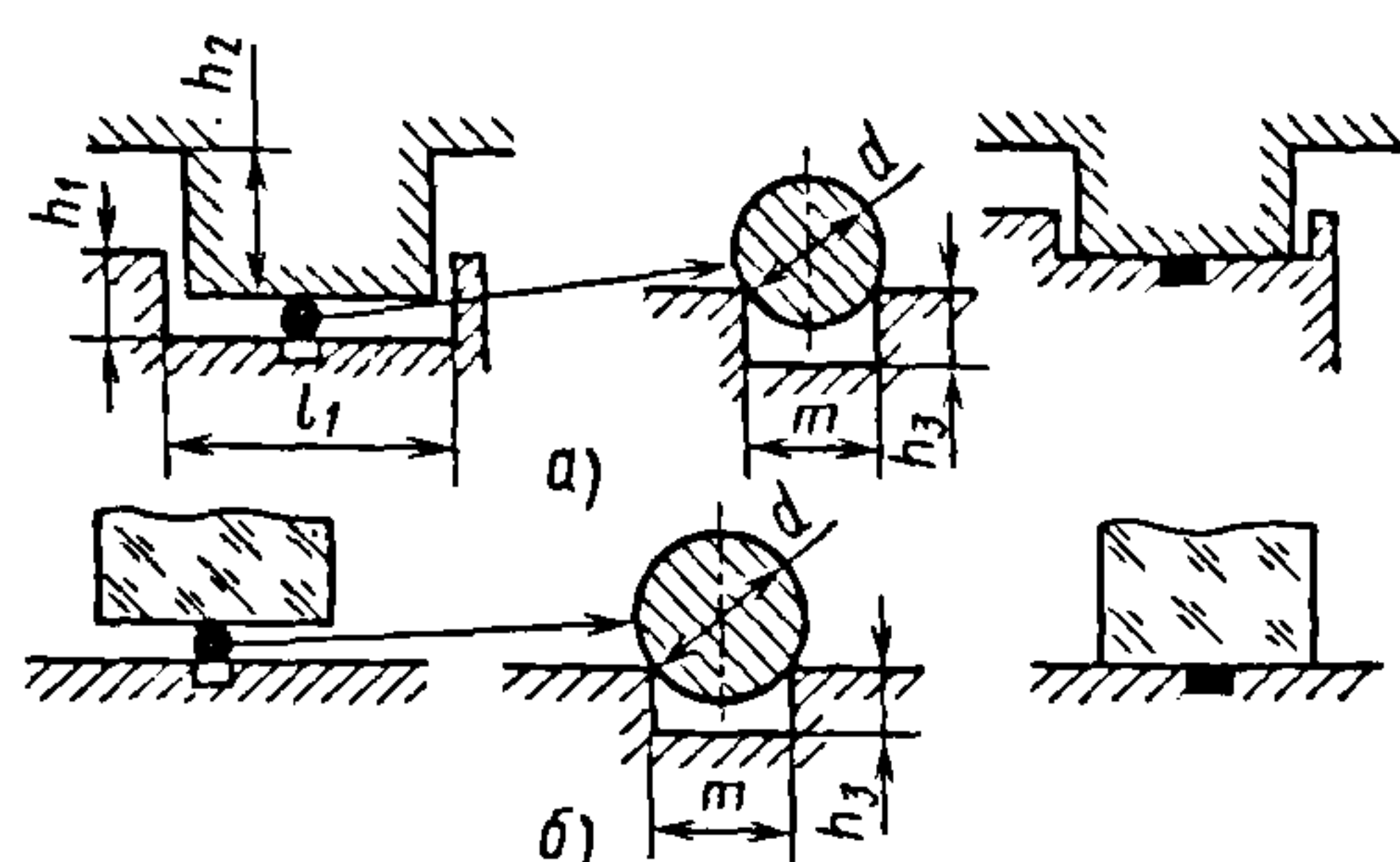


Рис. 5.22. Схемы установки индиевых прокладок под металлические фланцы (а) и фланцы из хрупких материалов (б)

поверхностью для  $D_y$  40 составляет:  $Q_n = 1,94 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$  для  $\Delta p = 10^5$  и  $Ra = 1,6 \text{ мкм}$ ;  $Q_n = 7,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$  при использовании промежуточной откачки с  $\Delta p = 1 \text{ Па}$  и  $Ra = 3,2 \text{ мкм}$ .

Рекомендуемая степень деформации уплотнительных прокладок круглого сечения  $\epsilon = 0,2 \dots 0,4$ , причем меньшее значение соответствует большей долговечности уплотнения при незначительном увеличении потока натекания газа.

Поток газопроницаемости  $Q_n, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , через материал уплотнительного элемента рассчитывается по формуле

$$Q_n = q_n \frac{H}{a} \Delta p,$$

где  $q_n$  — коэффициент удельной газопроницаемости,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $H$  — площадь сечения уплотнительной прокладки, которую для прокладки круглого сечения можно представить как произведение периметра уплотнения  $\Pi$  на размер деформированной прокладки  $h$ , т.е.  $H = \Pi h, \text{ м}$ .

Коэффициент удельной газопроницаемости  $q_n, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , для резиновых смесей на основе фторкаучуков составляет для ИРП-2043; ИРП-1345 и 51-1578

соответственно  $1 \cdot 10^{-12}$ ;  $6 \cdot 10^{-11}$ ;  $3 \cdot 10^{-12}$ . Для сравнения можно привести газопроницаемость фторопласта-4 (тефлона)  $q_n = 3,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , которая на 2–3 порядка больше, чем у данных резин.

Поток газовыделения  $Q_v, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , с поверхности уплотнительной прокладки, обращенной в вакуум, рассчитывается по формуле

$$Q_v = q_v S,$$

где  $q_v$  — коэффициент удельного газовыделения,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $S$  — площадь поверхности уплотнительной прокладки, обращенной в вакуум,  $\text{м}^2$ .

В сверхвысоковакуумных и специальных установках, в которых применяется длительный прогрев для обезгаживания вакуумной системы, используют металлические прокладки. Для вакуумных систем, прогреваемых до температуры  $\leq 423 \text{ К}$  (рис. 5.22, табл. 5.20), достаточно надежны и удобны уплотнения с прокладками из индия, которыми можно герметизировать не только металлы, но и стекло, керамику, фарфор и другие хрупкие материалы. Удельная сила, необходимая для обеспечения герметичности, составляет  $50 \dots 60 \text{ Н}/\text{см}$  при ширине уплотнения  $1 \text{ мм}$ .

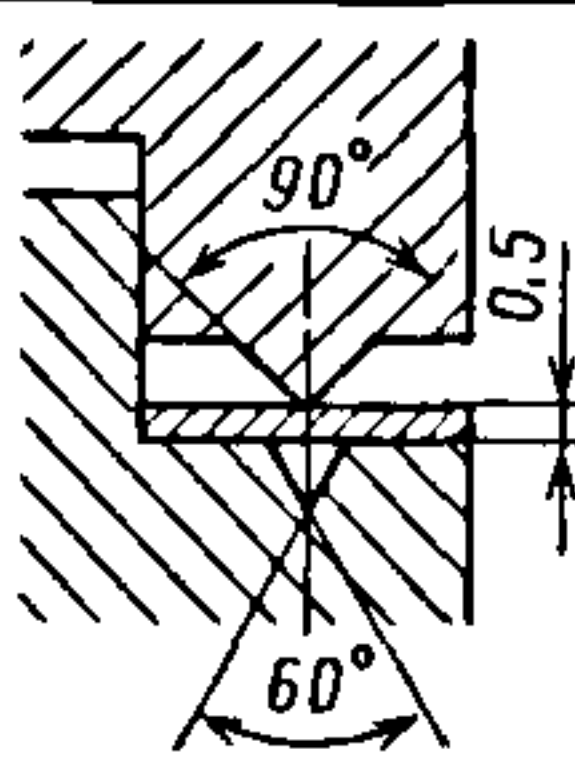
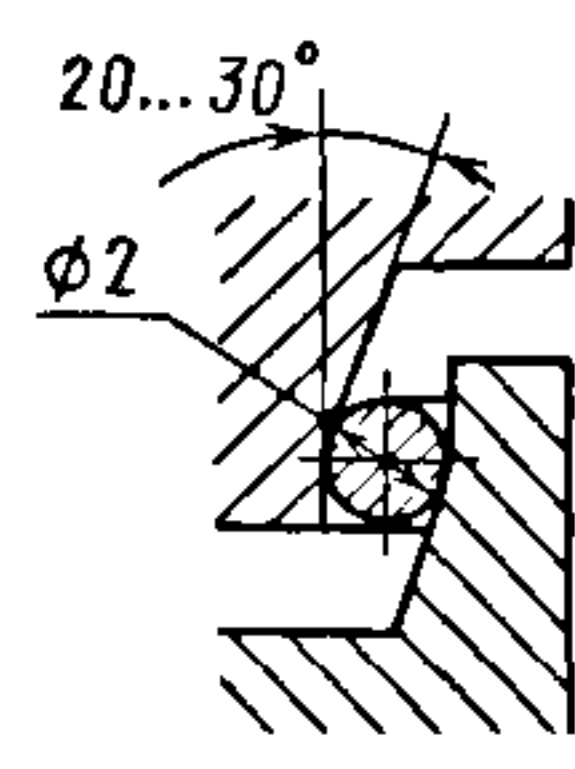
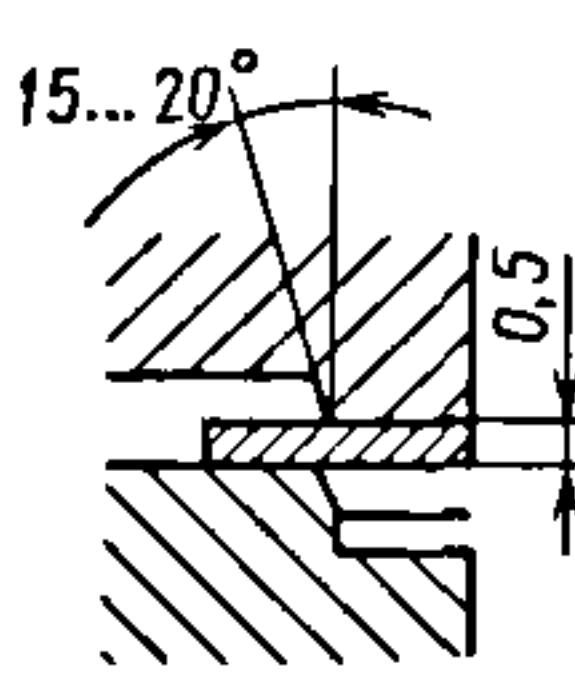
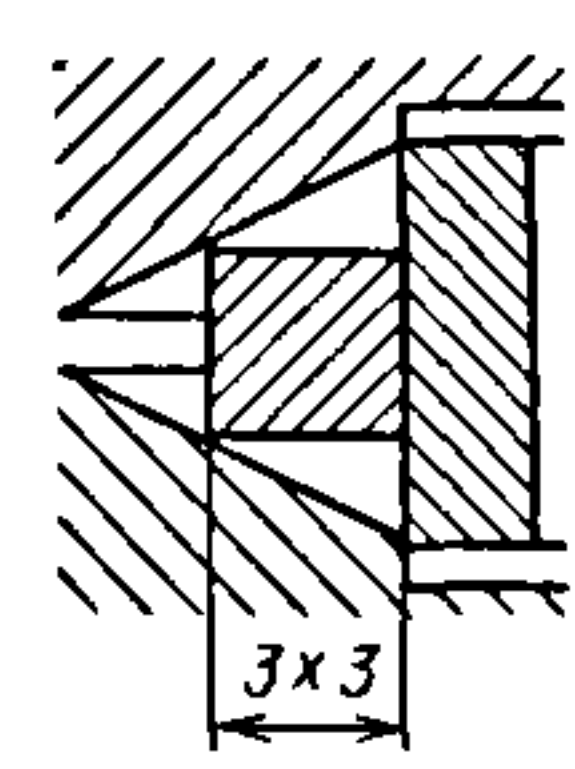

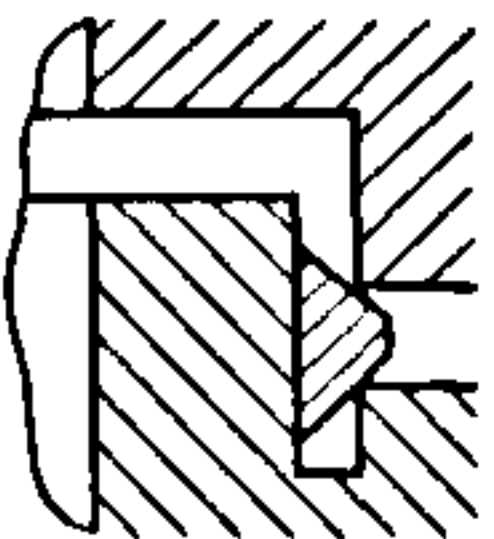
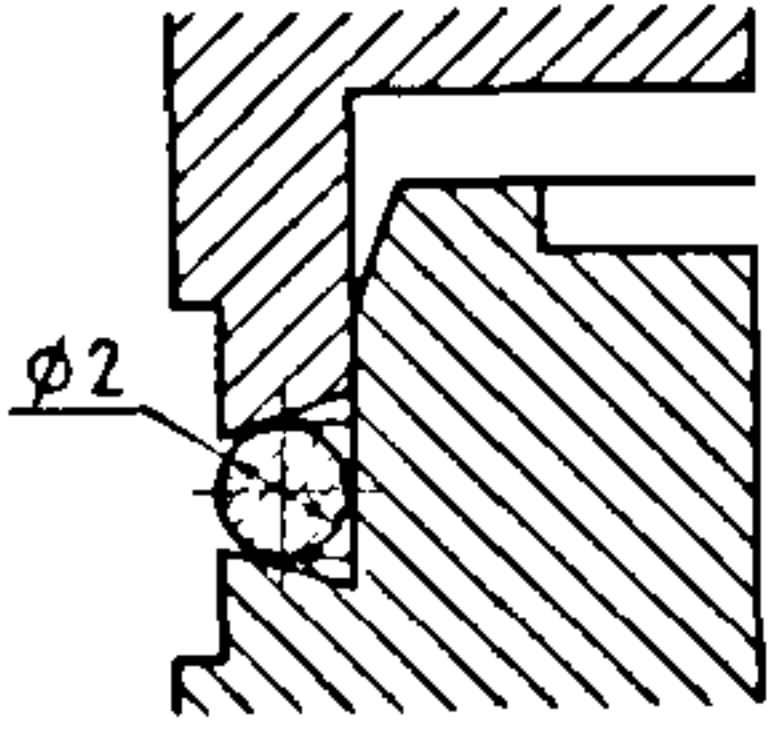
Для сверхвысоковакуумных соединений, прогреваемых до  $T = 723 \text{ К}$ , применяют фланцевые соединения с металлическими прокладками, в том числе с уплотнением канавочно-клиновым, коническим, угловым, ступенчатым, плоским, с профилированным выступом, со встречными выступами. Характеристики и схемы этих соединений приведены в табл. 5.21. Из приведенных в табл. 5.21 соединений в отечественной практике наиболее распространены канавочно-клиновые и соединения типа «конфлат».

#### 5.20. Размеры, мм, элементов соединений с индиевыми прокладками (см. рис. 5.22)

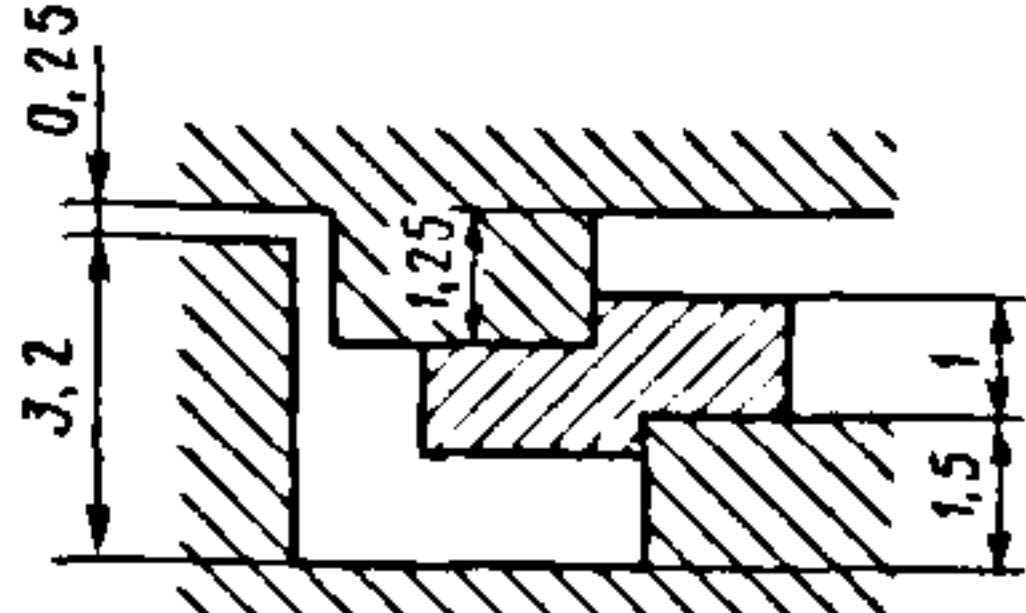
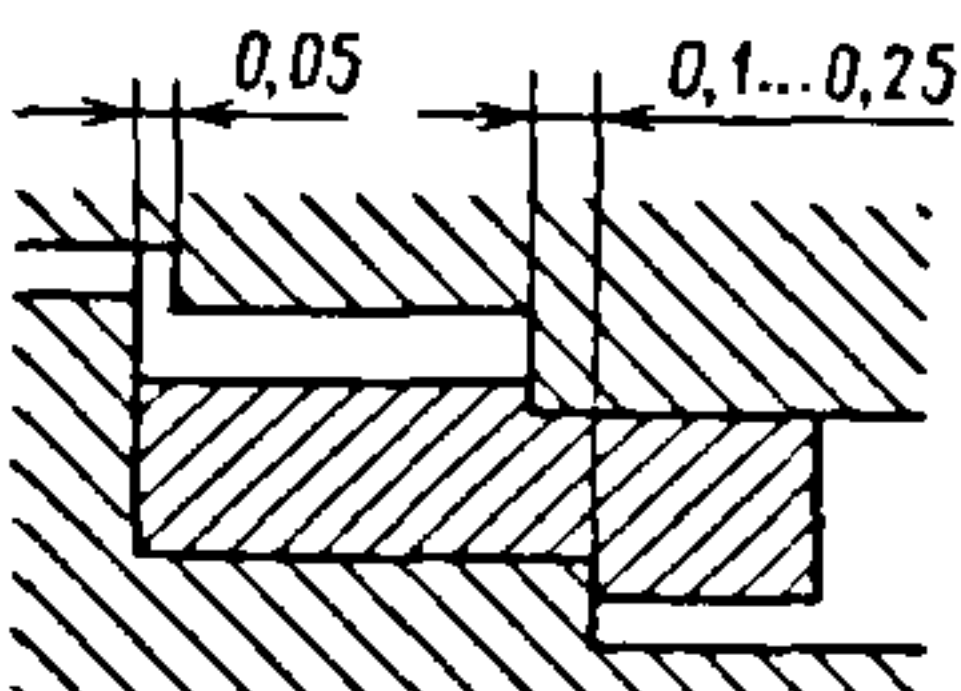
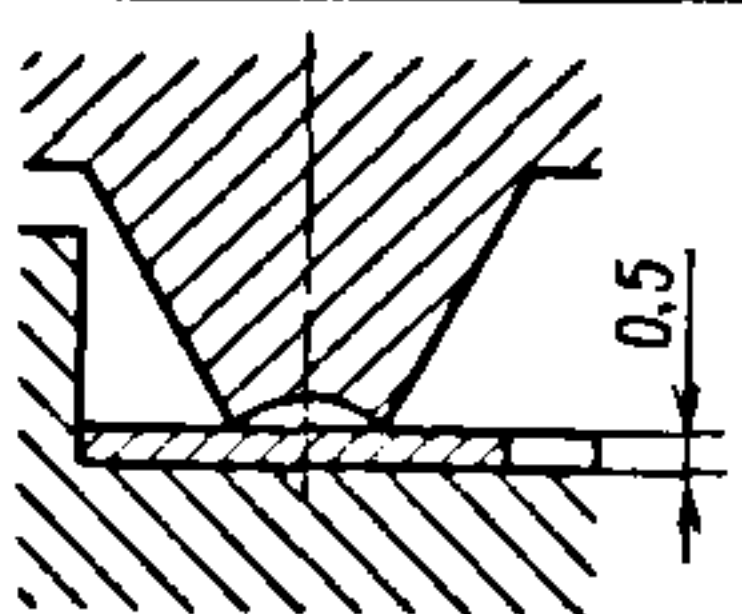
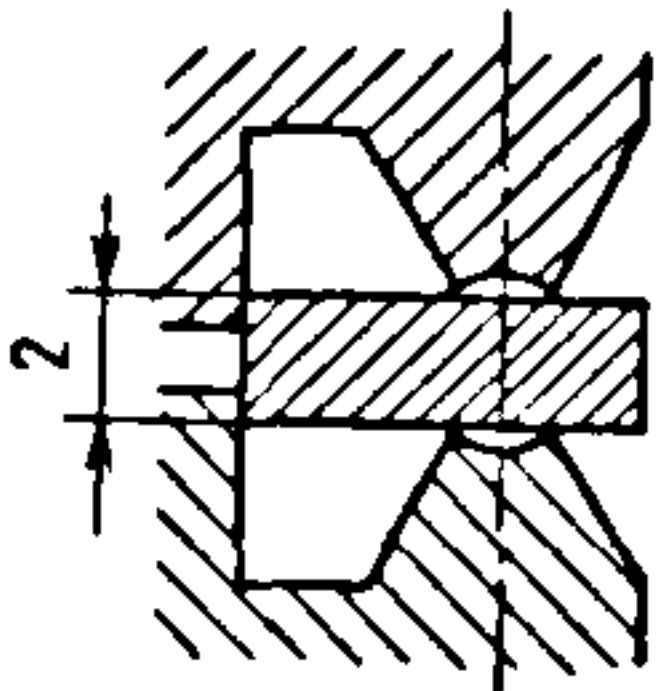
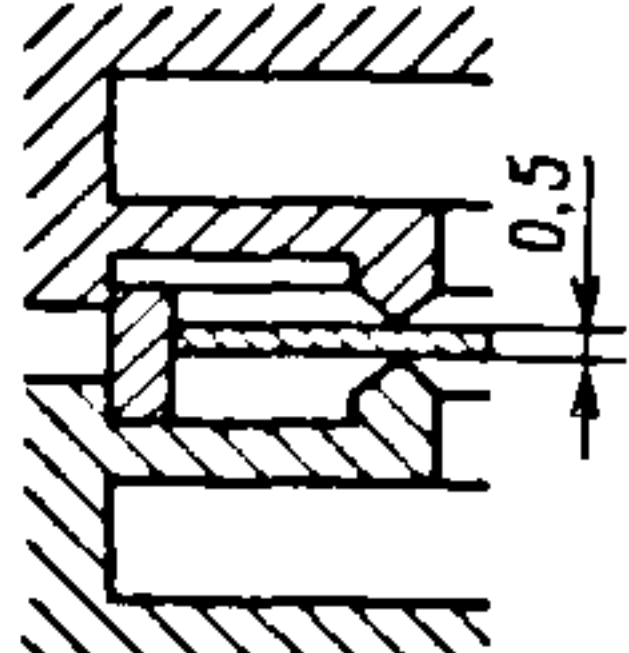
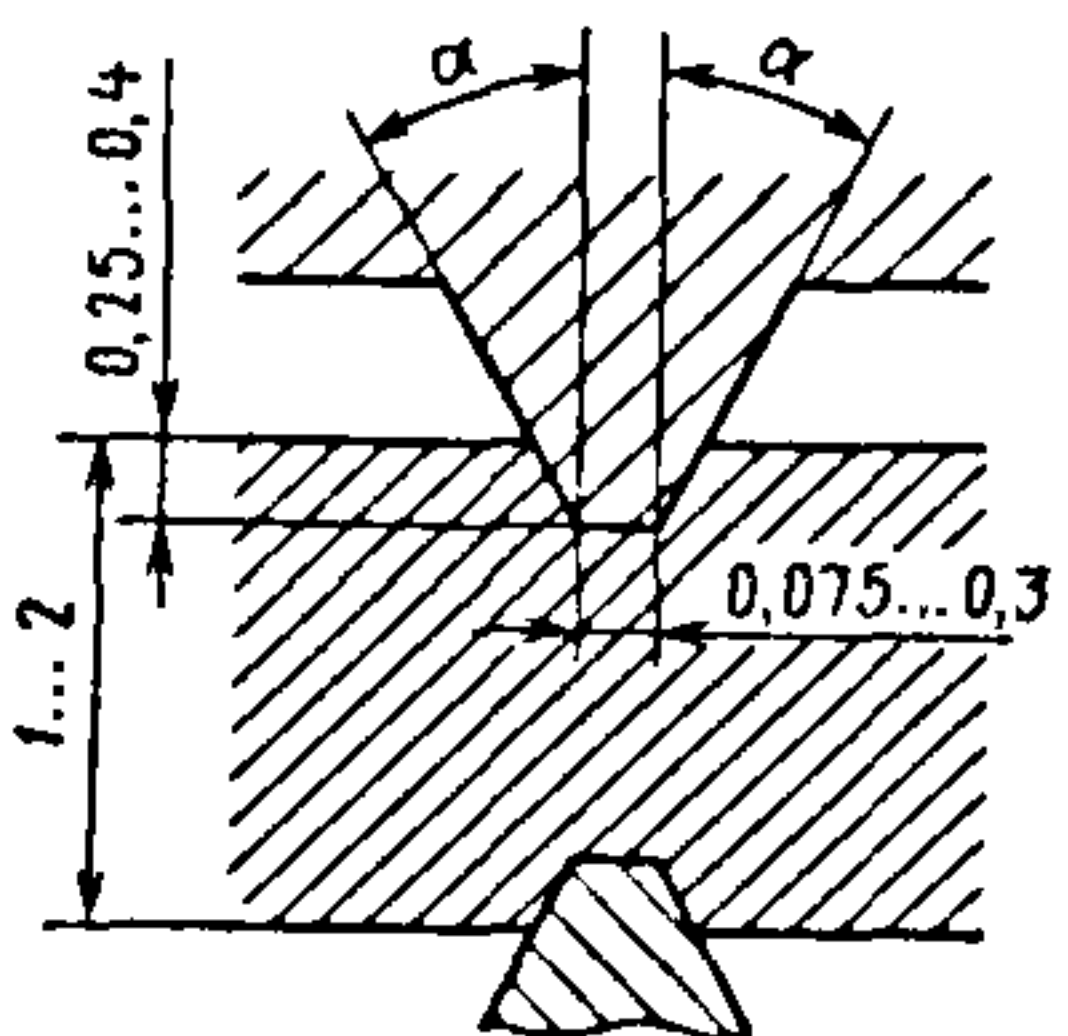
$D_y$	$h_1$	$h_2$	$l_1$	$m$	$d$
До 100	3	3	1	0,4	0,6
100...400	2	4	2	0,5	0,8



### 5.21. Фланцевые соединения с металлическими прокладками

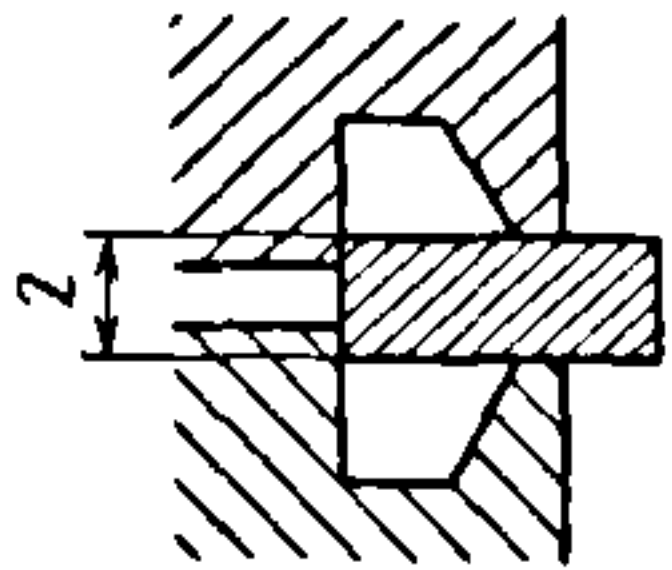
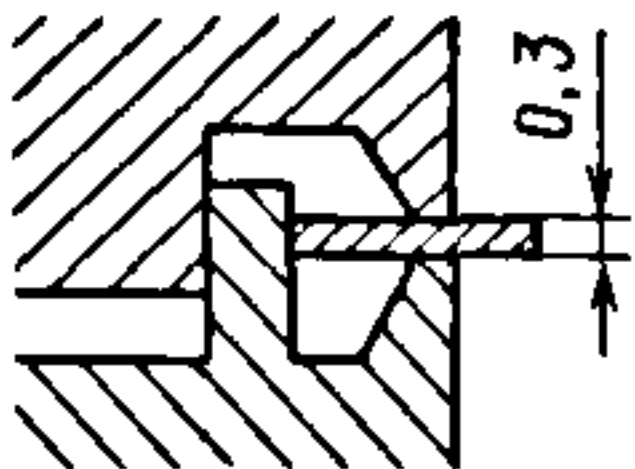
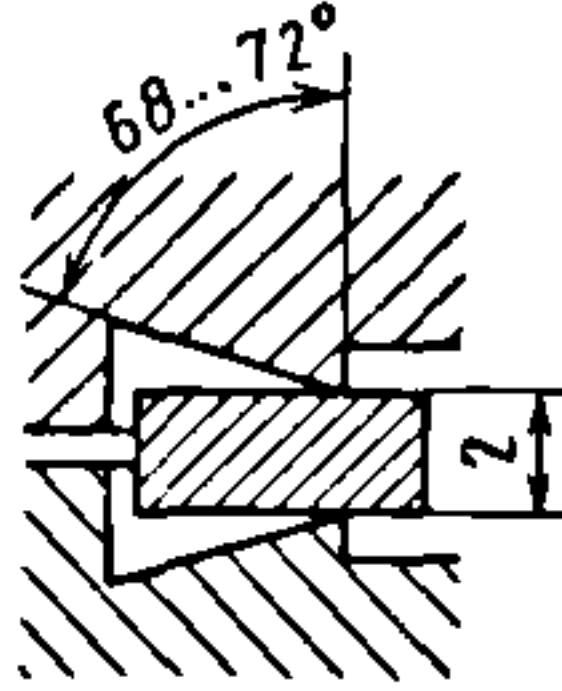
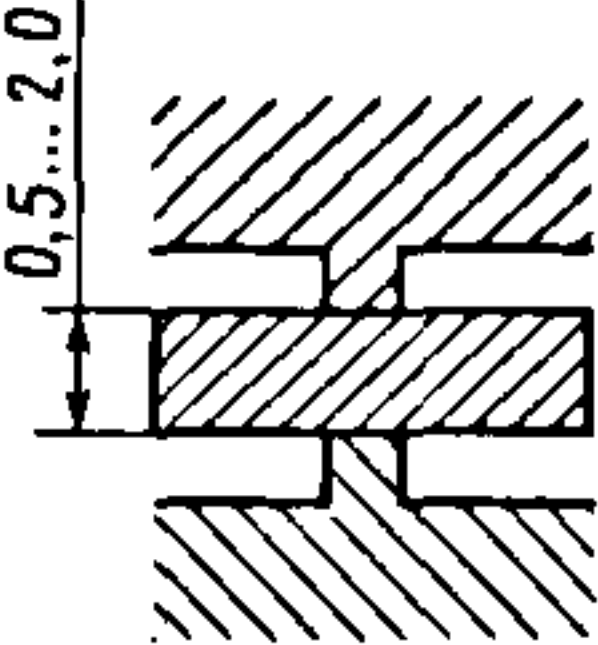
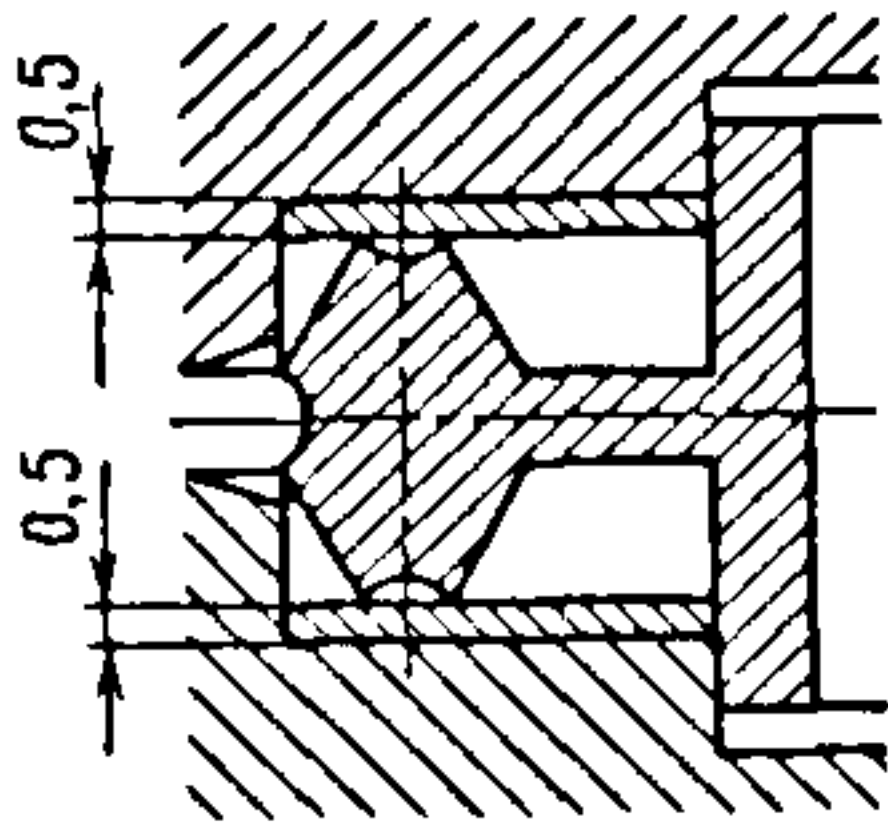
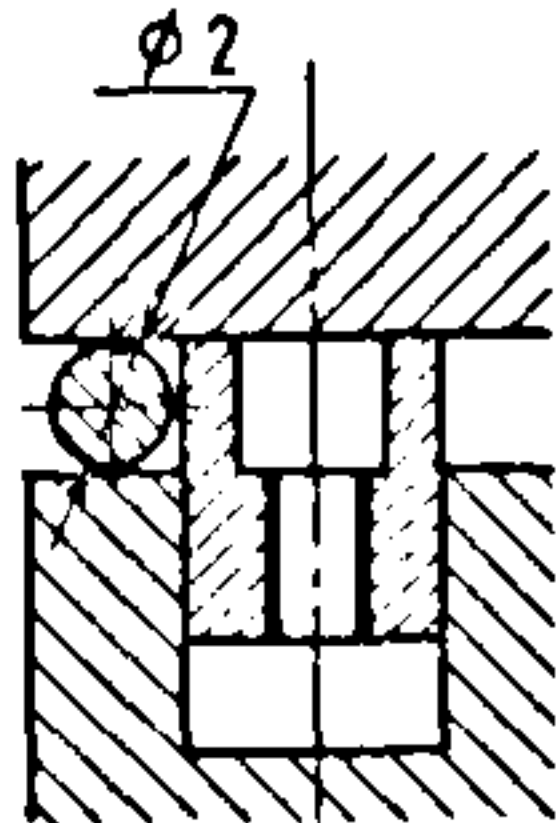
Вид соединения	Схема	$D_y$ , мм	Диапазон рабочих температур	Удельная сила эксплуатации, Н/мм
Канавочно-клиновое		10...700	177...723	260...330
Коническое:				
с проволочным уплотнителем		10...250	177...723	88...330
с плоским уплотнителем		16...250	253...723	150
с симметричными фланцами		10...250	253...723	150
Угловое:				
с проволочным уплотнителем		До 40	293...523	280...500
с фасонным уплотнителем				
Уилера		117...723	117...723	200

Продолжение табл. 5.21

Вид соединения	Схема	$D_y$ , мм	Диапазон рабочих температур	Удельная сила эксплуатации, Н/мм
Ступенчатое:				
с зазором между уплотняемыми деталями				75...150
с перекрытием уплотняемых деталей		100...160	293...723	120
С серповидным профилированным выступом				300...350
С уплотнением встречными выступами:				
с серповидным профилем		16...100		150
на упругом основании			253...723	100
с выступом в виде разнобокой трапеции		100...400		150



Окончание табл. 5.21

Вид соединения	Схема	$D_y$ , мм	Диапазон рабочих температур	Удельная сила эксплуатации, Н/мм
С уплотнением встречными выступами:				
с симметричными фланцами		10...160		170
с несимметричными фланцами		10...250		190
с выступом треугольного сечения типа «конфлат»		16...250		150
с выступом П-образного сечения		10...100	253...723	200
С плоским уплотнением:				
с универсальным вкладышем		10...400		300
с проволочным уплотнителем		250...2000		

Несмотря на распространенность канавочно-клиновых соединений они имеют недостатки: жесткие допуски на размеры посадочных мест и уплотняющего профиля; сложность контроля геометрии профиля; наличие в пространстве между выступом и дном канавки замкнутого объема, который является потенциальным источником газовыделения; сравнительно большие размеры и массы фланцев, их несимметричность. Фланцевое соединение с уплотнением встречными выступами (типа «конфлат») регламентировано ГОСТ 26526-85. Герметичность стыка достигается при вдавливании уплотняющих выступов в тело относительно толстого (1...2 мм) уплотнителя, который, деформируясь, заполняет микронеровности уплотняемых поверхностей.

Недостатки, присущие канавочно-клиновому профилю, в значительной мере относятся и к соединениям типа «кон-

флат»; преимущество этого профиля – симметричность фланцев.

Конструкции фланцевых соединений канавочно-клинового типа показаны на рис. 5.23; 5.24. Конструктивные размеры элементов соединения приведены в табл. 5.22–5.28. Для скобы (рис. 5.25), выполненной из стальной ленты 12Х18Н10Т, при диаметре фланцевых соединений  $D_f$  250 и 400 мм размер  $L = 16$  мм. В табл. 5.29 приведены размеры шпильки (рис. 5.26). Для достижения необходимой деформации уплотнителя момент затяжки крепежных болтов следует выбирать с учетом размера резьбы:

Резьба	M4	M6	M8	M10	M12	M16
Момент затяжки, Н·м	3,5	10	23	40	60	150

Для облегчения демонтажа фланцевых соединений предусматривают отверстия для отжимных винтов (при  $D_f \leq 160$  мм достаточно одного отверстия).

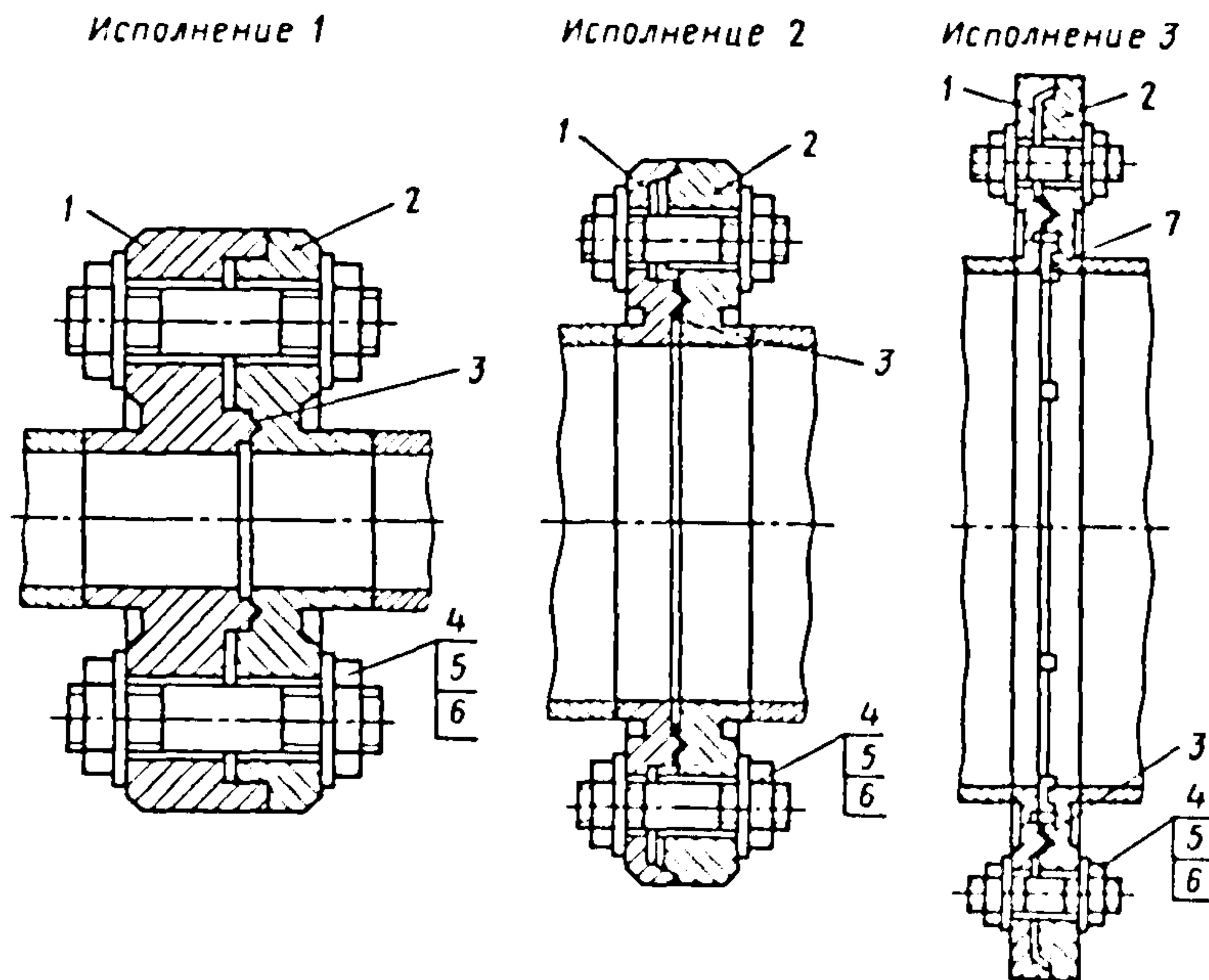


Рис. 5.23. Фланцевые соединения с металлическим уплотнением:  
1 – фланец с зубом; 2 – фланец с канавкой; 3 – уплотнение; 4 – шпилька; 5 – гайка;  
6 – шайба; 7 – скоба



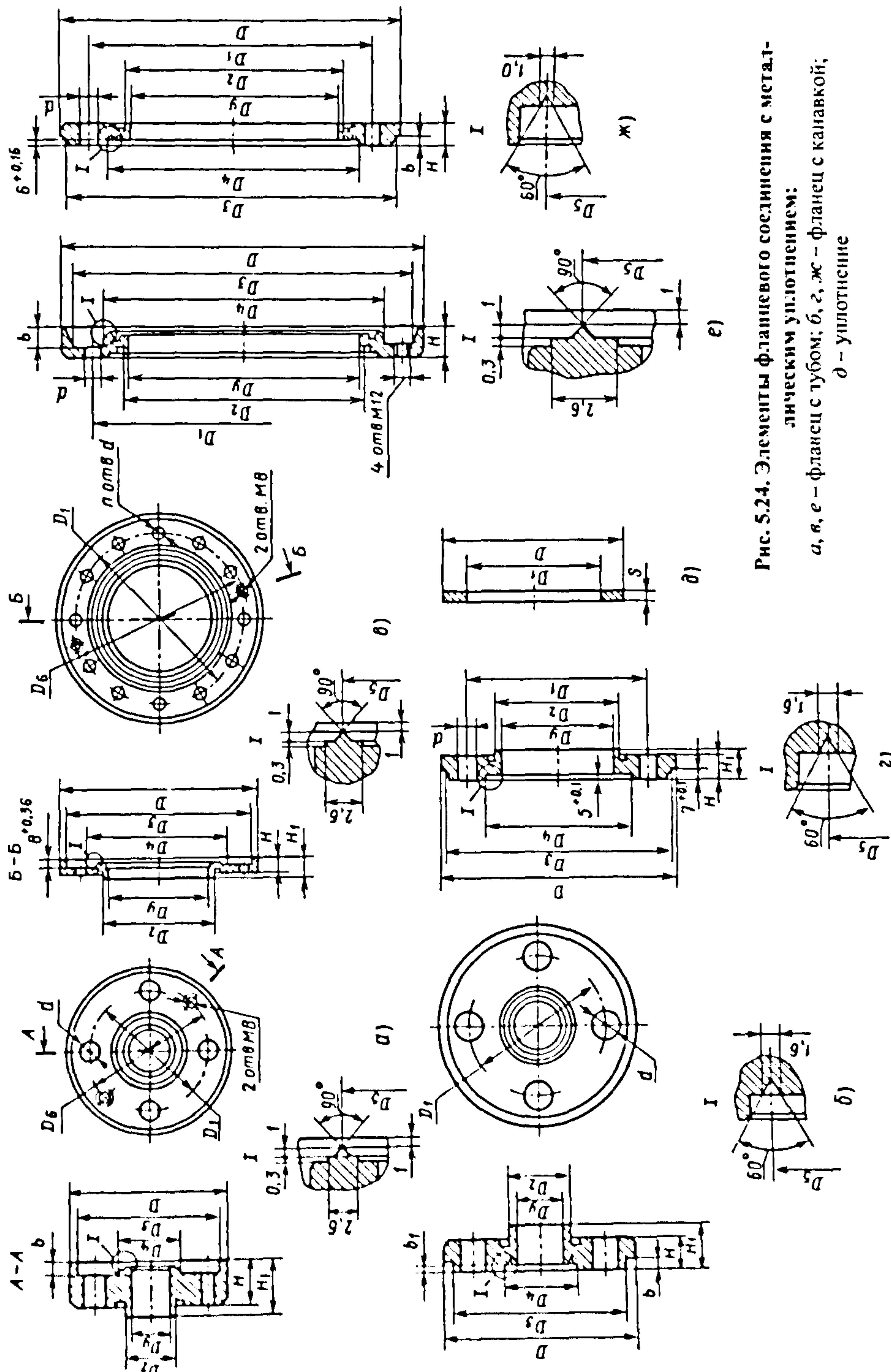


Рис. 5.24. Элементы фланцевого соединения с метал-  
лическим уплотнением:  
а, в, е – фланец с тубом; б, г, ж – фланец с канавкой;  
д – уплотнение

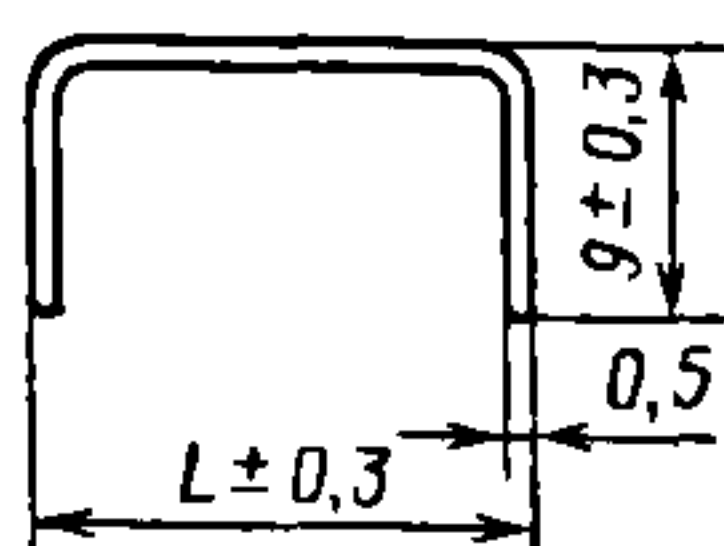


Рис. 5.25. Скоба

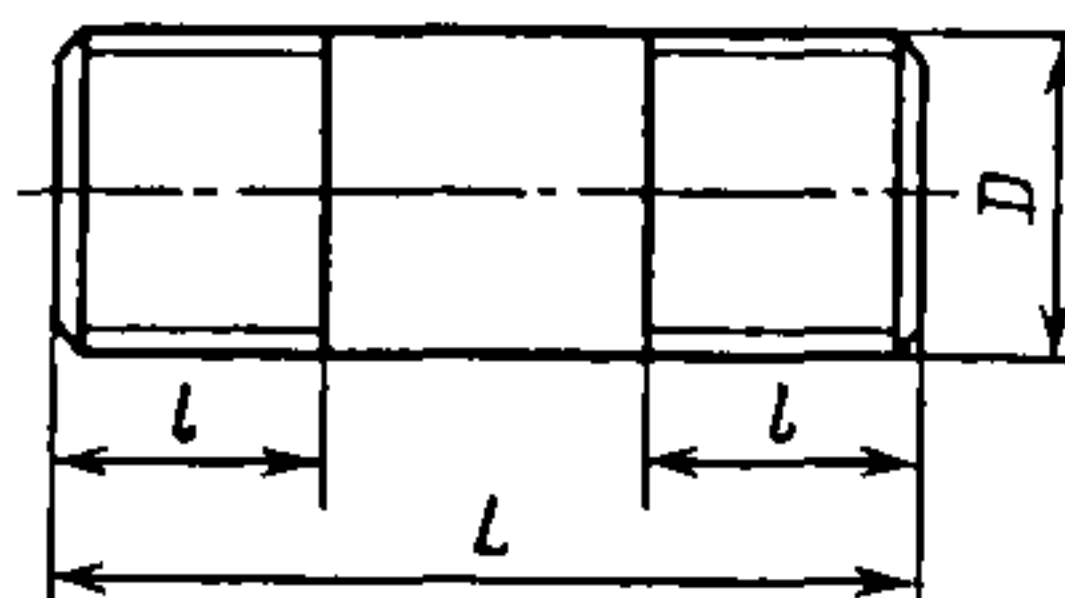


Рис. 5.26. Шпилька

## 5.22. Размеры фланца с зубом (см. рис. 5.24, а), мм

$D_v$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$H$	$H_1$	$b$	$d$	$n$
10	58	40	14	52	20	$15 \pm 0,12$	40	21	26	6	9	4
16	65	45	20	60	25	$20 \pm 0,14$	45				11	
25	85	62	30	80	35	$30 \pm 0,14$	65				13	8
40	110	80	45	105	50	$45 \pm 0,17$	90	22	27	7	13	
63	130	100	70	125	73	$68 \pm 0,20$	110					

## 5.23. Размеры фланца с канавкой (см. рис. 5.24, б), мм

$D_v$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$H$	$H_1$	$b$	$b_1$	$d$	$n$
10	58	40	14	52	20	$15 \pm 0,12$	10	15	5	3	9	4
16	65	45	20	60	25	$20 \pm 0,14$					11	
25	85	62	30	80	35	$30 \pm 0,14$	12	17			13	8
40	110	80	45	105	50	$45 \pm 0,17$	14	19	6	4	13	
63	130	100	70	125	73	$68 \pm 0,20$	15	20				

## 5.24. Размеры фланца с зубом (см. рис. 5.24, в), мм

$D_v$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$H$	$H_1$	$d$	$n$
100	200	148	108	190	130	$125 \pm 0,13$	180	16	18	14	12
160	280	215	168	270	195	$190 \pm 0,15$	250	19	21	16	16

## 5.25. Размеры фланца с канавкой (см. рис. 5.24, г), мм

$D_v$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$H$	$H_1$	$d$	$n$
100	200	148	108	188	130	$125 \pm 0,13$	16	18	14	12
160	280	215	168	268	195	$190 \pm 0,15$	19	21	16	16

## 5.26. Размеры фланца с зубом (см. рис. 5.24, е), мм

$D_v$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$H$	$b$	$d$	$n$
250	410	332	258	400	310	$300 \pm 0,17$	19	8	18	28
400	580	488	408	570	465	$455 \pm 0,19$	23	9	18	40



## 5.27. Размеры фланца с канавкой (см. рис. 5.24, ж), мм

$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$H$	$b$	$d$	$n$
250	410	332	258	398	310	$300 \pm 0,17$	19	7	18	28
400	580	488	408	568	465	$455 \pm 0,19$	23	8	18	40

5.28. Размеры уплотнения  
(см. рис. 5.24, д), мм

$D_y$	$D$	$D_1$	$S$
10	20	10	0,4
16	25	16	
25	35	25	0,5
40	50	40	
63	73	63	
100	130	115	
160	196	180	
250	310	282	
400	465	437	

5.29. Размеры шпильки  
(см. рис. 5.26), мм

$D_y$	$D$	$L$	$l$
10; 16	M8×10	48	13
25	M10×1,25	55	15
40	M12×1,25	60	17
63		62	
100	M14×1,5	58	18
160		67	20
250	M16×10,5	72	22
400		80	

Фланцевые соединения со встречными выступами типа «конфлат» показаны на рис. 5.27. Можно применять как неподвижные вокруг оси соединения фланцы (рис. 5.27, а, б), так и поворотные, позволяющие поворачивать оба фланца один относительно другого (рис. 5.27, в, г) или один из них (рис. 5.27, д, е). Использование поворотных фланцев облегчает сборку соединения, так как упрощается совмещение крепежных отверстий.

Конструкции элементов фланцевых соединений рассмотренных типов приведены на рис. 5.28, 5.29, конструктивные размеры – в табл. 5.30–5.33. При  $D_y$  400 и 630 мм диаметр прокладки (кольца) 3 (см. рис. 5.27, ж) принимают соответственно 436 и 635 мм (предельное отклонение  $\pm 0,5$  мм), а размеры фланцев ГОСТ 26526–85.

Фланцы и крепежные детали (болты, гайки и шайбы) прогреваемых высоковакуумных и сверхвысоковакуумных соединений изготавливают из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, прокладки – из меди М1, прокладочные кольца – из меди М06 (ГОСТ 859–2001).

## 5.30. Размеры неподвижных фланцев (см. рис. 5.28, а), мм

$D_y$	$D$	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$H$	$H_1$	$d$	$d_1$	$n$	$\alpha$
16	16,0	27,0	18,3	21,4	34	18,5	8	13,0	M4	4,4	6	60°
40	35,0	58,7	41,8	48,3	70	38,5	13	18,0	M6	6,6		
63	59,5	92,1	77,0	82,6	114	66,5	18	23,0	M8	8,4	8	45°
100	100,4	130,2	115,2	120,7	152	104,5	21	26,0			16	22°30'
160	150,0	181,0	166,0	171,5	202	160,6	22	27,0			20	18°
200	200,0	231,8	216,8	222,3	253	206,0	25	30,0			24	15°
250	250,0	282,6	267,5	273,0	305	256,0					32	11°15'

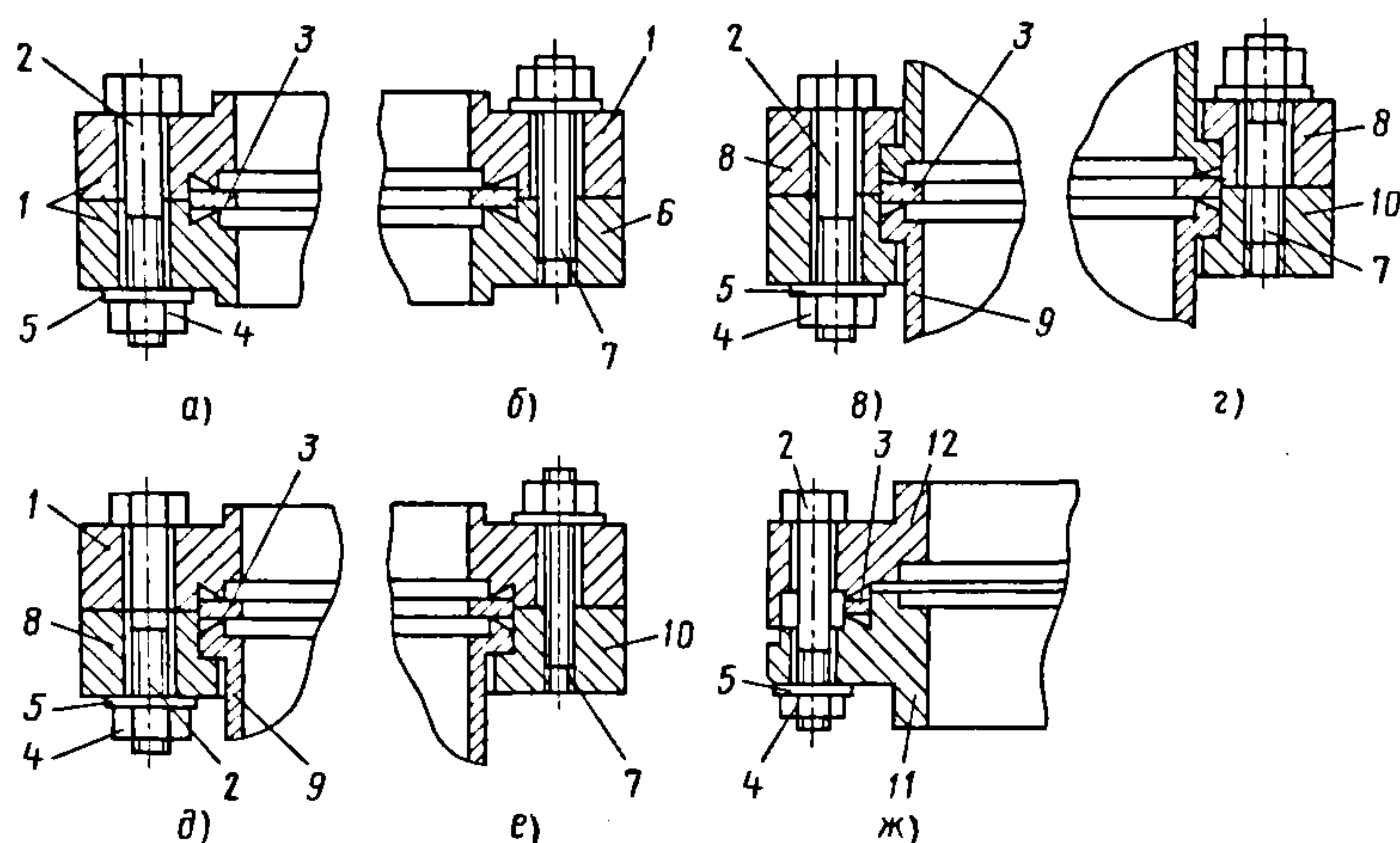


Рис. 5.27. Фланцевые соединения (ГОСТ 26526–85):

а, б – с неподвижными фланцами; в, г – с поворотными фланцами; д, е – с неподвижным и поворотным фланцами; ж – с неподвижными фланцами на большой условный проход;  
 1, 6, 8–12 – фланцы (1, 8, 11, 12 – с гладкими отверстиями); 6, 10 – с резьбовыми отверстиями;  
 9 – опорный; 2 – болт; 3 – прокладка; 4 – гайка; 5 – шайба; 7 – шпилька

## 5.31. Размеры прокладки (см. рис. 5.28, б), мм

$D_y$	$d_1$		$d_2$	
	Номинальное значение	Предельное отклонение	Номинальное значение	Предельное отклонение
16	21,2	$\pm 0,05$	16,0	$\pm 0,2$
40	48,1		36,8	$\pm 0,3$
63	82,4		63,6	
100	120,5	+0,05 –0,10	101,7	$\pm 0,5$
160	171,3		152,5	
200	222,1		203,4	
250	272,8		254,0	

## 5.32. Размеры поворотных фланцев (см. рис. 5.29, а), мм

$D_y$	$D$	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$H$	$h^*$	$d$	$d_1$	$n$	$\alpha$
16	19,3	27,0	21,4	34	8	5,8	M4	4,4	6	60°
40	39,0	58,7	48,3	70	13	7,6	M6	6,6		
63	67,0	92,1	82,6	114	18	12,7	M8	8,4	8	45°
100	105,0	130,2	120,7	152	21	14,3			16	22°30'
160	160,8	181,2	171,5	202	22	15,8			20	18°
200	206,5	231,8	222,3	253	25	17,2			24	15°
250	257,0	282,6	273,0	305					32	11°15'

\* Предельное отклонение  $\pm 0,05$  мм.



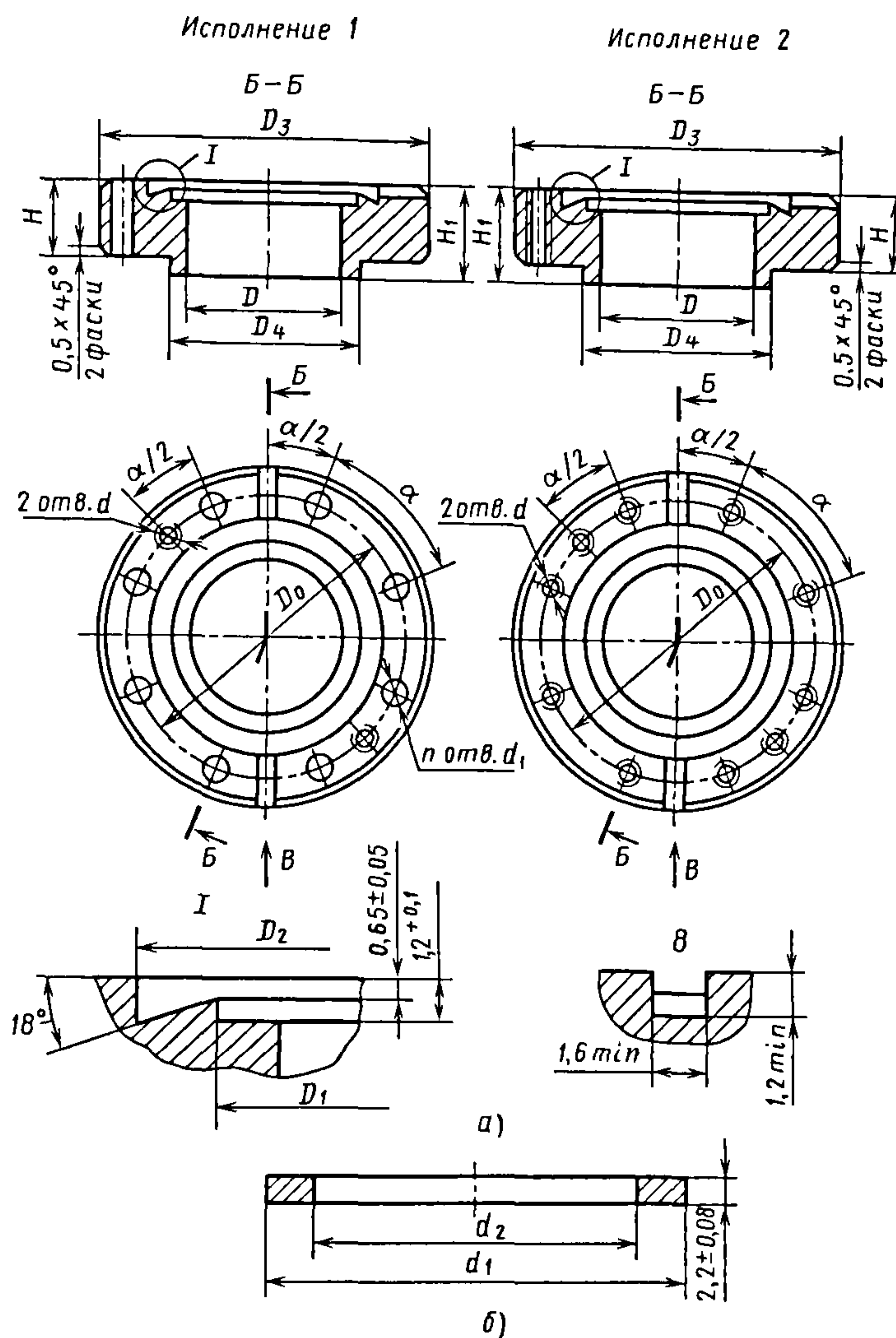


Рис. 5.28. Элементы фланцевого соединения с неподвижными фланцами:  
а – фланцы; б – прокладка

5.33. Размеры опорного фланца (см. рис. 5. 29, б), мм

$D_y$	$D$	$D_1$ , не более	$D_2$	$D_3$	$H$ , не менее	$h^*$
16	21,4	18,5	16,0	18,3	10	5,2
40	48,3	38,5	35,0	41,8	15	7,0
63	82,6	66,5	59,5	77,0	20	12,1
100	120,7	104,5	100,4	115,2	24	13,7
160	171,5	160,6	150,0	166,0	25	15,2
200	222,3	206,0	200,0	216,8	26	16,1
250	273,0	256,0	250,0	267,5	28	16,6

\* Предельное отклонение – 0,05 мм.

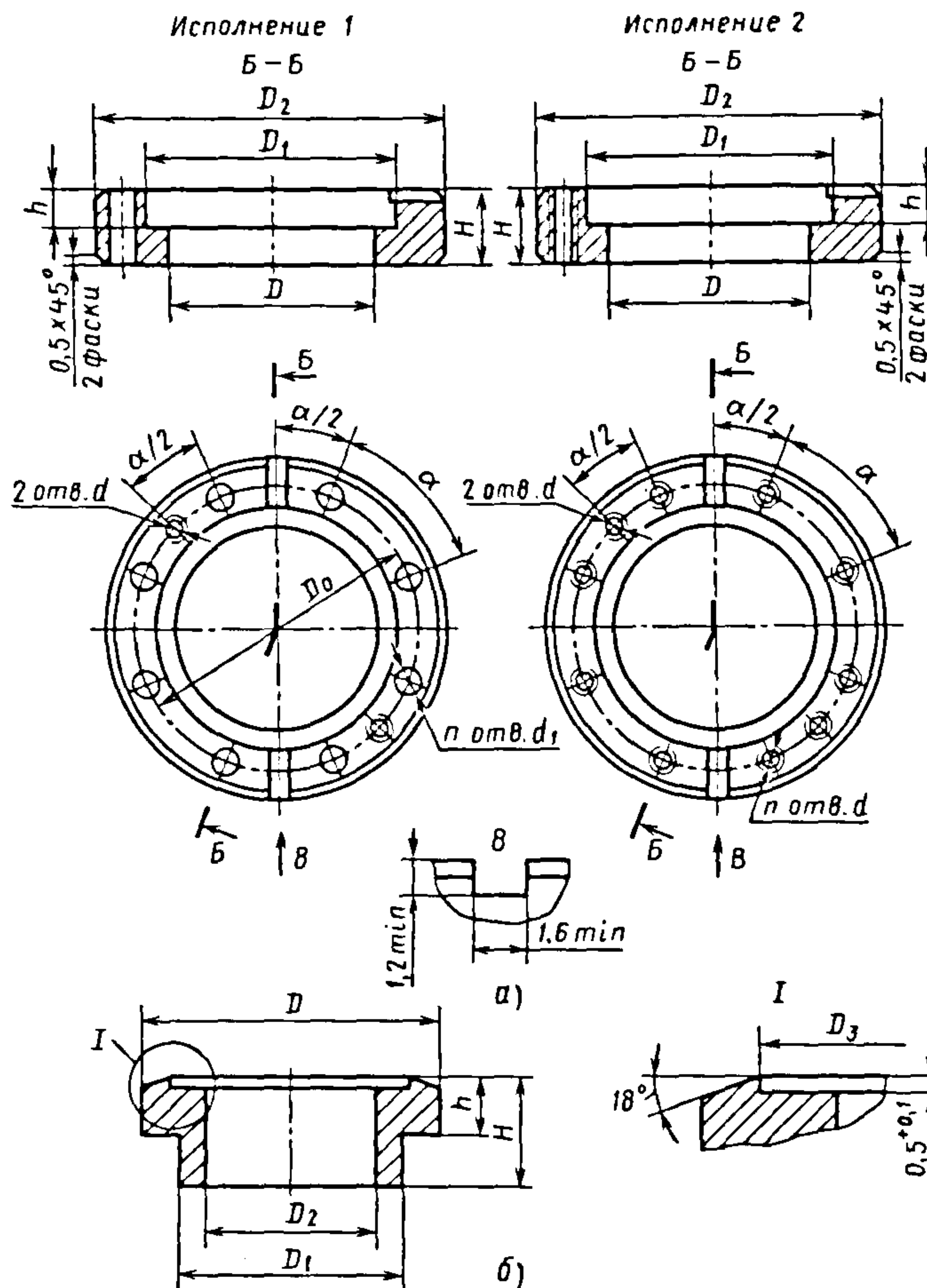


Рис. 5.29. Элементы фланцевого соединения с поворотными фланцами:  
а и б – поворотные и опорный фланцы соответственно

### 5.6. СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ С РАСПЛАВЛЯЕМЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Герметизация сверхвысоковакуумных разъемных соединений с расплавляемыми уплотнителями основана на адгезионном взаимодействии легкоплавкого металла-уплотнителя и твердых уплотняемых поверхностей.

Герметичное соединение создается при заполнении в условиях смачивания расплавленным металлом-уплотнителем

микронеровностей уплотняемых поверхностей, перекрытии газопроводящих каналов и охлаждении соединения. Разборка соединения требует нагрева и расплавления металла-уплотнителя.

Герметичность соединения любого узла уплотнения зависит в основном от условия смачиваемости уплотняемых поверхностей. Критерием смачиваемости герметизируемых поверхностей является краевой угол  $\theta$  (рис. 5.30, а), который для идеальной поверхности определяется уравнением Юнга:

$$\cos \theta = (\sigma_{гг} - \sigma_{гж}) / \sigma_{жг},$$



где  $\sigma_{т.г}$ ,  $\sigma_{т.ж}$  и  $\sigma_{ж.г}$  — поверхностные натяжения на границе соответственно твердое тело–газ, твердое тело–жидкость и жидкость–газ.

Таким образом, краевой угол смачивания  $\theta$  характеризует смачивающую способность жидкости (жидкого металла) по отношению к данной поверхности твердого тела при данной газовой среде.

Для шероховатых поверхностей (рис. 5.30, б) справедлива зависимость, учитывающая угол наклона выступа шероховатости, причем краевой угол смачивания шероховатой поверхности  $\theta_{ш} = \theta + \varphi$ .

В соответствии с рис. 5.30, б  $\operatorname{tg} \varphi = -dz/dx$ .

Наличие выступов на шероховатой поверхности приводит к изменению площади контакта жидкого металла по сравнению с идеально гладкой поверхностью в  $R'_\Delta$  раз из-за неполного смачивания впадин:

$$R'_\Delta = R_\Delta - \eta; R_\Delta = S'_k / S_k; \eta = S''_k / S_k,$$

где  $S'_k$  — фактическая площадь контакта жидкого металла с поверхностью;  $S_k$  — площадь контакта жидкого металла с гладкой поверхностью;  $S''_k$  — то же, с газом, находящимся во впадинах.

Коэффициент  $R'_\Delta$  связан с краевым углом  $\theta$  и  $\theta_{ш}$  зависимостью  $\cos \theta_{ш} = R'_\Delta \cos \theta - \eta$ .

Для большей части расплавов поверхностное натяжение на границе жидкость–газ  $\sigma_{ж.г} = 0,1 \dots 1,0$  Н/м. Поверхностное натяжение расплавов зависит от температуры и является ее линейной функцией: для олова  $\sigma_{ж.г} = 539,8$  Н/м при  $T = 505$  К; для индия  $\sigma_{ж.г} = 559,2$  Н/м при  $T = 429$  К.

Поверхностное натяжение расплавов существенно зависит от состава газовой среды, так как на границе фаз протекают физические и химические процессы взаимодействия. Окисление расплавов легкоплавких металлов-уплотнителей приводит

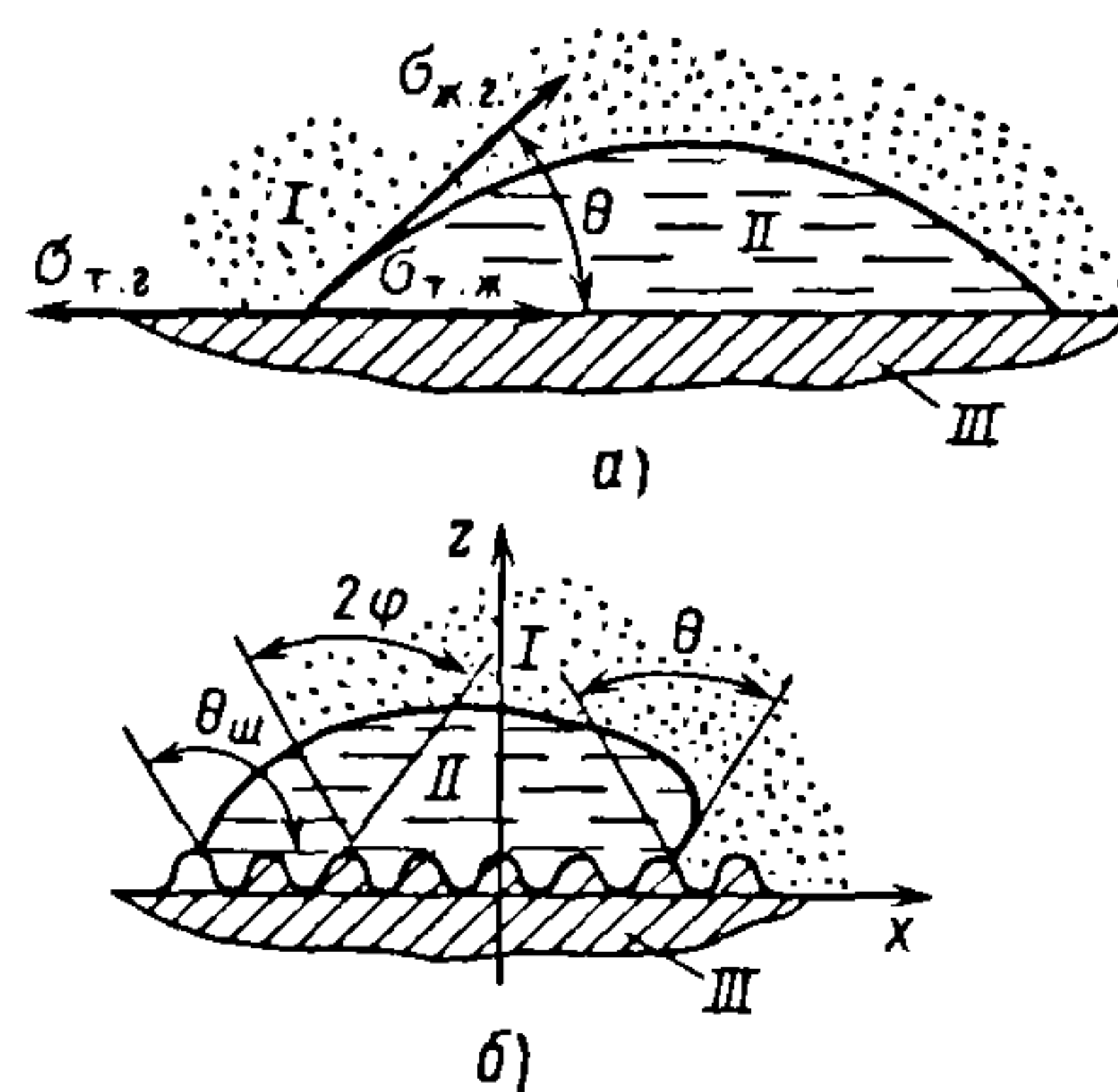


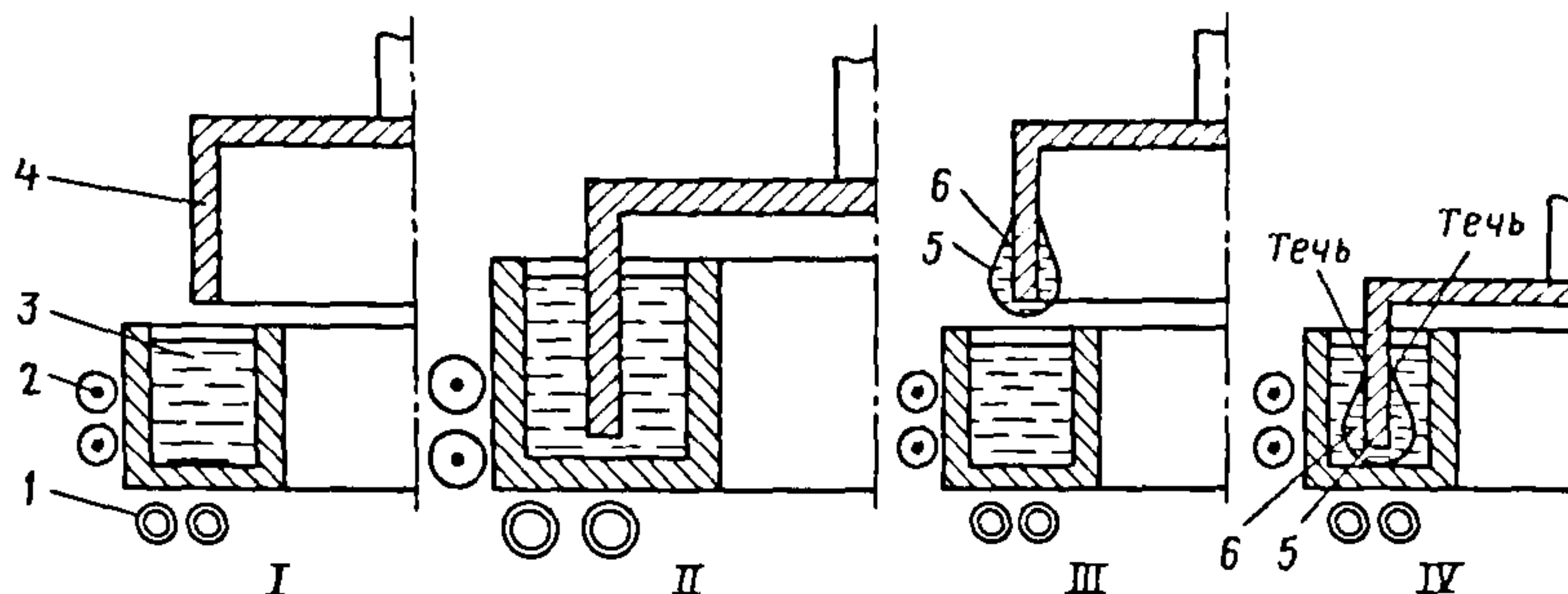
Рис. 5.30. Схемы к определению угла смачивания:

а — схема сил поверхностного натяжения; б — схема смачивания шероховатой поверхности; I, II и III — области соответственно газа, жидкости и твердого тела

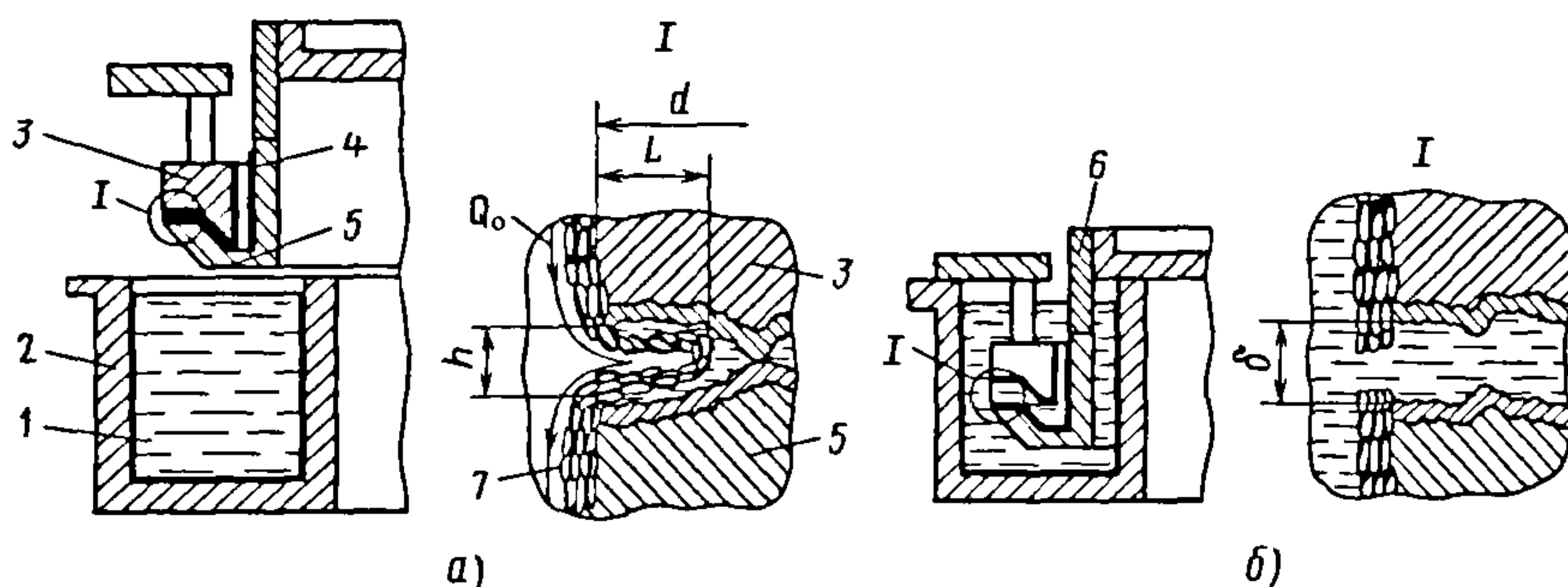
к понижению их поверхностного натяжения. После восстановления окисленной поверхности вновь достигаются исходные значения  $\sigma$ . При взаимодействии металлов и сплавов с остаточной газовой средой их поверхность покрывается пленкой оксида. При этом происходят физическая адсорбция, хемосорбция, растворение или образование объемного соединения.

Молекулы кислорода, поступающие из остаточной газовой среды, образуют монослой адсорбированного газа на поверхности приблизительно в течение 1 с при комнатной температуре и давлении газа  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па. Этим и объясняется очень быстрый рост первичной оксидной пленки при давлении  $1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,3 \cdot 10^{-5}$ .

Первоначальный рост оксидной пленки происходит во времени по линейному закону, при этом скорость роста пропорциональна давлению кислорода. Наличие оксидной пленки нарушает герметичность соединения. В соединениях с расплавленным металлом-уплотнителем важна первая стадия герметизации, в результате которой на уплотняемых поверхностях образуется тонкое покрытие из металла-уплотнителя.



**Рис. 5.31. Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с уплотнителем:**  
 I – перед первой герметизацией; II – загерметизированное; III – разгерметизированное;  
 IV – повторно загерметизированное; 1 – система охлаждения; 2 – электронагреватель;  
 3 – металл-уплотнитель; 4 – уплотнительный диск; 5 – оксидная пленка; 6 – слой полуды



**Рис. 5.32. Принципиальная схема узла уплотнения с защитой герметизируемых поверхностей:**

*a* – в открытом положении; *б* – в закрытом положении; 1 – металл-уплотнитель; 2 – кольцевая ванна; 3 – фасонная шайба; 4 – слой полуды; 5 – кольцо; 6 – экран; 7 – оксидная

Режим первой стадии обеспечивает требуемое адгезионное взаимодействие расплавленного металла-уплотнителя и твердых уплотняемых поверхностей. При многократной герметизации на покрытии уплотняемых поверхностей в результате их контакта с остаточной газовой средой вакуумного объема или атмосферой образуется оксидная пленка (рис. 5.31, III), которая в дальнейшем может служить причиной появления течей (рис. 5.31, IV).

В связи с этим наиболее перспективны принципы герметизации, основанные на разрушении оксидной пленки, исключении возможности ее образования или на использовании оксидной пленки при условии применения в качестве уплотнителей специальных материалов, например легкоплавких стекол.

Узел уплотнения с защитой герметизируемых поверхностей от окисления (рис. 5.32) имеет фасонную шайбу 3, предохраняющую поверхность кольца 5 экрана 6 от возможного контакта в разгерметизированном состоянии с атмосферой и, следовательно, от окисления.

По периметру спая вследствие объемной усадки металла-уплотнителя образуется полый канал высотой  $h$  и шириной  $L$ , покрытый оксидной пленкой 7. При перемещении в расплав спаянного экрана 6 натекание (поток  $Q_0$ ) происходит по поверхности оксидной пленки 7. Уменьшение натекания обеспечивается разрывом пленки при перемещении кольца 5 относительно шайбы 3 на расстояние  $(\delta > 2L + h)$ . Значение  $L$  с достаточной точностью можно определить из зависимости



$$\beta V \approx \pi d L h,$$

где  $\beta$  – коэффициент объемной усадки;  
 $V$  – объем металла-уплотнителя;  $d$  – диаметр шайбы.

Разъемное соединение рассмотренного типа, применяемое для уплотнения рабочих объемов вакуумных установок, показано на рис. 5.33. Камера установки состоит из герметизированных уплотнителями 7 наружной оболочки 9 и уплотнительного экрана 1, между которыми расположен нагреватель 10 для обезгаживания поверхностей.

Для герметизации разъемного соединения через штуцер 6 или зазор между металлом-уплотнителем 3 и торцом уплотнительного экрана 1 откачивают полость  $a$ . При этом наружная оболочка 9 уплотняется атмосферным давлением. Затем металл-уплотнитель нагревают в вакууме электронагревателем 5 до температуры на 50...100 К выше температуры его плавления и после расплавления опускают в ванну 2 уплотнительный экран 1 с защитным кольцом 8. Опорный диск последнего упирается в неподвижную стенку корпуса установки, а экран 1 опускается; при этом между его торцом и защитным кольцом 8 образуется зазор, равный 3...4 мм.

После опускания уплотнительного экрана в крайнее нижнее положение металл-уплотнитель через штуцер 4 охлаждают и при температуре 323...333 К в один из объемов, расположенных внутри или снаружи экрана 1, можно напускать атмосферный воздух.

Подъем и опускание камеры происходят от электромеханического привода. Привод позволяет перемещать уплотнительный экран, связанный со штоком 11 и кронштейном 12, относительно наружной оболочки, а также поднимать их вместе после напуска в рабочий объем атмосферного воздуха. Шток уплотнен сильфоном.

При разгерметизации камеры полости, расположенные по обе стороны от уплотнительного экрана, откачивают до

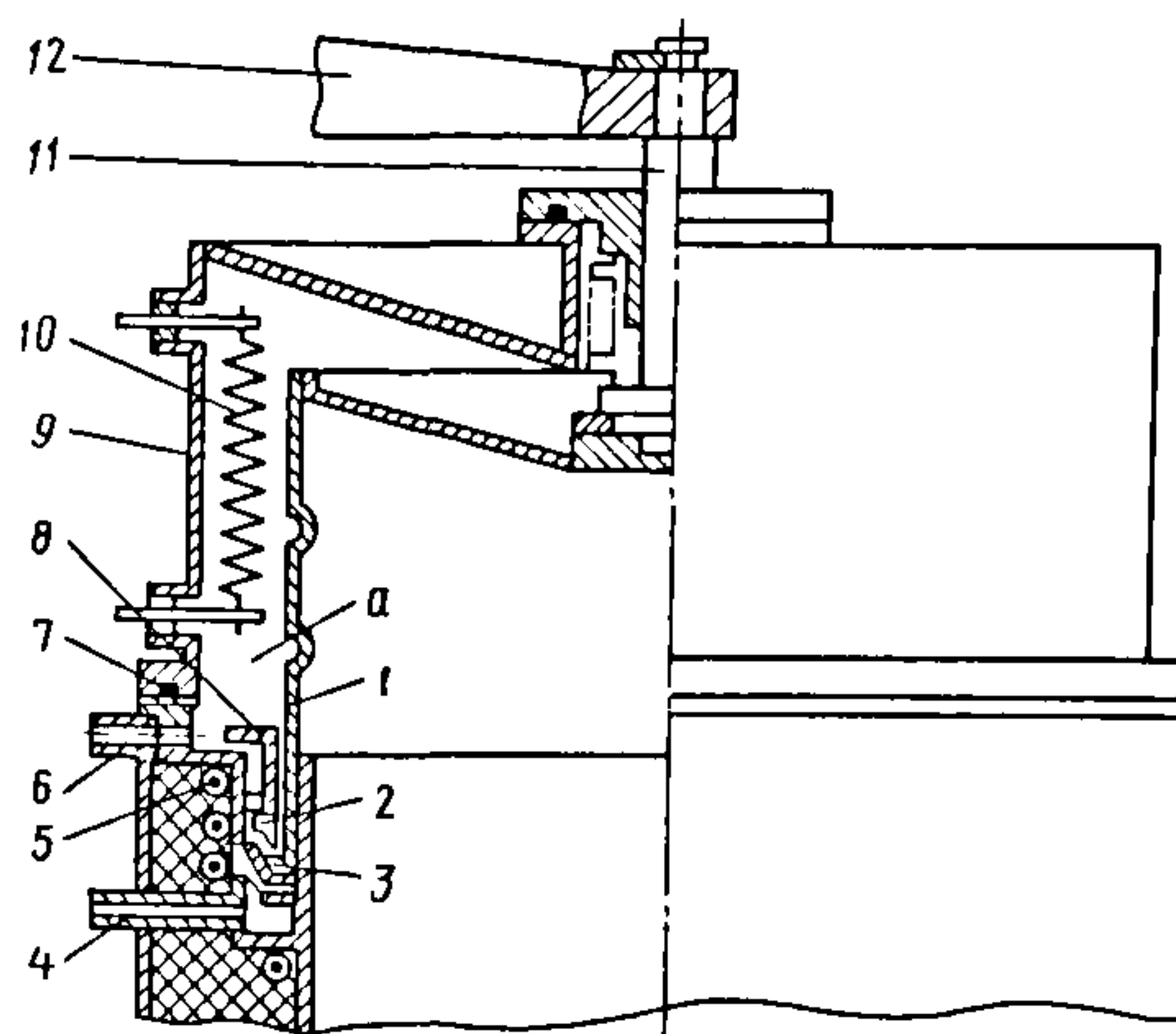


Рис. 5.33. Сверхвысоковакуумное разъемное соединение

давления  $\geq 10$  Па, расплавляют металл-уплотнитель и поднимают экран, внутренняя уплотнительная поверхность которого, находясь в расплавленном уплотнителе, входит в контакт с поверхностью защитного кольца. Дальнейший подъем экрана происходит вместе с кольцом до разгерметизации соединения. После этого металл-уплотнитель охлаждают. Таким образом, в разгерметизированном состоянии поверхность уплотнительного экрана защищена от соприкосновения с газами защитным кольцом, что способствует надежной герметизации при повторном уплотнении.

Сверхвысоковакуумное фланцевое соединение с защитой герметизируемых поверхностей от окисления, работающее при произвольной ориентации в пространстве, показано на рис. 5.34.

В этом соединении расплавляемый металл-уплотнитель и герметизируемые им поверхности не контактируют с атмосферой и, следовательно, не окисляются, что способствует надежной герметизации.

Соединение (рис. 5.34, положение 1) состоит из верхнего фланца 1 с накидной гайкой 13 и нижнего фланца 10 с герметично закрепленной обечайкой 11, имеющей резьбу на внешней поверхности. На фланце 1 концентрично проходному





Затем электронагревателем 9 расплавляют металл-уплотнитель 7, вследствие чего появляется возможность перемещения клапана 12 и диска 4, и продолжают навинчивать гайку 13 на обечайку 11. При этом торец колец полости, воздействуя на подвижный диск 4, опускает его, сжимая упругую оболочку 6, и кольцо 5 поднимает клапан 12, сжимая упругую оболочку 2. В результате в кольцевой зазор (рис. 5.34, положение II) из кольцевой полости и кольцевой ванны начинает поступать чистый неоокисленный металл-уплотнитель 7, что обеспечивает образование надежного герметичного соединения.

Сжатие кольцевых упругих элементов 2 и 6 происходит до упора обечайки 11 в ограничительный буртик на верхнем фланце 1. При этом прекращают навинчивать гайку 13 на обечайку 11, выключают электронагреватель 9 и включают систему охлаждения 8. Разгерметизацию фланцевого соединения выполняют в обратной последовательности. Другой принцип создания герметичного соединения – герметизация с разрушением оксидной пленки на герметизируемых поверхностях. Для разрушения оксидной пленки на поверхности герметизирующего экрана можно применять способ герметизации с использованием вязкостного трения или гидростатического давления (рис. 5.35).

При нагревании герметизирующего экрана до температуры выше температуры плавления уплотнителя получают слой полуды металла-уплотнителя 3 на экране в жидкой фазе с вязкостью  $\sim 10^{-4}$  Па·с. Металл-уплотнитель в ванне 1 нагревают до температуры начала изменения фазового состояния, при котором вязкость уменьшается на несколько порядков.

Нагретый герметизирующий экран 5, опущенный в металл-уплотнитель ванны, в момент начала изменения фазового состояния перемещается в среде, во много раз более вязкой по сравнению с расплавленным металл-уплотнителем на самом герметизирующем экране. Это приводит к

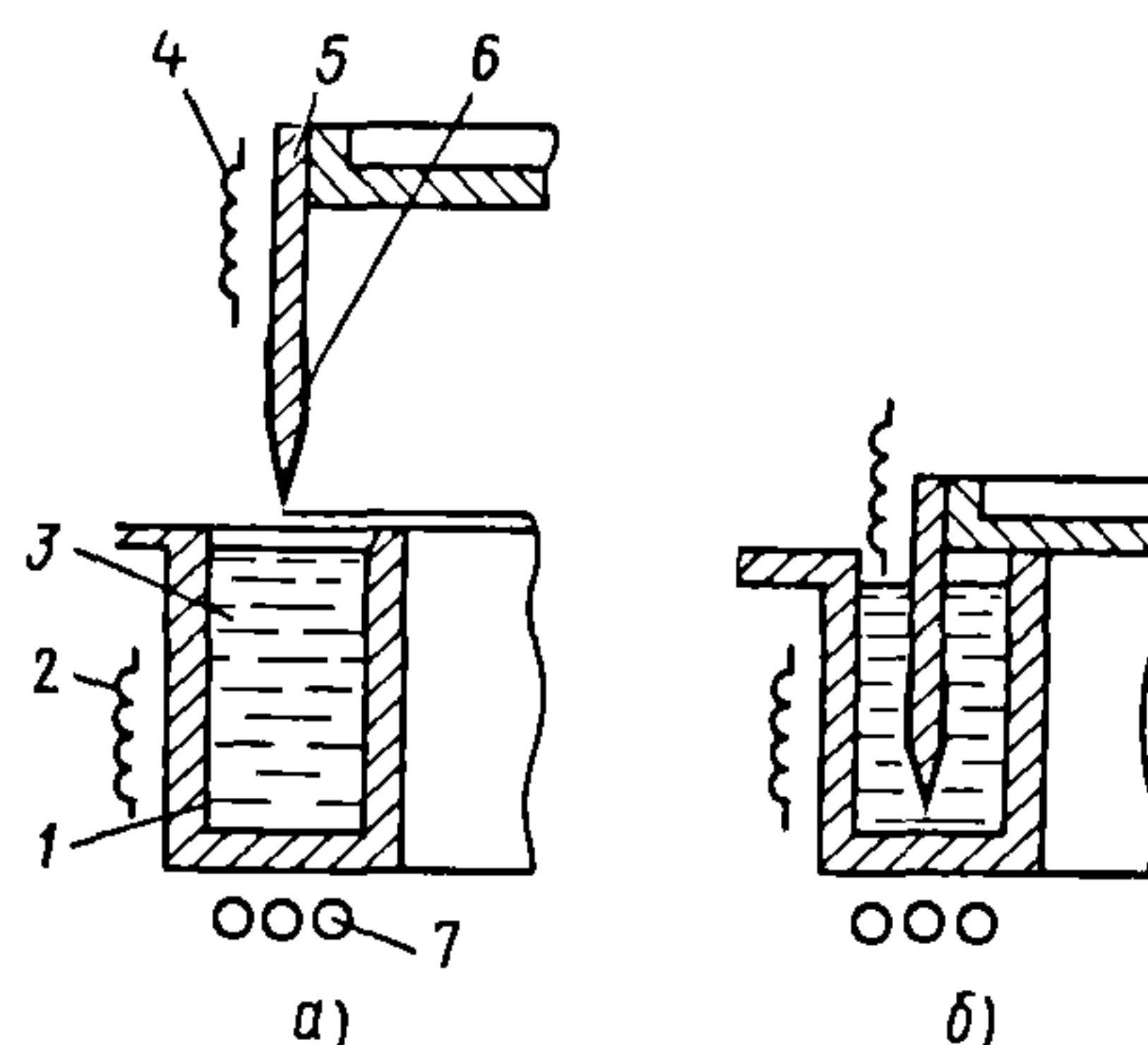


Рис. 5.35. Схема уплотнения с использованием вязкостного трения:

а – в разгерметизированном состоянии;  
б – в герметизированном состоянии; 1 – ванна;  
2, 4 – электронагреватели; 3 – металл-уплотнитель; 5 – герметизирующий экран;  
6 – слой полуды; 7 – система охлаждения

разрыву оксидной пленки и очищению от нее всего экрана, что позволяет получить во внутренних слоях металла-уплотнителя в ванне неоокисленную поверхность герметизирующего экрана, взаимодействующую с неоокисленным металлом-уплотнителем ванны.

Последующий нагрев соединения до температуры выше температуры плавления металла-уплотнителя необходим для обеспечения максимального смачивания и, следовательно, герметичности соединения.

Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с расплавляемым металл-уплотнителем и разрушением на герметизируемых поверхностях образовавшейся оксидной пленки показано на рис. 5.36.

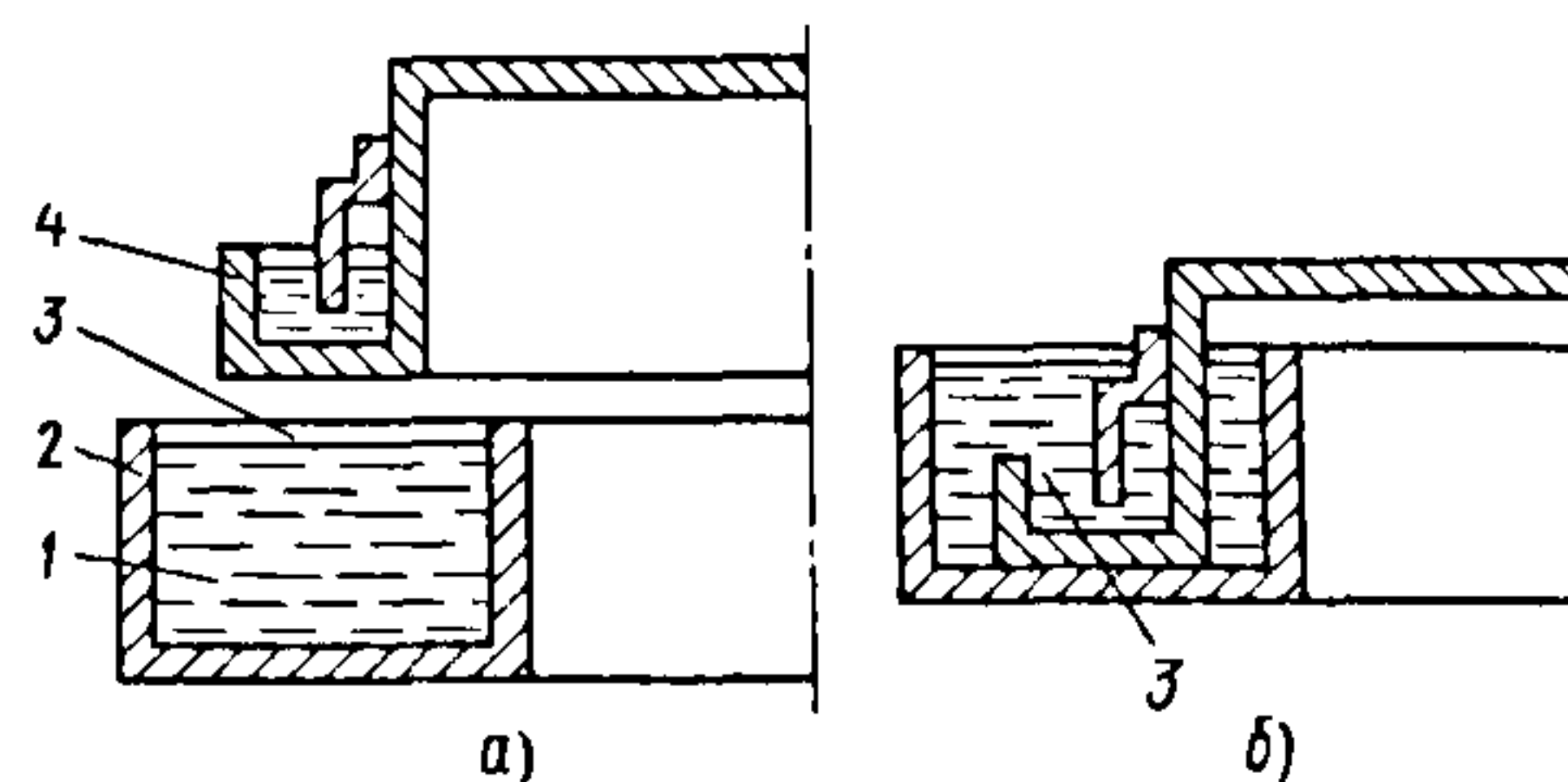


Рис. 5.36. Сверхвысоковакуумное разъемное соединение с разрушением оксидной пленки в открытом (а) и закрытом (б) положениях

При герметизации такого соединения под действием сил гидростатического давления расплавленный металл-уплотнитель 1 перетекает из кольцевой ванны 2 в кольцевой объем уплотнительного диска 4. В результате металл-уплотнитель 1 заполняет свободный внутренний объем уплотнительного диска 4 и на поверхности металла-уплотнителя, расположенного во внешнем сосуде, оксидная пленка 3 разрывается. При этом неокисленный металл-уплотнитель в кольцевой ванне 2 контактирует с неокисленным металлом-уплотнителем в кольцевом объеме уплотнительного диска, что позволяет многократно воспроизводить надежную герметизацию.

Эту схему уплотнения можно эффективно использовать в конструкциях фланцевых соединений и клапанов. В сверхвысоковакуумных разъёмных соединениях в качестве уплотнителя используют также легкоплавкие неокисляемые материалы, например стекло. Соединения этого типа

имеют простую конструкцию и не требуют дополнительных элементов для предотвращения разрушения оксидной пленки, так как окислительные процессы не влияют в этом случае на герметичность соединения.

Эксплуатация фланцевых и клапанных соединений с расплавляемым уплотнителем показала их высокую надежность.

Суммарное натекание через рассмотренное герметичное соединение после длительной работы (1000 циклов) составляет  $5 \cdot 10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Малые силы, необходимые для герметизации, позволяют применять маломощные приводы, существенно уменьшить металлоемкость конструкции. Уплотнительные элементы могут иметь любую геометрическую форму (круглую, прямоугольную, эллипсную и др.) и допускают обезгаживающий прогрев в закрытом положении до температуры 673...723 К.



# Глава 6

## ВАКУУМНЫЕ КАМЕРЫ

### 6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КАМЕР

Вакуумные камеры предназначены для создания определенных «чистых» условий исследования, проведения процессов в вакууме или контролируемой среде либо для изоляции технологических процессов (операций) от окружающей среды.

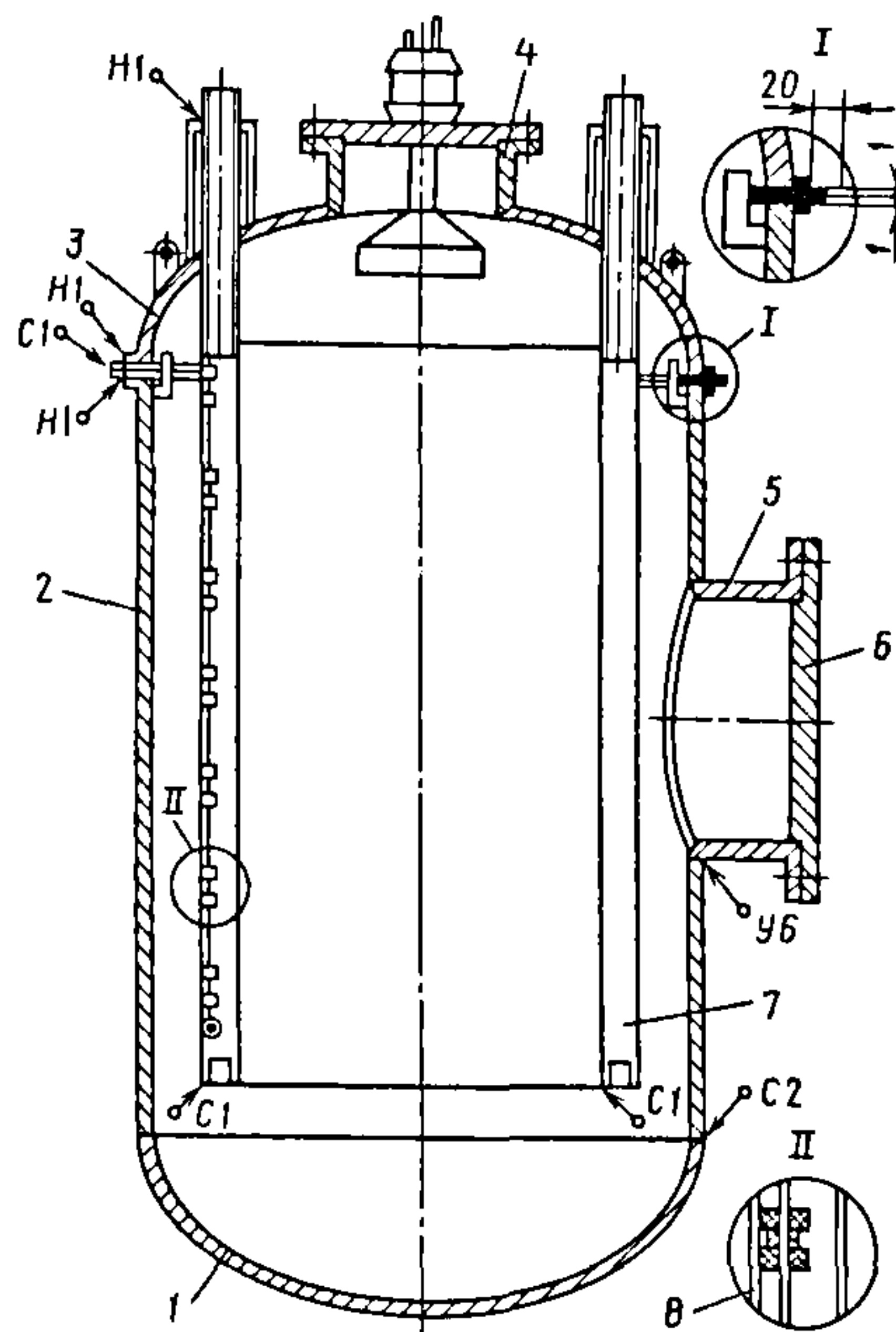
Вакуумные камеры представляют собой часть вакуумной системы. К ним предъявляют следующие основные требования:

обеспечение необходимых для проведения технологического процесса остаточного и парциального давлений ( $p_0$  и  $p_i$ );  
получение необходимых вакуумных условий в заданное время  $t$ .

Для выполнения этих требований при проектировании вакуумной системы определяют поток  $Q$  откачиваемого газа во времени, по которому рассчитывают быстроту откачки  $S_0$  системы и выбирают насосы, обеспечивающие необходимые значения  $S_0$ ,  $p_0$ ,  $p_i$  и  $t$ .

Для определения значений  $Q$  в общем виде необходимо знать объем вакуумной камеры  $V_{в.к.}$ , площадь  $F_k$  ее поверхности, находящейся в вакууме, материал и температуру камеры, а также ряд других параметров, характерных для каждой конкретной установки и влияющих на значение  $Q$ .

В зависимости от требований вакуумные камеры подразделяют на низко-, высоко- и сверхвысоковакуумные. Кроме того, к ним могут быть предъявлены требования по «чистоте» вакуума, т.е. допустимо или нет наличие углеродсодержащих компонентов в остаточном газе. Для получения чистого и сверхвысокого вакуума камеры прогревают, что налагает дополнительные требования на их конструктивные элементы.



**Рис. 6.1. Сверхвысоковакуумная камера:**  
1 – днище; 2 – обечайка; 3 – крышка;  
4, 5 – патрубки; 6 – фланец; 7 – внутренний  
полый сосуд; 8 – нагреватель; H1 – нахлесточ-  
ное соединение с односторонним сварным  
швом; C1 – стыковое соединение с отбортов-  
кой кромок; C2 – то же, без скоса кромок;  
Y6 – угловое соединение одностороннее  
со скосом одной кромки

Обычно различают два типа камер: непрогреваемые и прогреваемые. Вакуумные камеры, как правило, изготавливают из металлов, хотя в лабораторной практике для этих целей часто применяют стекло.

К основным конструктивным элементам вакуумных камер следует отнести обечайки, днища, крышки, патрубки, фланцы. На рис. 6.1 показана прогреваемая вакуумная камера для получения сверхвысокого вакуума.

## 6.2. ОБЕЧАЙКИ

Обычно вакуумные камеры воспринимают внешнюю распределенную нагрузку, как правило  $\leq 10^5$  Па, т.е. атмосферное давление. Исходя из этого, стенки вакуумных камер можно делать сравнительно тонкими. Однако для вакуумных камер с металлическими уплотнителями не допускаются деформации мест соединения во избежание появления течей.

При конструировании камер предпочтение отдают осесимметричным конструкциям, поверхности которых образованы телами вращения. Это относится и к соединительным патрубкам, и к разборным фланцевым соединениям. Из требований назначения установки, а также конструктивных соображений камеры по форме могут быть цилиндрическими, коническими, коробчатыми, сферическими или эллиптическими.

**Цилиндрические обечайки** наиболее широко распространены, отличаются простотой изготовления, рациональным расходом материала и рекомендуются для применения при отсутствии особых требований к форме камер. При конструировании цилиндрических обечаек, независимо от материала и технологии изготовления, внутренний базовый диаметр  $D_b$  следует выбирать из ряда (ГОСТ 9617-76), мм: для сварных обечаек из стали – 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; для сварных и паяных обечаек из цветных металлов и сплавов – 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1100; 1200; 1300; 1400; 1500; 1600; 1800; 2000.

Развернутую длину цилиндрической обечайки определяют по среднему диаметру  $D_{cp} = 0,5(D_n + D_b)$ , где  $D_n$  и  $D_b$  – наружный и внутренний диаметры обечайки соответственно.

В зависимости от назначения цилиндрические камеры могут быть вертикального или горизонтального исполнения. Предпочтение следует отдавать верти-

кальному исполнению; в этом случае исключаются дополнительные напряжения изгиба от силы тяжести, характерные для горизонтальных камер.

На практике толщину элементов вакуумных камер определяют не только расчетами на прочность, но и по технологическим соображениям, конструктивным решениям и т.д.

Конические обечайки применяют обычно как переходную часть цилиндрических вакуумных трубопроводов с различными диаметрами. По технологии изготовления конические обечайки аналогичны цилиндрическим. На рис. 6.2 показаны основные конструкции конических обечаек.

**Сферические обечайки** наиболее рациональны с позиции устойчивости и минимального расхода материала, однако трудоемкость изготовления ограничивает их широкое применение. Технология изготовления сферических обечаек состоит преимущественно из штамповки и выдавливания полушарий с последующей их стыковой сваркой или при наличии отбортовки с оплавлением кромок. Сферические вакуумные камеры обычно выполняют диаметром  $\leq 300 \dots 500$  мм.

В табл. 6.1 даны рекомендуемые толщины стенок обечаек и днищ.

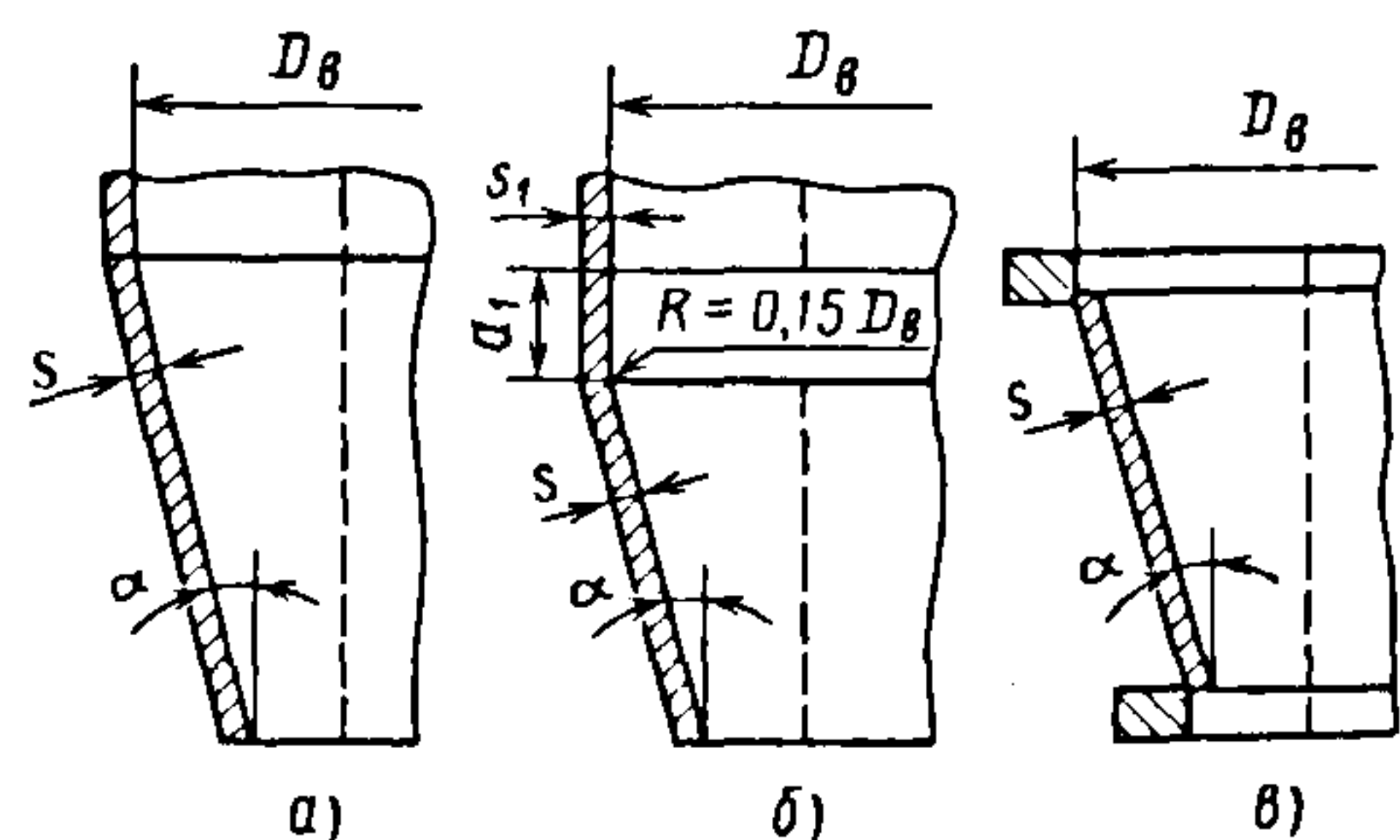


Рис. 6.2. Типовые конструкции конических обечаек:

а – без отбортовки краев; б – с отбортовкой краев; в – с фланцами;  $s$  и  $s_1$  рассчитываются из условий прочности;  $\alpha$  и  $\alpha_1$  выбираются из конструктивных соображений



Коробчатые обечайки в вакуумном аппаратостроении значительно меньше распространены по сравнению с цилиндрическими как относительно металлоемкие и более сложные в изготовлении. Однако в ряде случаев необходимо конструировать камеры коробчатой формы, поскольку в них удастся более рационально разместить внутрикамерные технологические устройства. Водяное охлаждение коробчатых камер выполняют, как правило, в виде трубчатых змеевиков. Коробчатые обечайки изготавливают либо

полностью сварными, либо гнутыми из листового проката. Радиусгиба выбирают из соотношения  $R \geq 5s$  (где  $s$  – толщина обечайки).

Для уменьшения толщины стенок камеры их укрепляют ребрами жесткости, которые в вакуумной аппаратуре располагают снаружи камеры.

Основные схемы укрепления прямоугольных стенок ребрами показаны на рис. 6.3, типовые конструкции коробчатых камер одинаковых размеров – на рис. 6.4.

### 6.1. Рекомендуемые толщины, мм, стенок обечаек и днищ

Диаметр цилиндрической обечайки	Толщина *			
	стенки обечайки	эллиптического днища	конического днища	стенки водяной рубашки
400	2,5; 5,0; 5,0	3,0; 5,0; 5,0	2,5	1,5
500	3,5; 5,0; 6,0	3,5; 5,0; 6,0	3,0	2,0
600	4,0; 6,0; 6,0	4,0; 6,0; 6,0	3,0	2,0
700	4,5; 6,0; 6,0	4,5; 6,0; 6,0	3,5	2,5
800	4,5; 8,0; 6,0	4,5; 8,0; 6,0	4,0	2,5
900	5,0; 8,0; –	5,0; 8,0; –	5,0	–
1000	5,0; 8,0; –	5,0; 8,0; –	5,0	–
1200	6,0; 10,0; –	6,0; 10,0; –	6,0	–
1400	7,0; 10,0; –	7,0; 10,0; –	6,0	–
1600	8,0; 12,0; –	8,0; 12,0; –	8,0	–
1800	8,0; 12,0; –	8,0; 12,0; –	8,0	–
2000	10,0; 14,0; –	10,0; 14,0; –	10,0	–

\* Три значения для обечайки и днища соответственно из стали, алюминия и меди.

Примечания. 1. Днища из меди МЗ и МЗС по МН 3035–61.

2. Днища МН 3034–61 из алюминиевых сплавов АД1, АМЗ и АМцС по МН 3034–61.

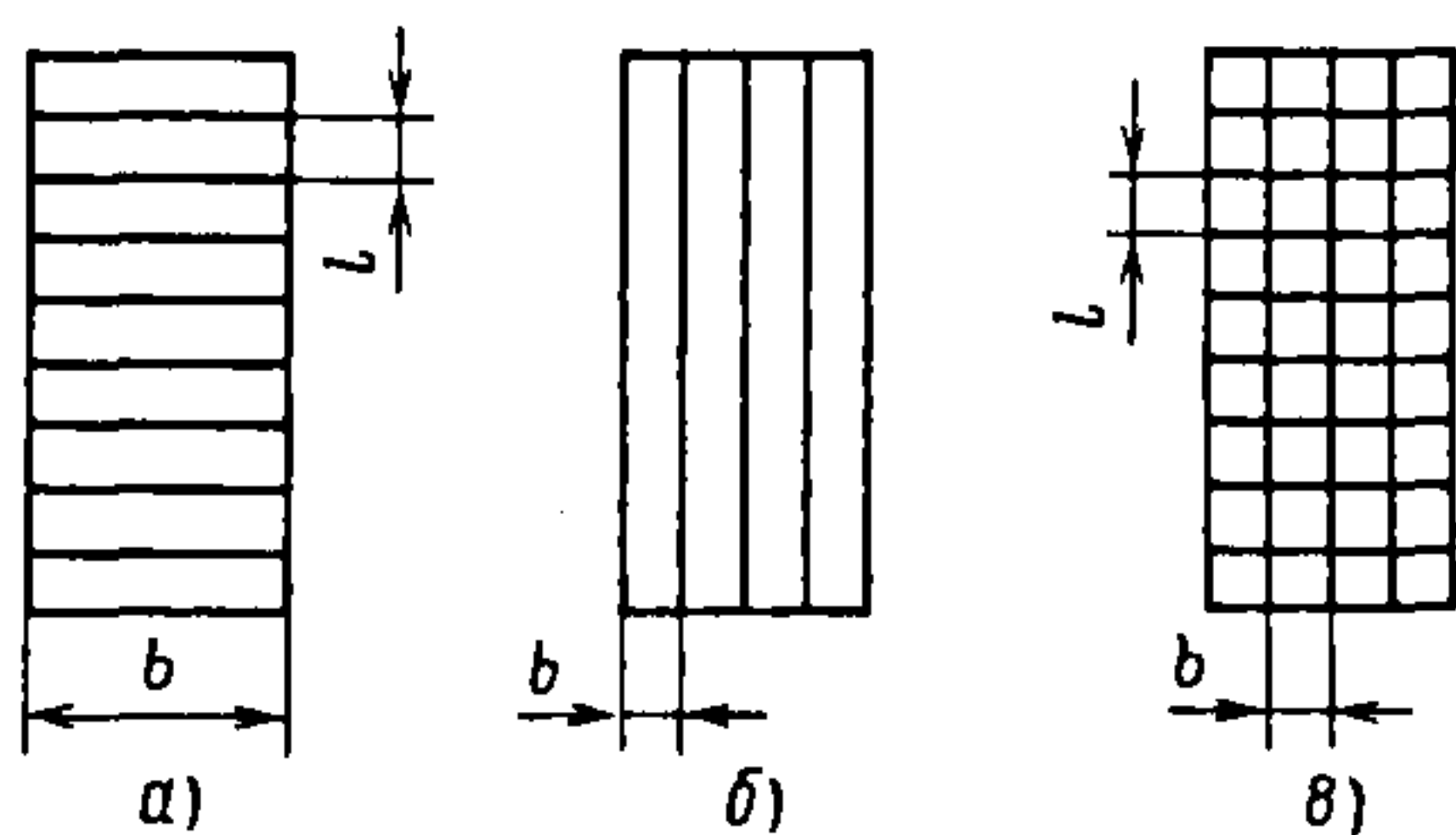


Рис. 6.3. Схемы укрепления ребрами плоских прямоугольных стенок:  
а – поперечными; б – продольными; в – в шахматном порядке ( $b$  и  $l$  выбираются из конструктивных соображений)

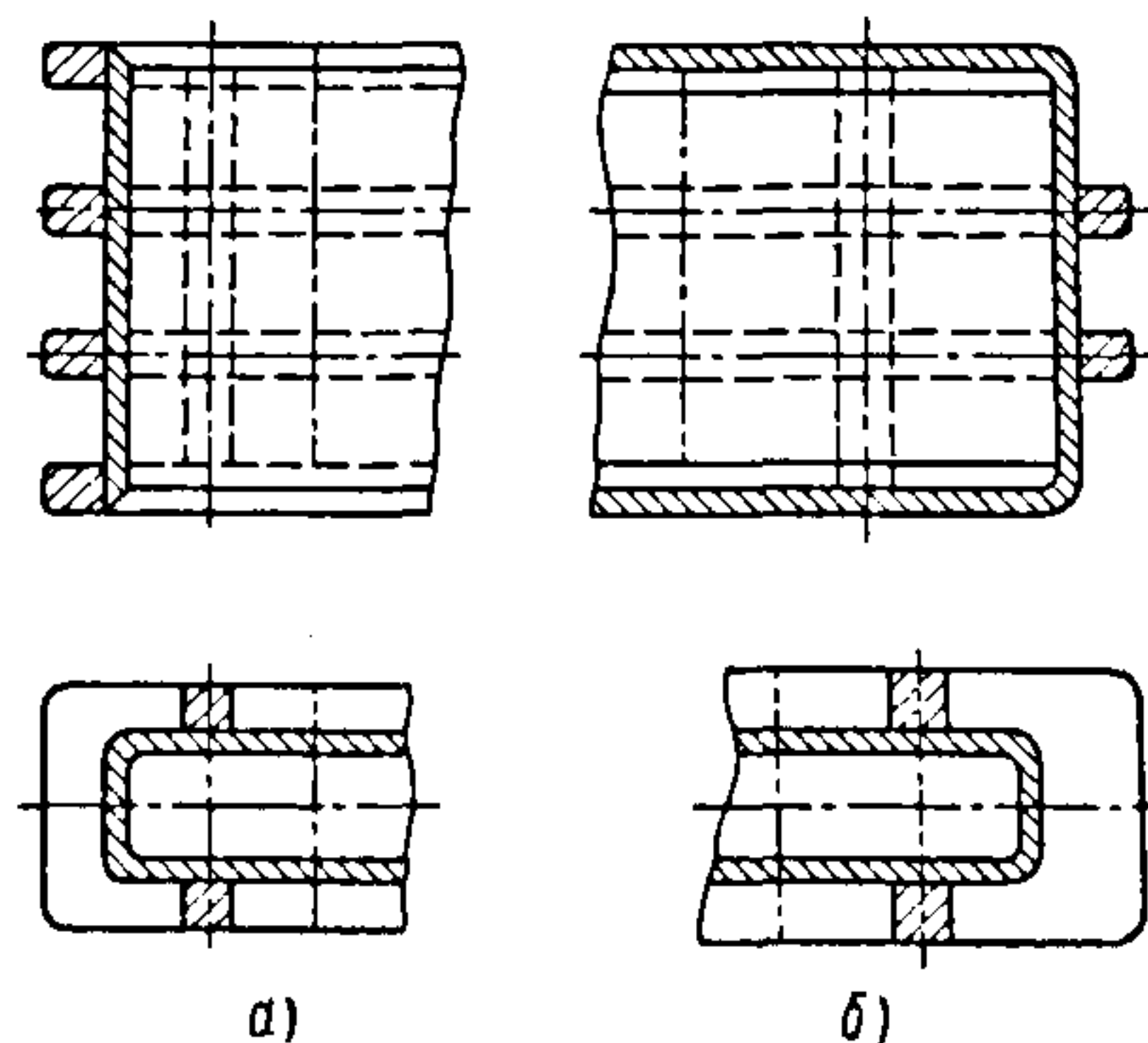


Рис. 6.4. Типовые конструкции коробчатых камер:  
а – с фланцами; б – с приварными днищами

При конструировании коробчатых камер руководствуются следующим:

размеры отдельных плоских прямоугольных участков выбирают как можно меньшими;

плоские стенки больших размеров укрепляют ребрами жесткости;

сварка должна быть стыковой, причем шов должен находиться вне зоны плавного перехода по радиусу.

### 6.3. ДНИЩА

Составными конструктивными элементами вакуумных камер, связанными с обечайкой, являются днища. *Днищем* называют деталь (конструктивный элемент) камеры, которая ограничивает корпус снизу, сверху или сбоку и неразъемна с обечайкой. Форма днища определяется формой сопрягаемой с ним обечайки, технологическими требованиями, предъявляемыми к камере, и может быть эллиптической, полушаровой, сферической, конической, плоской (круглой или прямоугольной).

Для цилиндрических обечаек наиболее широко распространены *эллиптические* днища, штампованные из листового проката, так как они наиболее рациональны с точки зрения восприятия давлений. Рекомендуемые соотношения размеров эллиптических днищ (рис. 6.5):  $h_b = 0,25D_b$ , но  $\geq 0,2D_b$ ; для днищ из листового проката  $h \geq 2s$ , но  $\geq 25$  мм. Толщины эллиптических днищ из стали, алюминия и меди, сопрягаемых с цилиндрическими обечайками, приведены в табл. 6.1.

*Конические* днища применяют в цилиндрических камерах вертикального исполнения, главным образом в нижней их части, в случаях, когда это обусловлено технологическим процессом, исключающим применение эллиптического днища.

Конические днища используют достаточно редко; конструктивно они сходны с коническими обечайками. Угол конуса  $\alpha$  принимают обычно равным 60 или 90°, редко до 150°. Данные по толщине конических днищ из сталей приведены в табл. 6.1.

*Плоские* днища изготовляют значительной толщины; при этом расходуют в 3–5 раз больше металла, чем для выпуклых днищ. Камеры с плоскими днищами имеют наименьшую длину, а изготовление плоских днищ не требует специального оборудования и может быть осуществлено на любом механическом заводе, имеющем металлорежущие станки.

Для уменьшения толщины плоских днищ их снабжают ребрами жесткости (рис. 6.6), которые располагают радиально и приваривают к днищу прерывистым двусторонним швом. Число ребер должно быть  $\geq 6$ . Обычно плоские днища применяют для днищ диаметром 1,0...1,5 м.

Конструктивные формы сварных соединений днищ с цилиндрическими обечайками показаны в табл. 6.2.

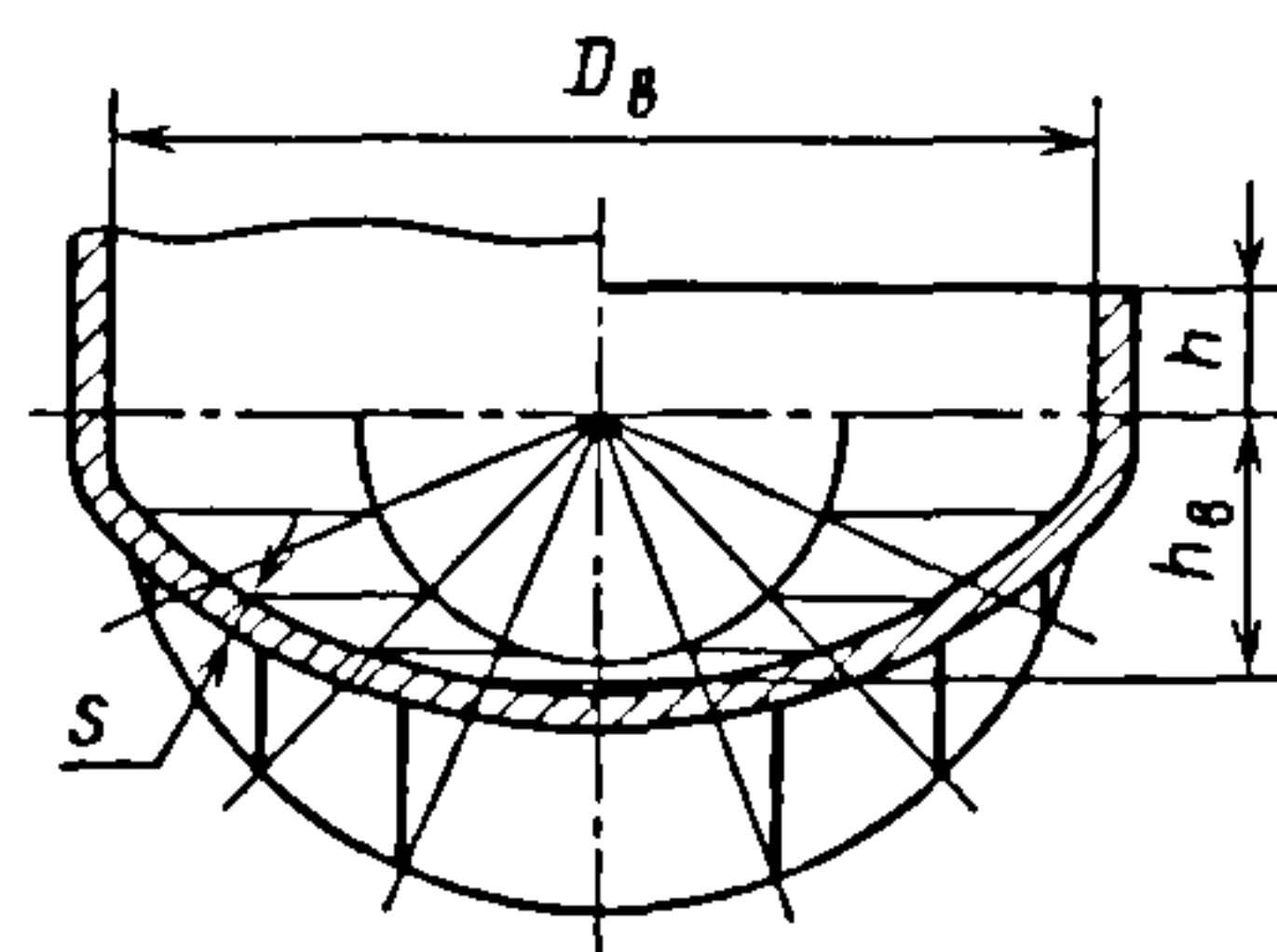


Рис. 6.5. Эллиптическое днище

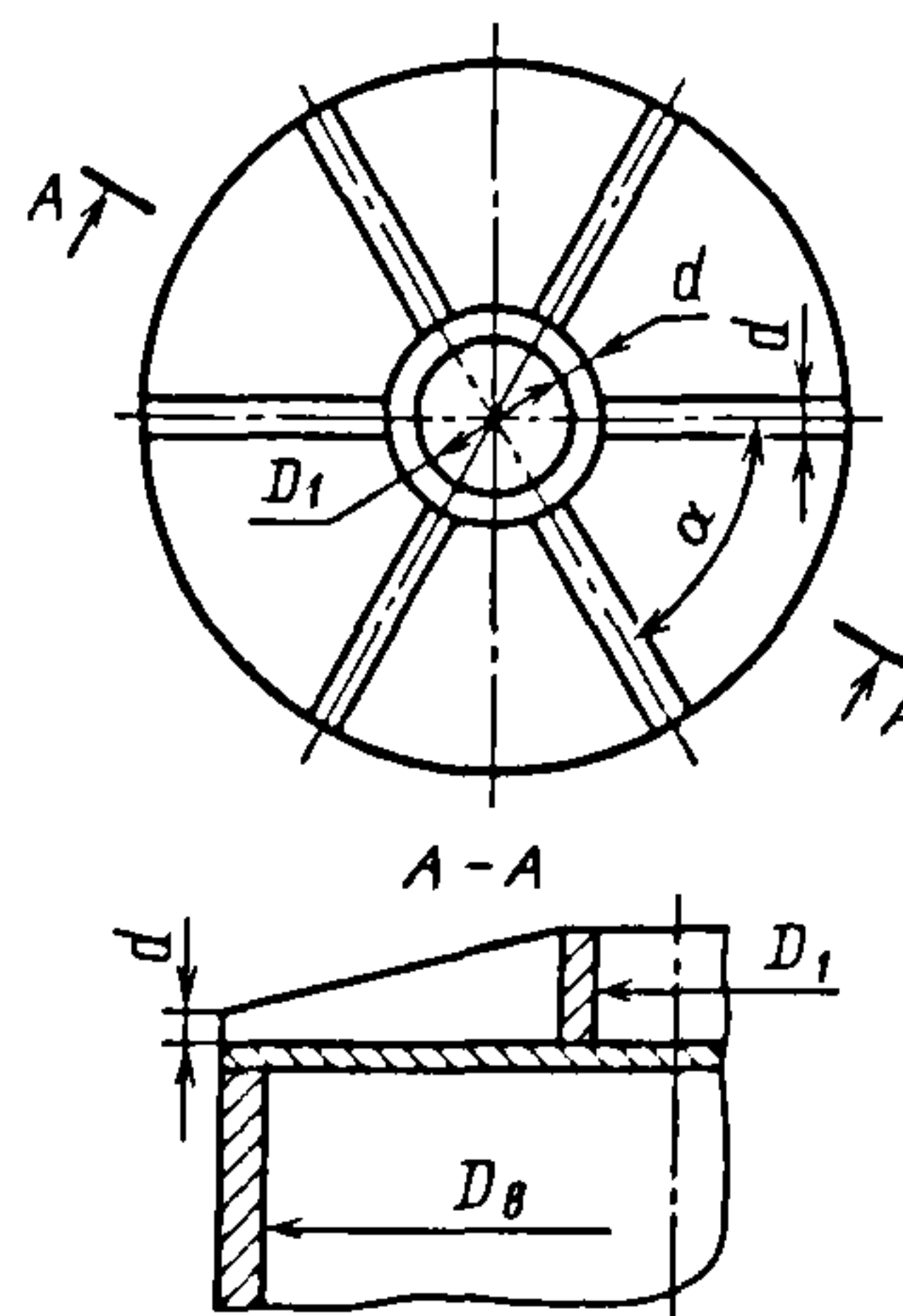
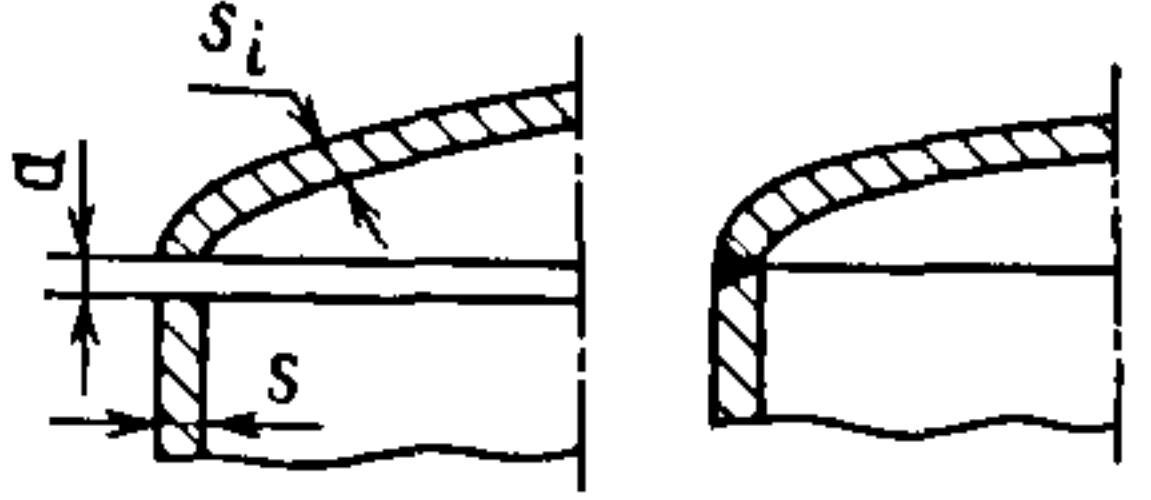
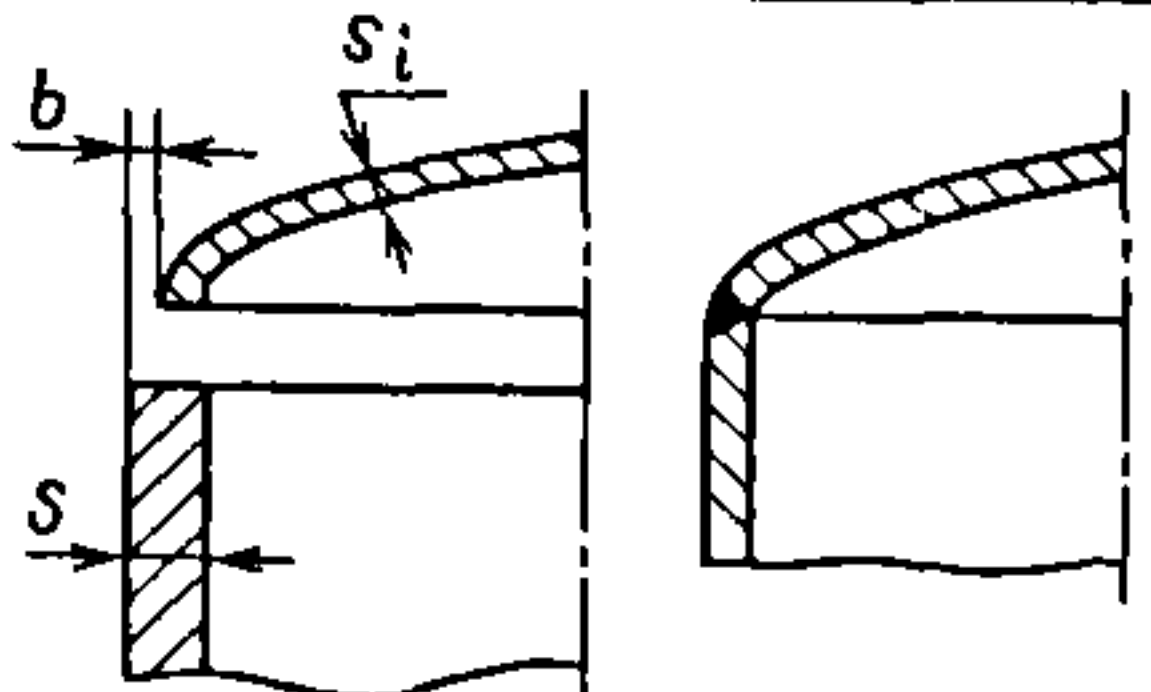
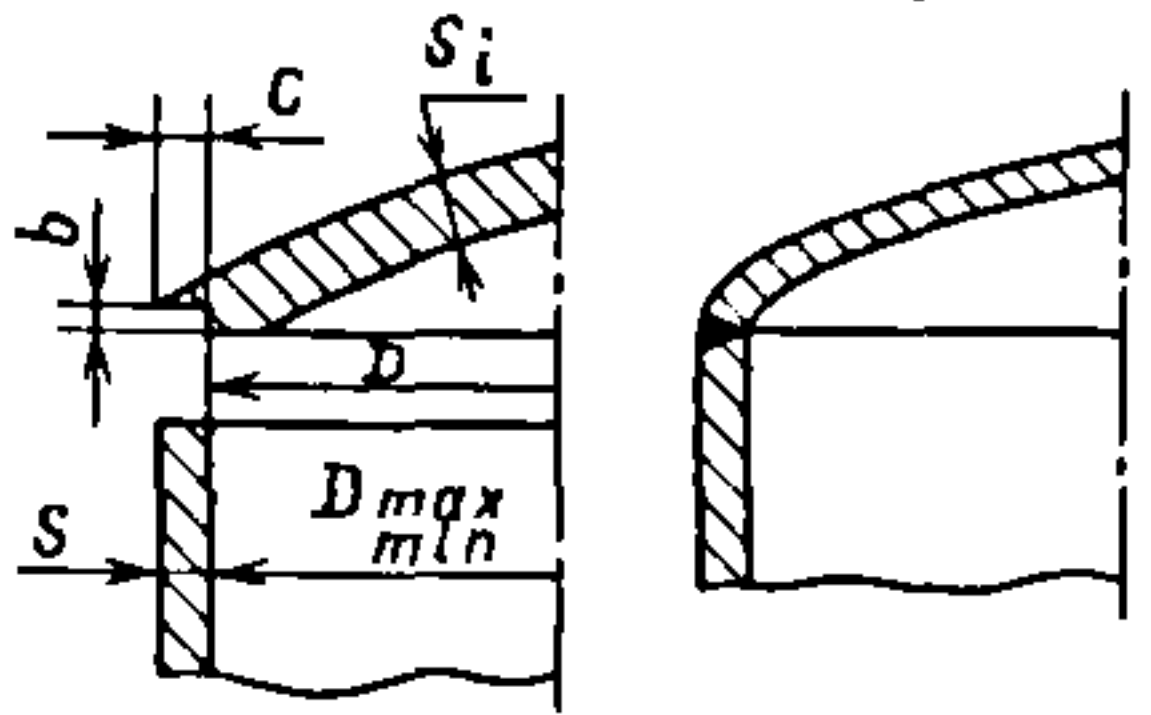
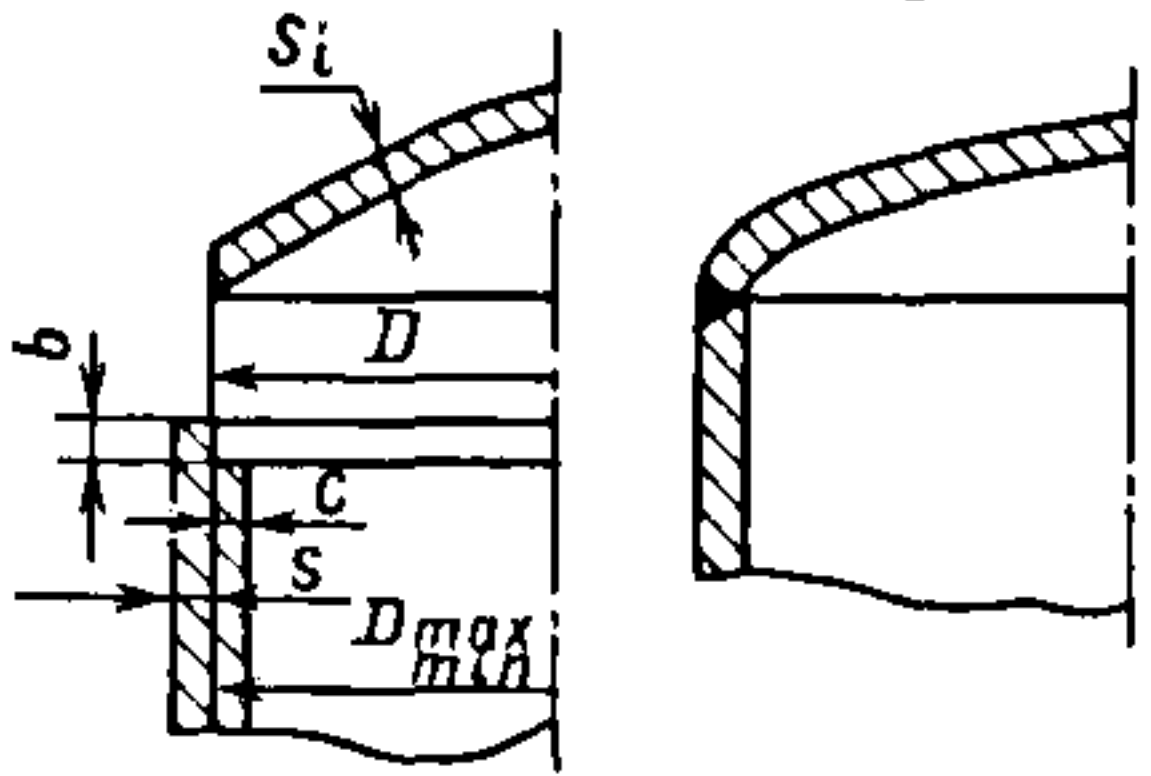
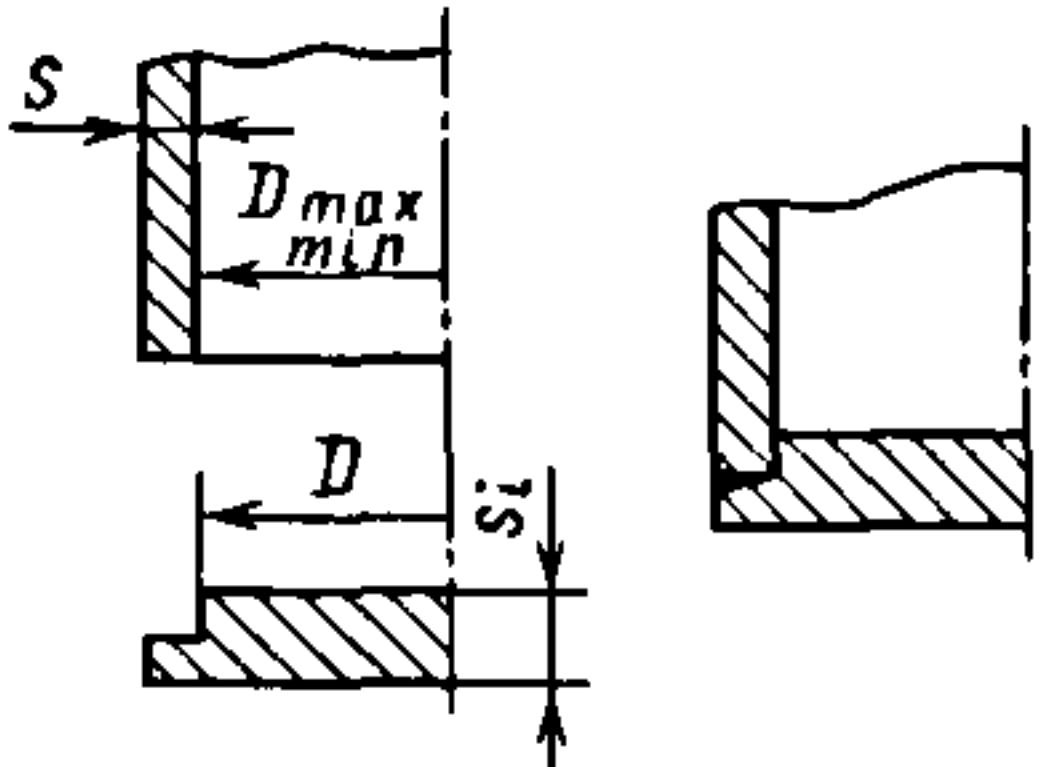
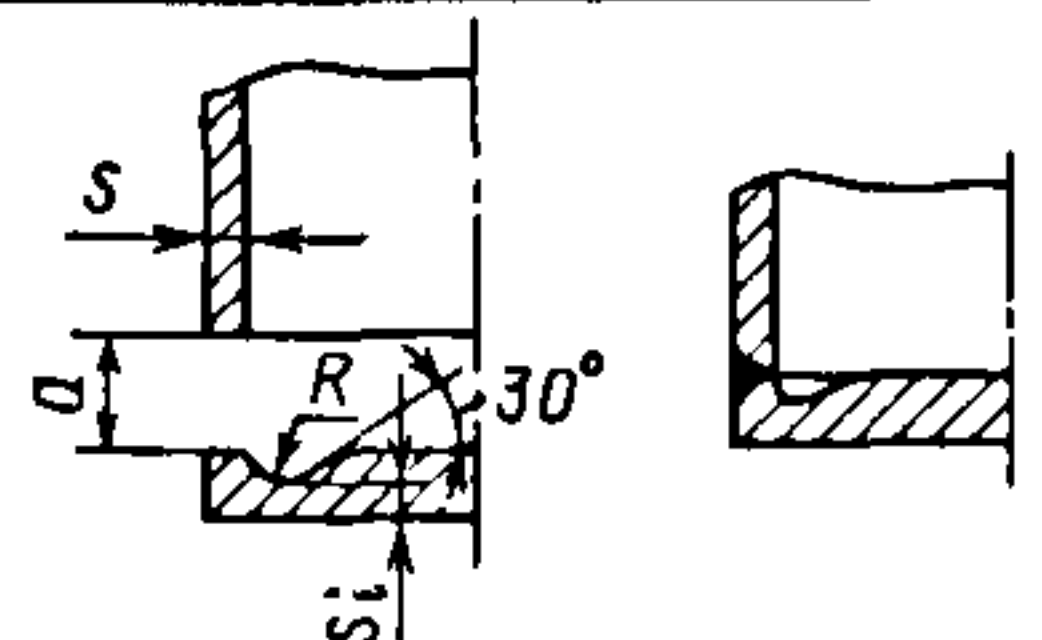
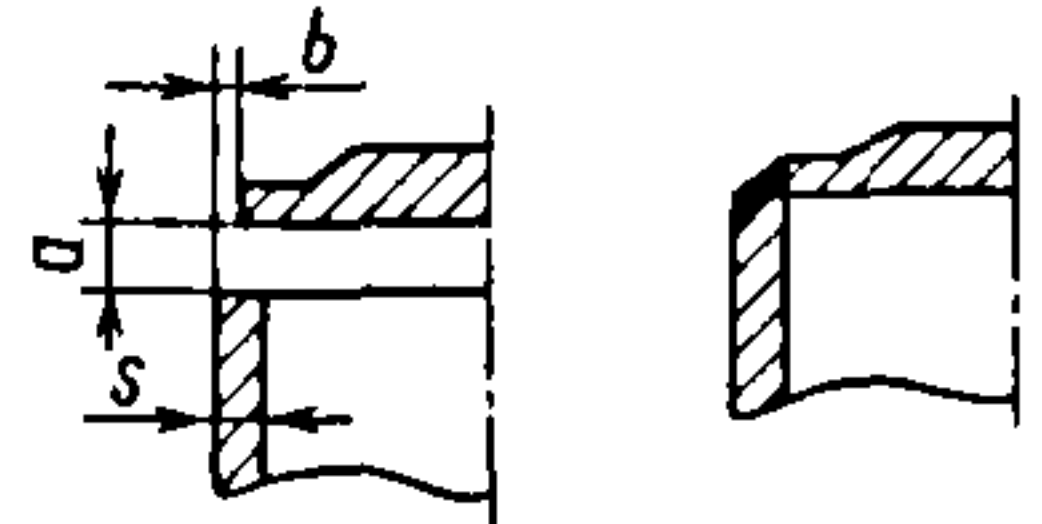
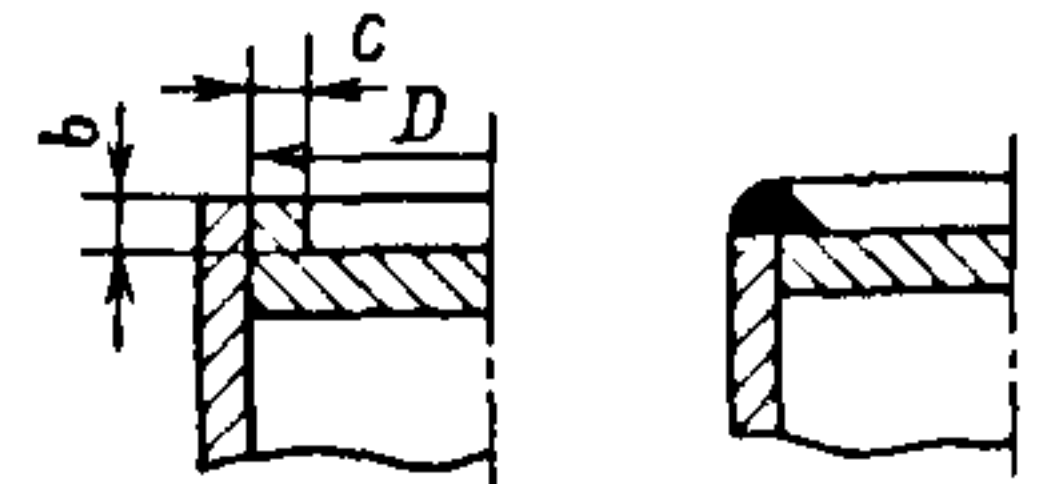


Рис. 6.6. Плоское днище с ребрами жесткости



## 6.2. Конструктивные формы сварных соединений с цилиндрическими обечайками

Варианты соединения днища с обечайкой до сварки (слева), после сварки (справа)	Назначение
	При сварке эллиптических днищ. Стыковой шов без разделки кромок; $a \leq 0,3 \text{ мм}$
	Без расточки при плоских краях днища и обечайки; $b = 0,2 \dots 0,3 \text{ мм}$
	Для толстых днищ ( $s_i \geq 5 \text{ мм}$ ). Сварка с оплавлением кромок; $b = c = 1,0 \dots 1,5 \text{ мм}$ ; $D = 0,5(D_{\max} + D_{\min}) - (0,3 \dots 1,0) \text{ мм}$
	Для тонких выпуклых днищ ( $s_i < 5 \text{ мм}$ ); $b = c = 1,0 \dots 1,5 \text{ мм}$ ; $D = 0,5(D_{\max} + D_{\min}) - (0,3 \dots 1,0) \text{ мм}$
	Для высоковакуумных систем; сварка угловым наружным швом; $D = 0,5(D_{\max} + D_{\min}) - (0,3 \dots 1,0) \text{ мм}$
	Стыковой шов без разделки кромок. Для сверхвысоковакуумных систем $a \leq 0,3 \text{ мм}; s_i = s$ ; $R = \frac{2}{3}s_i, \text{ но } \geq 5 \text{ мм}$
	Для сверхвысоковакуумных систем $a \leq 0,3 \text{ мм}; b = 0,2 \dots 0,5 \text{ мм}$
	Вварка днищ ( $O < 0,4 \text{ м}$ ) с отбортовкой оплавлением кромок; $b = c \approx 2 \dots 4 \text{ мм}$

### 6.4. КРЫШКИ

В отличие от днищ, неразъемно соединенных с обечайкой камеры, крышки являются разъемными элементами камеры, герметично закрывающими корпус камеры. Форма крышек определяется конструкцией и назначением камеры и может быть идентична форме днищ. Способ уплотнения крышек с обечайкой зависит от типа установки и периодичности разгерметизации. Крышки непрогреваемых камер, как правило, соединяют с обечайками посредством стандартизованных уплотнителей. Редко вскрываемые крышки

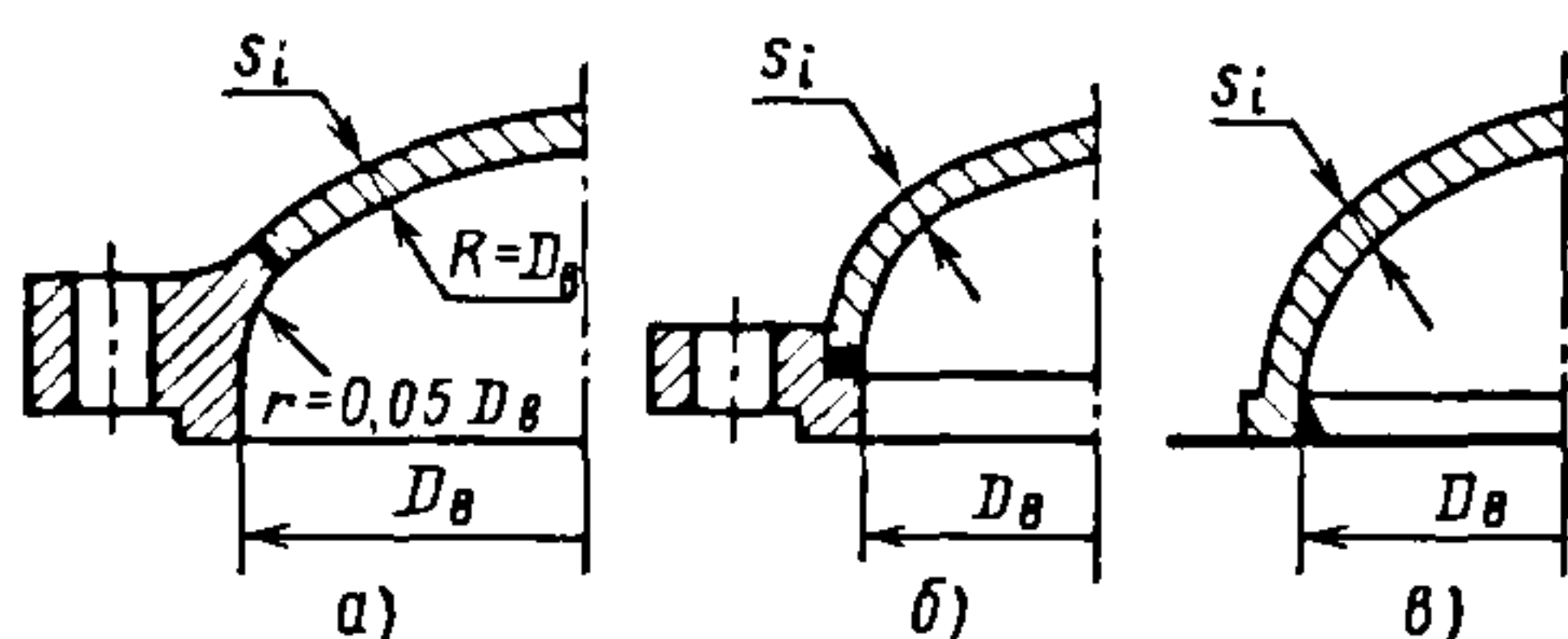


Рис. 6.7. Сварные крышки больших диаметров:

а – сферическая; б – эллиптическая;  
в – эллиптическая с лепестковым уплотнением

большого диаметра  $D_{\text{в}} \geq 1,2$  м) прогреваемых камер целесообразно соединять с обечайкой сварным лепестковым уплотнением; при вскрытии его срезают и затем заваривают.

В лабораторной практике и для единичных образцов крышки чаще всего выполняют точеными; при серийном производстве, а также для камер большого диаметра круглые крышки, как правило, изготовляют сварными из стандартных выпуклых днищ и точеных фланцев.

На рис. 6.7 даны примеры конструкции крупных крышек.

### 6.5. ПРОГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ КАМЕР

Практикой установлено, что оптимальная температура прогрева  $\sim 573$  К.

Наиболее широко применяют наружные нагреватели. Простейшую конструкцию имеет коробчатый нагреватель из асбоцементных плит с крючками для крепления спирального нагревателя (рис. 6.8).

Более удобным и компактным является наружный нагреватель из керамических трубок и нихромовой проволоки (рис. 6.9).

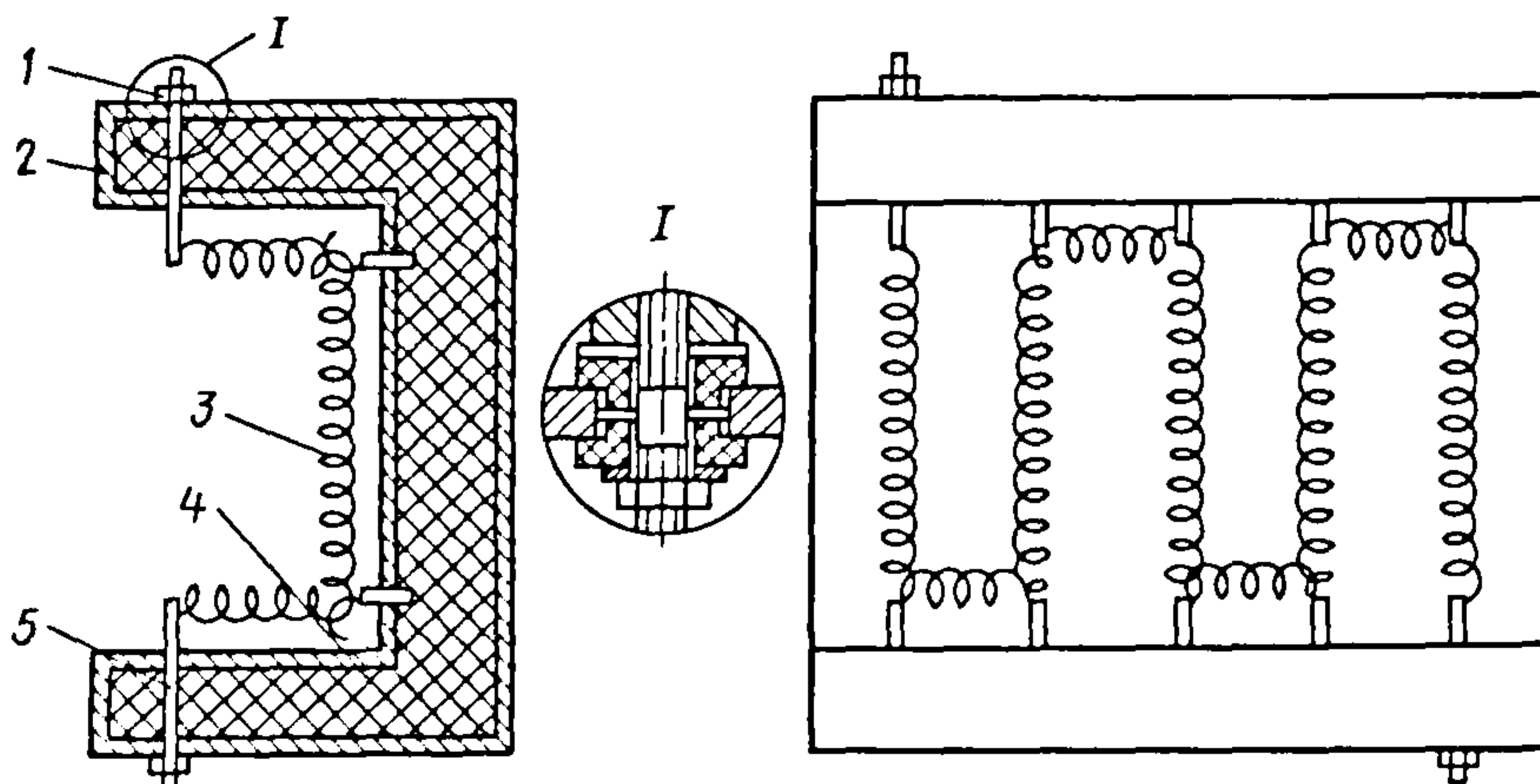


Рис. 6.8. Коробчатый нагреватель:

1 – токоввод; 2 – корпус; 3 – нихромовая спираль; 4 – теплоизоляция; 5 – асбоцементная плита



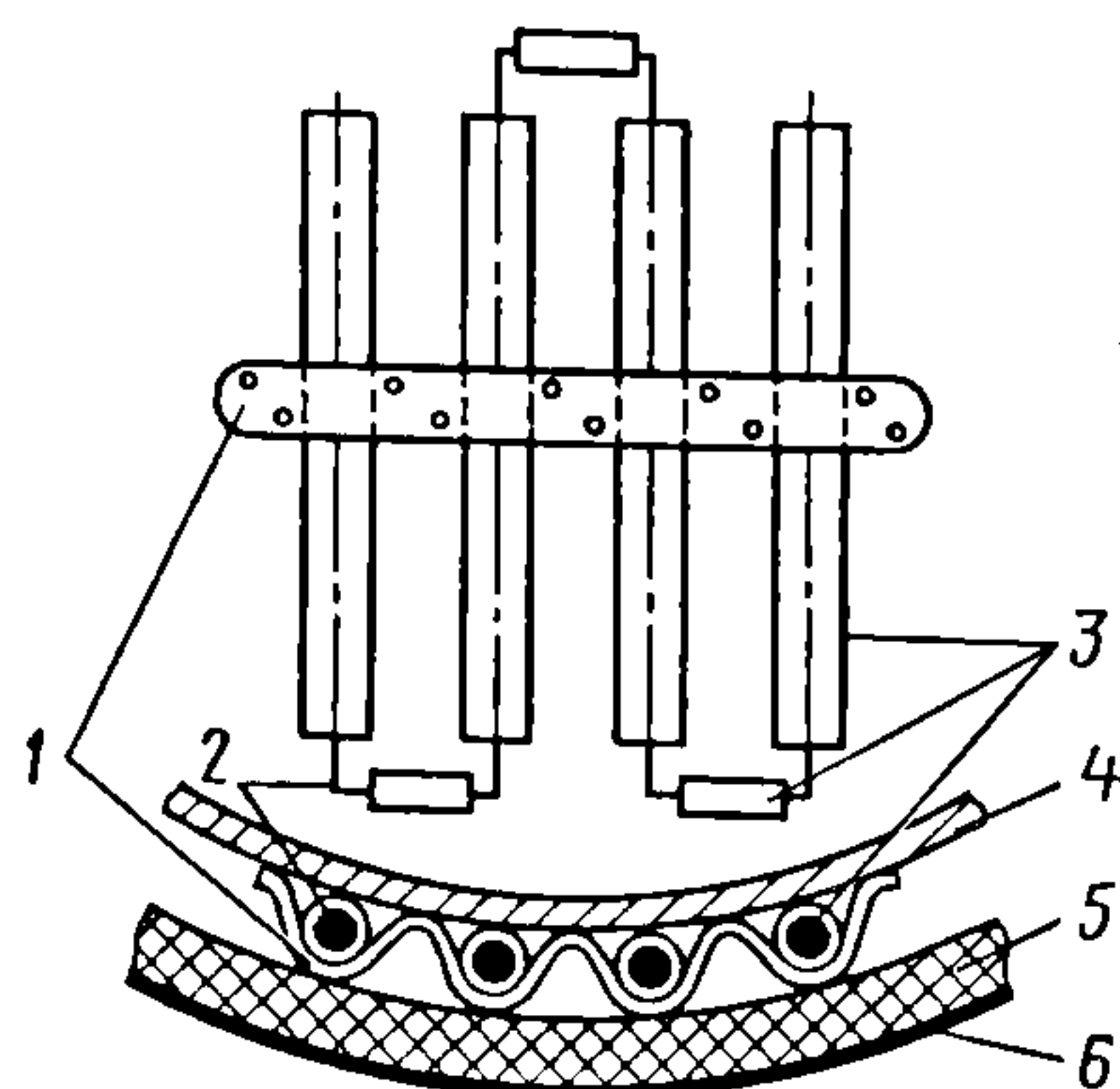


Рис. 6.9. Схема нагревателя:

1 – лента крепления керамических трубок к корпусу; 2 – нихромовая проволока; 3 – керамическая трубка; 4 – обечайка; 5 – теплоизоляция; 6 – фольга

Наиболее прост в изготовлении нагреватель из термостойкого кабеля типа КНМС. Кабель размещают непосредственно на камере и ее элементах и крепят узкой стальной лентой, привариваемой к основному металлу точечной сваркой. Радиус изгиба кабеля  $R_n \geq 3d$  (где  $d$  – наружный диаметр кабеля 2 – рис. 6.10). Затем укладывают теплоизоляцию и сверху закрывают алюминиевой или коррозионно-стойкой фольгой.

Нагревательные кабели с минеральной изоляцией в стальной оболочке с жилами из нихрома, коррозионно-стойкой стали и никеля [кабели типа соответственно КНМС (НХ), КНМС (С), КНМС (Н) выпускают по ТУ 1606/467–69 ( $T_{\max} = 873$  К)].

В табл. 6.3 приведен сортамент термостойких кабелей КНМС.

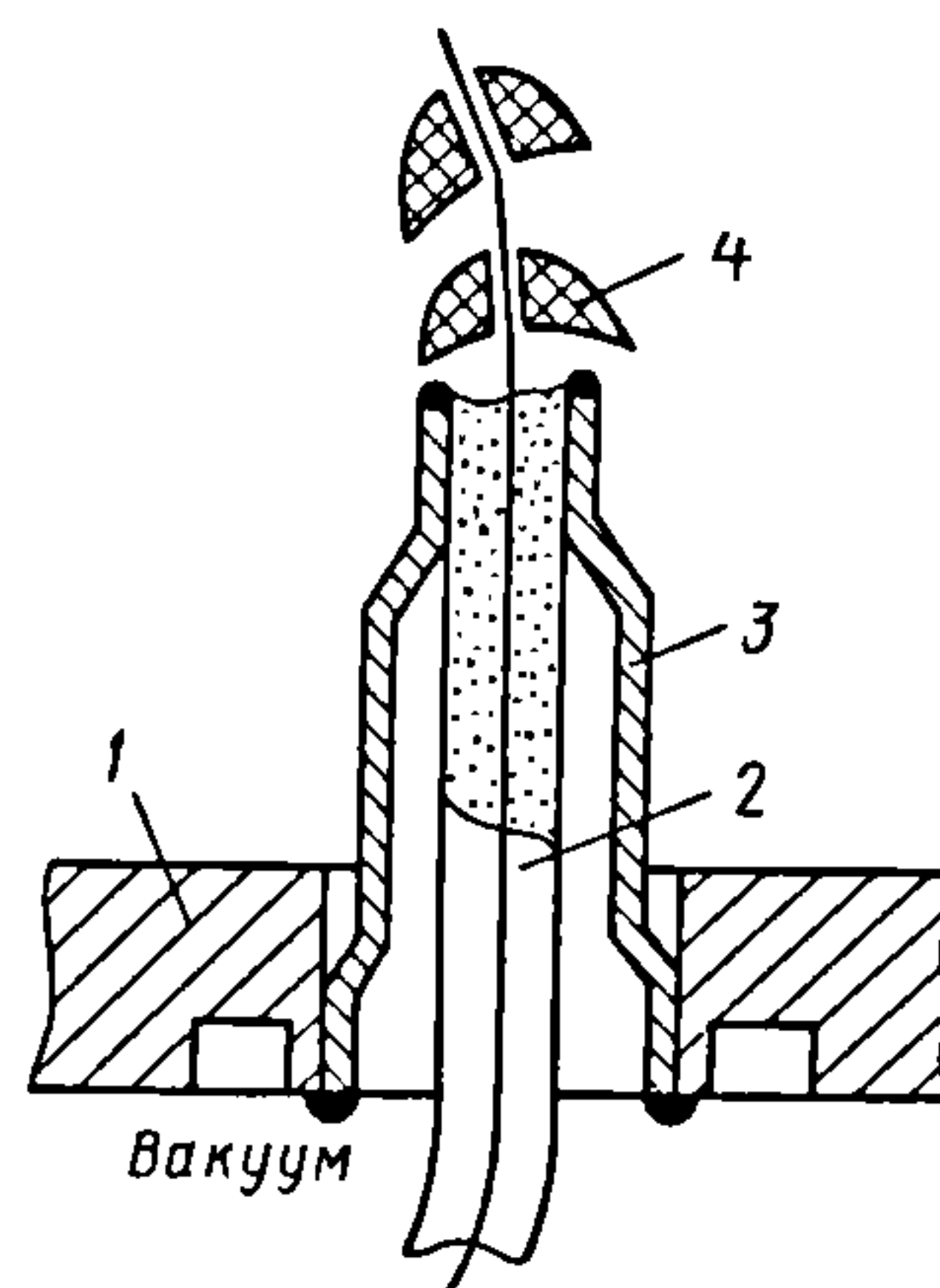


Рис. 6.10. Узел ввода кабеля типа КНМС в вакуумную камеру:

1 – фланец; 2 – кабель; 3 – втулка (сталь 12Х18Н9Т); 4 – керамические бусы

Пример обозначения: КНМС (НХ) 1×0,283 – нихромовый нагреватель в оболочке из коррозионно-стойкой стали однопроволочный, площадь сечения 0,283 мм<sup>2</sup>.

В качестве теплоизоляции в лабораторной практике часто используют теплоизоляционные маты АТМ-3, АТИМС-5 длиной 1100 мм (табл. 6.4); рабочая температура 213...723 К; обшивка из стеклосетки. Теплопроводность  $\lambda = 3,95 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К). Выпускаются маты и полосы следующих размеров, мм:

	Маты	Полосы
Длина . . . . .	1000...3000	5000...6000 (через 50 мм)
Ширина . . . . .	200...750	30; 50; 75; 100; 150; 200; 250
Толщина . . .	10; 15; 20	10; 15; 20; 30

### 6.3. Сортамент термостойких кабелей КНМС

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Диаметр жилы, мм	Наружный диаметр кабеля, мм	Напряжение, В		Максимальная длина отрезка, м
			рабочее	испытательное	
0,070	0,29	1,5	115	600	450
0,283	0,60	3,0			100
0,502	0,80	4,0	220		50
0,785	1,00	5,0			30
1,131	1,29	6,0		1000	20

## 6.4. Теплоизоляционные маты

Марка	Ширина, мм	Толщина, мм	Толщина волокна наполнителя, мкм
АТМ-3	550	3; 5; 10; 15; 20	2
АТИМС-5	840	5; 10; 15	5...7

Часто нагреватели помещают внутрь камер; в этом случае стремятся к тому, чтобы нагреватели не загрязняли прогреваемый объем. Для этого в конструкциях нагревателей используют конструкционные и изоляционные материалы с малым газовыделением. Для этих целей наиболее подходят нагревательные кабели КНМС. Некоторые трудности возникают при выводе кабеля из камеры (см. рис. 6.10). Сварка аргонодуговая, с оплавлением кромок.

Используют нихромовые нагреватели (рис. 6.11), которые крепят внутри камеры на миналундовых изоляторах. Последние, в свою очередь, крепят на стенках камеры и ее элементах металлическими лентами, привариваемыми к стенке точечной сваркой. Шаг изоляторов выбирают с учетом прогиба проволоки, определяемого ее толщиной и температурой. Во избежание деформации нагревателя из-за температурного удлинения одной из коротких сторон изоляторы не закрепляют на камере.

В последнее время для прогрева камер и внутренних элементов используют инфракрасные лампы накаливания — галогенные источники света. В инфракрасных

лампах ~ 80 % потребляемой энергии передается излучением, они имеют большую плотность лучистого потока и являются практически безынерционными. Лампы серии НК (СТУ 104.693–65) представляют собой кварцевые трубки диаметром 10 мм и длиной 200...5000 мм; рабочее напряжение 220 В, срок службы 200 ч.

В табл. 6.5 и 6.6 приведены данные кварцевых ламп, рекомендуемых к использованию в нагревателях излучением.

Для получения особо чистых контролируемых вакуумных условий применяют вакуумные установки с двойным, или раздельным, вакуумом. По существу, это камера в камере, каждая со своей системой откачки. Наружная камера воспринимает всю силовую нагрузку, поэтому ее рассчитывают на прочность как обычную камеру; внутреннюю камеру в основном выполняют с тонкими стенками.

Если внутренняя камера не рассчитана по прочности на атмосферное давление, то для защиты ее от разрушения во время аварийной разгерметизации внутри наружной камеры на внутреннюю камеру ставят предохранительные мембраны.

Для обезгаживания таких систем их прогревают различными способами. Например, для прогрева тороидальной термоядерной установки «Токамак» используют индукционный метод; внутренняя камера служит одновитковой вторичной обмоткой трансформатора. В линейных протяженных системах иногда внутреннюю камеру прогревают прямым пропусканием тока по ее корпусу.

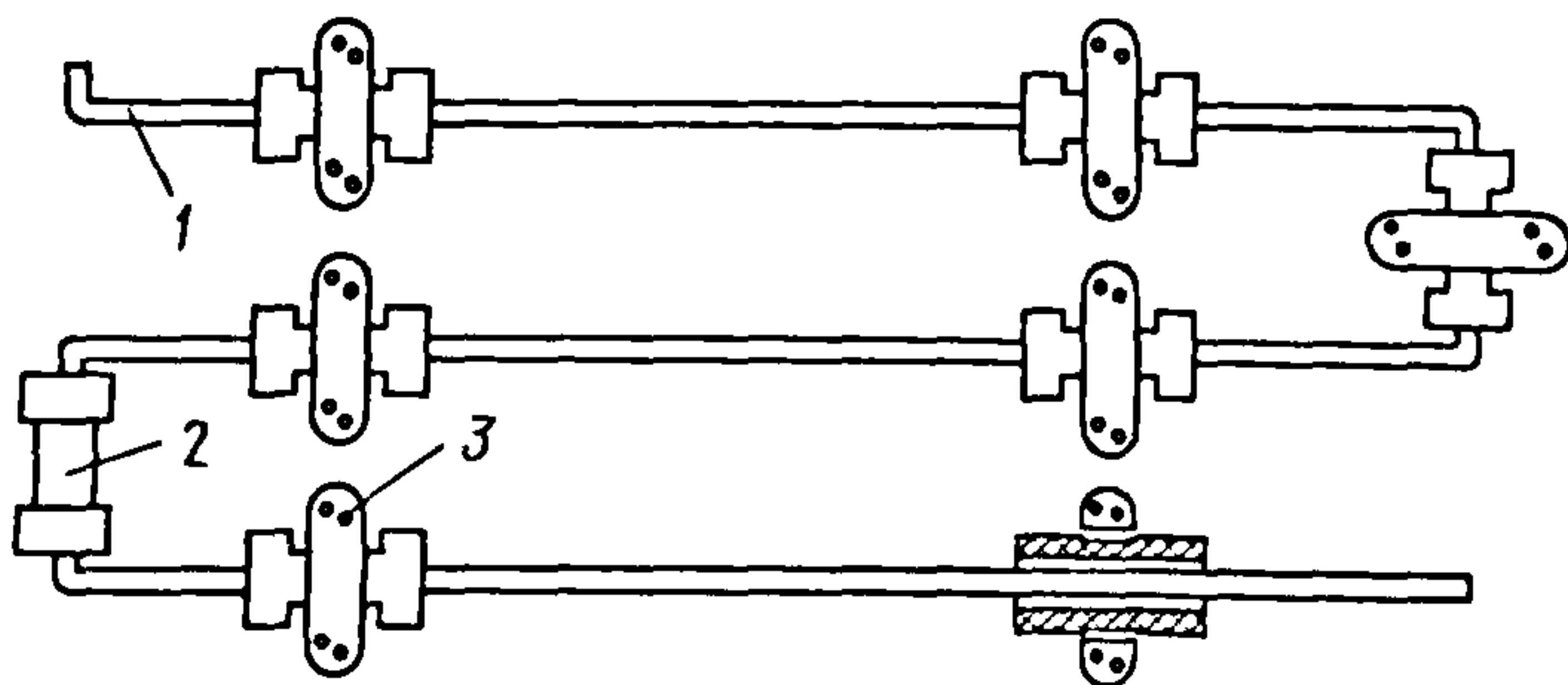


Рис. 6.11. Нихромовый нагреватель:

- 1 — нихромовая проволока;
- 2 — миналундовый изолятор;
- 3 — лента крепления изолятора



## 6.5. Характеристика кварцевых ламп

Тип лампы	Цветовая температура тела накала, К	Средняя продолжительность горения, ч	Диаметр оболочки, мм	Длина лампы, мм	Диаметр тела накала, мм	Длина тела накала, мм
КГ 127-500	2500	5000	11	250	1,3	190
КГ 220-1000-1		10 000		375		300
КГ 220-2000		5000		500	1,5	425
КГО 220-2500-8	2650	2000		440	1,6	435
КГО 220-2500-2				470		480
КГТД 220-600	2200			500	1,1	425
КГТД 220-1000	2400			500	1,3	
КГТД 220-1000-1	2600			375	1,4	300
КГТ 220-1000				500	1,1	430
КГТ 220-600	2000			9		280
КГТД 220-400-1	2350	3000				

Примечания. 1. Условные обозначения в типах ламп: К – кварцевая, Г – галогенная, О – с отогнутыми концами, Д – дифференциальное тело накала (с чередующимися спиральными и прямолинейными участками), Т – термоизлучатель. Первая цифра после букв – номинальное электрическое напряжение в вольтах; вторая – номинальная электрическая мощность в ваттах, цифра после второго дефиса – модификация лампы.

2. Для ламп всех типов цоколь плоский металлический.

## 6.6. Эксплуатационные характеристики и геометрические размеры кварцевых ламп

Тип лампы	ОСТ	Нап- ряже- ние <sup>1</sup> , В	Мощ- ность <sup>1</sup> , кВт	Средняя продол- житель- ность горения, ч	Цвето- вая темпе- ратура, К	Размеры, мм, не более		
						Длина нагре- вателя	Об- щая длина	Диа- метр
КГ 110-500	16 0.535.013-75	110	0,5	400	3200	67	132	11
КГ 220-2000-5		220	2,0	450		163	262 (470 <sup>3</sup> )	
КГТ 220-1000	16 0.535.024-76		1,0	2000	2600	457	500	12
КГТ 220-1000-1				10 000	2500	300	375	
КГТД 220-400			0,4	3000	2350	245	280	9
КГТО 220-2500-2			2,5	2000	2650	175 <sup>2</sup>	470	12
КГТО 220-2500						190 <sup>2</sup>	500	

<sup>1</sup> Номинальные значения; при установке ламп в вакуум мощность следует уменьшать в 2 раза.

<sup>2</sup> Габаритная длина с учетом длины гибких выводов.

<sup>3</sup> Длина отогнутых концов.

Чаще всего в системах с двойным вакуумом нагреватель крепят на наружной стороне внутренней камеры; если последняя выполнена в виде тонкостенного ци-

линдра с полыми стенками, нагреватель располагают внутри полой стенки. Например, в сверхвысоковакуумной камере (см. рис. 6.1) нагреватель 8 (типа показан-

ного на рис. 6.11) расположен во внутреннем полом сосуде.

В табл. 6.7 приведены параметры типового режима высокотемпературного обезгаживания.

**6.7. Параметры типового режима высокотемпературного обезгаживания**

Предельное остаточное давление, Па	Параметры режима	
	Температура, К	Продолжительность, ч
$1,3 \cdot 10^{-8}$	283...333	2 ...5
$1,3 \cdot 10^{-7}$	333...573	До 20
$10^{-8}$ и менее	673...773	До 150

Примечание. Скорость повышения температуры в зависимости от конструкции камер 10...50 К/ч.

Охлаждение камер необходимо для снятия тепловой нагрузки со стенок или других элементов камер. Чаще всего применяют два варианта охлаждения навивкой трубок или созданием водяных рубашек. Иногда комбинируют эти способы. Выбор способа для каждой конкретной установки зависит от требований к ней, конструкции, тепловой нагрузки и др.

В связи с этим нет типовых решений систем охлаждения, но разработаны общие рекомендации по проектированию охлаждения для вакуумных систем. Если позволяют тепловые нагрузки, для охлаждения следует использовать трубки, припаянные или приваренные к корпусу. При больших тепловых нагрузках вместо сплошных водяных рубашек надо приваривать уголки, создающие секционированную рубашку. При необходимости или целесообразности применения водяной рубашки не рекомендуется располагать ее на сварных швах.

Выполнение этих рекомендаций позволяет свести к минимуму возможность появления течей через систему охлаждения. Наличие такой системы чрезвычайно усложняет поиск и устранение мест негерметичности.

## 6.6. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ

Рассчитанные на прочность цилиндрические обечайки, нагруженные наружным давлением, иногда без видимой внешней причины подвергаются опасным деформациям и даже разрушению. Это явление аналогично явлению продольного изгиба стержней и называется *устойчивостью обечаек*. Давление, при котором могут возникнуть такие деформации и искажается первоначальная форма цилиндрической обечайки, называется *критическим*. Критическое давление зависит от геометрической формы и размеров обечайки, а также от физико-механических свойств материала.

Расчет цилиндрической обечайки, работающей под наружным давлением, сводится к определению допускаемого наружного давления.

Допускаемое наружное давление, Па,

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + ([p]_p/[p_E])^2}}, \quad (6.1)$$

где  $[p]_p$  – допускаемое давление из условия прочности, Па;  $[p_E]$  – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, Па.

$$[p_p] = \frac{2[\sigma](s - c)}{D_{\text{в}} + (s - c)},$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение при расчетной температуре, Па;  $s$  – толщина обечайки, м;  $c$  – сумма прибавок к расчетной толщине для компенсации коррозии, эрозии, минусового допуска на изготовление, м;  $D_{\text{в}}$  – внутренний диаметр обечайки, м.

$$p_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D_{\text{в}}}{l} \times \left[ \frac{100(s - c)}{D_{\text{в}}} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s - c)}{D_{\text{в}}}},$$

где  $E$  – модуль упругости при расчетной температуре, Па;  $n_y$  – коэффициент запаса устойчивости по нижним критическим



напряжениям в пределах упругости (для рабочих условий  $n_y = 2,4$ , для условий испытания и монтажа  $n_y = 1,8$ ;

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 8,15 \frac{D_b}{l} \sqrt{\frac{D_b}{100(s-c)}} \right\} -$$

безразмерный коэффициент;  $l$  – расчетная длина гладкой обечайки, м.

Расчетную длину цилиндрической обечайки принимают равной:

при наличии фланцев на обечайке – расстоянию между фланцами;

при ограничении обечайки эллиптическим (сферическим) днищем – длине цилиндрической части обечайки и днища плюс  $1/3$  высоты выпуклой части эллиптической (сферической) части последнего;

при ограничении обечайки плоским днищем – длине цилиндрической части обечайки до днища;

при наличии на обечайке колец жесткости – расстоянию между осями колец;

при ограничении обечайки коническими днищами – длине цилиндрической части обечайки и днища плюс  $D/(3 \operatorname{tg} \alpha)$ , где  $\alpha$  – угол при вершине конической обечайки.

Расчет коробчатых обечаек сводится к расчету плоской прямоугольной стенки с закрепленными краями, нагруженной давлением. Стенки считают закрепленными по краям при наличии на них фланцев и укрепляющих ребер, а также при сопряжении стенок под углом.

Допускаемое давление из условия прочности

$$[p]_p = [\sigma](s-c)^2 / (0,25b^2), \quad (6.2)$$

где  $b$  – ширина (меньшая сторона) прямоугольной стенки.

Для уменьшения расчетной толщины плоской прямоугольной стенки ее необходимо укрепить ребрами. Ребра могут быть параллельны большей или меньшей стороне стенки. Предпочтительнее укрепление поперечными ребрами, параллельными меньшей стороне.

При укреплении плоской прямоугольной стенки ребрами в формулу для

определения допускаемого давления (или допускаемой из условия прочности толщины) подставляют меньшее значение расстояния между осями укрепляющих ребер.

Расчет эллиптических и полусферических обечаек, работающих под наружным давлением, заключается в определении допускаемого наружного давления по формуле (6.1), в которой

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s-c)}{R + (s-c)},$$

где  $R = 0,25 D_b^2 / h_b$  – радиус кривизны в вершине выпуклой обечайки по внутренней поверхности, м ( $D_b$  – внутренний диаметр обечайки, м;  $h_b$  – высота выпуклой части обечайки без цилиндрической части, м).

Для этого случая допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, Па [см. формулу (6.1)]:

$$p_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \left[ \frac{100(s-c)}{K_3} \right]^2,$$

где  $K_3 = [1 + (2,4 + 8x)x] / [1 + (3,0 + 10x)x]$  – коэффициент приведения радиуса кривизны;

$$x = \frac{10(s-c)}{D_b} \left( \frac{D_b}{2h} - \frac{2h}{D_b} \right).$$

Расчет конических обечаек, работающих под наружным давлением, заключается в определении допускаемого наружного давления для гладкой конической обечайки по формуле (6.1). При этом допускаемое давление из условия прочности, Па,

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s-c)}{D_k / \cos \alpha + (s-c)},$$

где  $D_k$  – расчетный диаметр гладко конической обечайки, м (для конической обечайки без тороидального перехода  $D_k = D_b - 1,4a \sin \alpha$  ( $a = 0,7 \sqrt{(D_b / \cos \alpha)(s-c)}$  – расчетная длина переходной части, м);  $\alpha$  – половина угла при вершине конической обечайки.

Допускаемое давление из условия устойчивости, Па,

$$p_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D_E}{l_E} \left[ \frac{100(s-c)}{D_E} \right]^2 \times \sqrt{\frac{100(s-c)}{D_E}},$$

где  $D_E$  и  $l_E$  — эффективные диаметр и длина конической обечайки, м;

$$D_E = \max \left[ \frac{D_b + D_0}{2 \cos \alpha}; \frac{D_b}{\cos \alpha} - 0,31(D_b + D_0) \sqrt{\frac{D_b + D_0}{s-c} \operatorname{tg} \alpha} \right];$$

$$l_E = \frac{D_b - D_0}{2 \sin \alpha};$$

$$B_1 = \min \left[ 1,0; 8; 15 \frac{D_E}{l_E} \times \sqrt{\frac{D_E}{100(s-c)}} \right];$$

$D_0$  — диаметр меньшего основания конической обечайки, м.

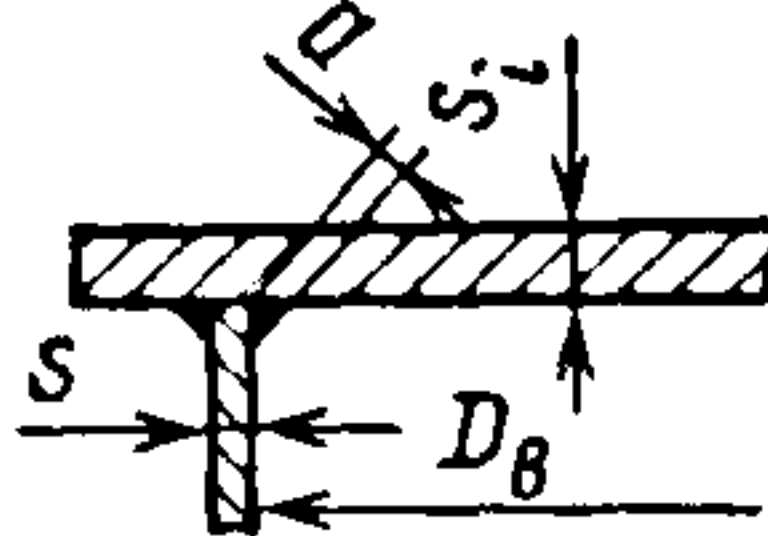
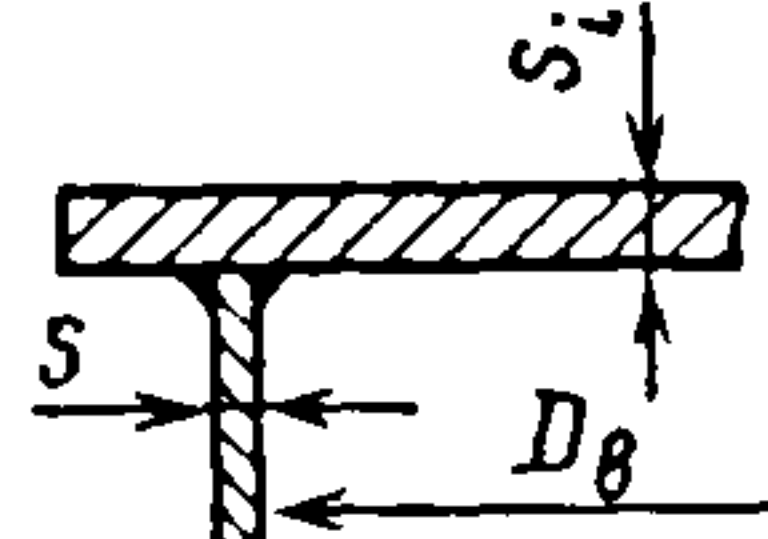
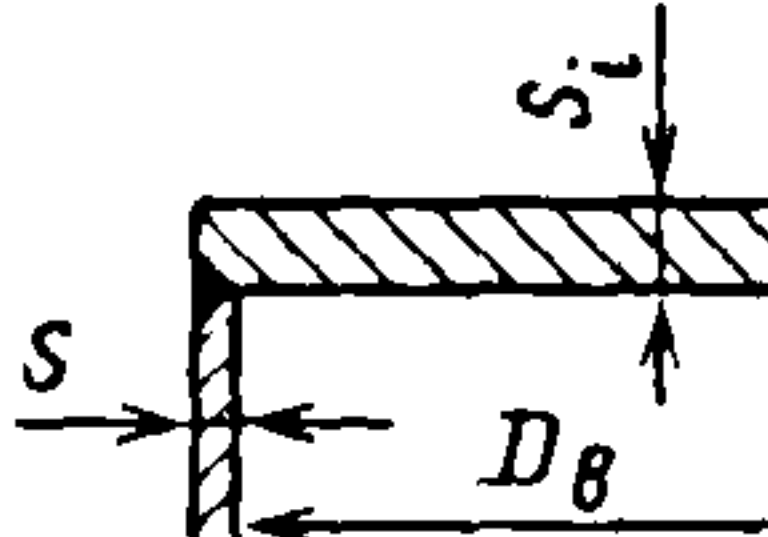
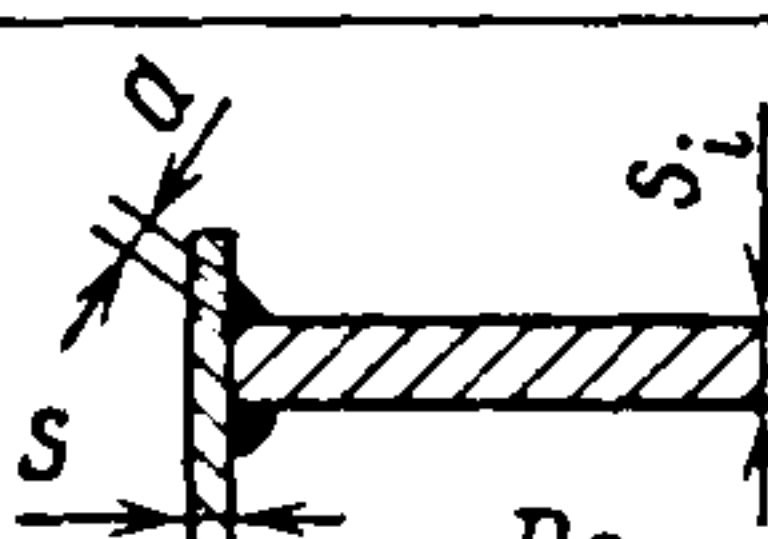
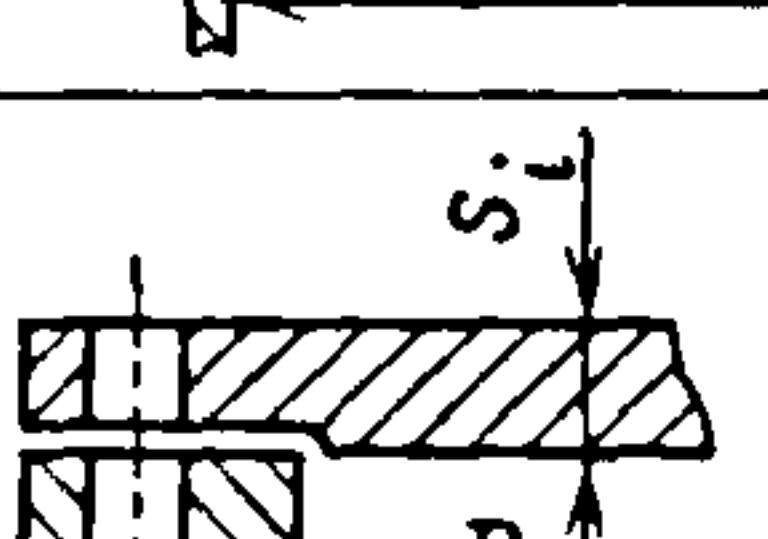
Формула для  $D_E$  применима при  $\alpha \leq 75^\circ$ .

Расчет на прочность днищ и крышек заключается в определении допускаемой толщины  $s$ ; плоских круглых днищ и крышек вакуумных камер по формуле

$$s_i = K K_o D_b \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} + c,$$

где  $K$  — коэффициент конструкции плоских круглых днищ и крышек (принимают по табл. 6.8);  $K_o$  — коэффициент ослабления плоских днищ и крышек отверстиями;  $D_b$  — внутренний диаметр днища (крышки), м;  $p$  — расчетное давление, Па.

### 6.8. Характеристики плоских круглых днищ и крышек

Вариант конструкции	Соотношения размеров	$K$
	$a \geq 0,8s$ ; $D_b = D$	0,50
	$D_b = D$	0,41
		0,45
	$a \geq 0,856s$ ; $D_b = D$	0,50
	$D_b = D_0$	0,40

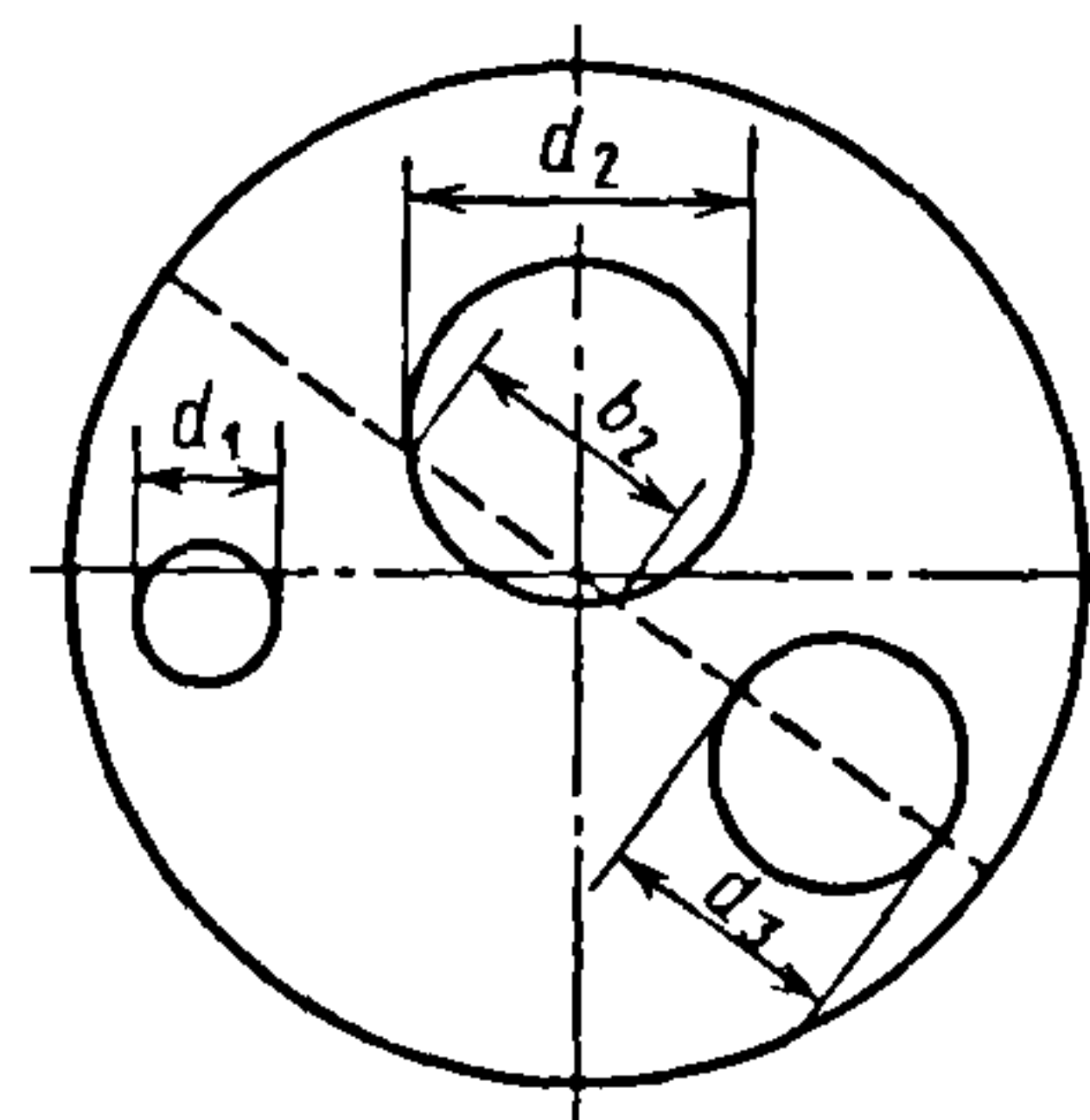


Рис. 6.12. Схема к определению максимальной суммы диаметров или длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении



Для днищ и крышек с отверстиями

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \sum \left( \frac{d_i}{D_0} \right)^3}{1 - \sum \frac{d_i}{D_0}}},$$

где  $\sum d_i$  (или  $b_i$  – рис. 6.12) – максимальная сумма диаметров или длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметрально сечении, м.

Для днищ и крышек без отверстий коэффициент ослабления  $K_0 = 1$ . Во всех случаях присоединения днища к обечайке минимальная толщина  $s_i$  плоского круглого днища должна быть больше или равна толщине  $s$  обечайки.

Эллиптические, сферические, полусферические и конические днища и крышки рассчитывают по аналогии с обечайками. Во всех случаях толщина днища должна быть не менее толщины обечайки. Плоские прямоугольные днища и крышки рассчитывают как плоские прямоугольные стенки коробчатых обечаек.

## Глава 7

### ЗАПОРНО-РЕГУЛИРУЮЩАЯ АРМАТУРА

---

#### 7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Запорно-регулирующая арматура представляет собой совокупность функциональных элементов вакуумных систем, предназначенных для полного или частичного перекрытия газовых потоков, стабилизации рабочих давлений в вакуумных объемах, аварийной защиты вакуумных систем при разгерметизации, коммутации трубопроводов в случаях последовательной откачки вакуумных камер, дозированного напуска газовых потоков и т.д.

Основными компонентами запорно-регулирующей арматуры являются клапаны, затворы, натекатели и газонапускные устройства, отличающиеся друг от друга рядом признаков конструктивного и эксплуатационного характера. Классификация запорно-регулирующей арматуры представлена на рис. 7.1.

Вакуумную запорную арматуру по диаметру условного прохода  $D_y$ , мм, подразделяют на клапаны ( $D_y$  1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100) и затворы ( $D_y$  100; 160; 250; 400; 630).

По конструктивному исполнению различают арматуру с присоединительными фланцами и патрубками, расположенными либо напротив друг друга, либо под углом (обычно  $90^\circ$ ). В проходных клапанах и затворах направление газового потока не меняется, а в угловых меняется.

По типу привода клапаны и затворы бывают с механическим (с ручным), электропневматическим, электромагнитным, электромеханическим и редко с электрогидравлическим приводом.

По способу ввода движения в вакуум арматура разделяется на герметизируемую либо с помощью сальников, либо посредством сильфонов.

По вакуумному диапазону различают арматуру низковакуумную (форвакуумную) – с давлением  $10^5 \dots 10^{-1}$  Па; высоковакуумную, давление которой  $10^5 \dots 10^{-5}$  Па; сверхвысоковакуумную – давление  $10^5 \dots 10^{-10}$  Па.

По типу применяемых уплотнителей арматура бывает с эластомерными уплотнителями, включая резиновые термостойкие, прогреваемые до  $150 \dots 300^\circ\text{C}$ ; с металлическими уплотнителями, прогреваемыми до  $400^\circ\text{C}$ .

Способ охлаждения зоны герметизации заслонки бывает естественный или с использованием циркулирующей воды.

По способу изготовления корпусов арматуру делят на литую (как правило, из алюминиевых сплавов, чаще АК7), сварную (в основном из коррозионно-стойкой стали) или паяную (медным припоем, когда детали корпуса стальные).

В непрогреваемой арматуре при давлении  $10^5 \dots 10^{-5}$  Па обычно используются уплотнители из непрогреваемой резины 9024 («черная» бензостойкая) либо 7889 («серая»).



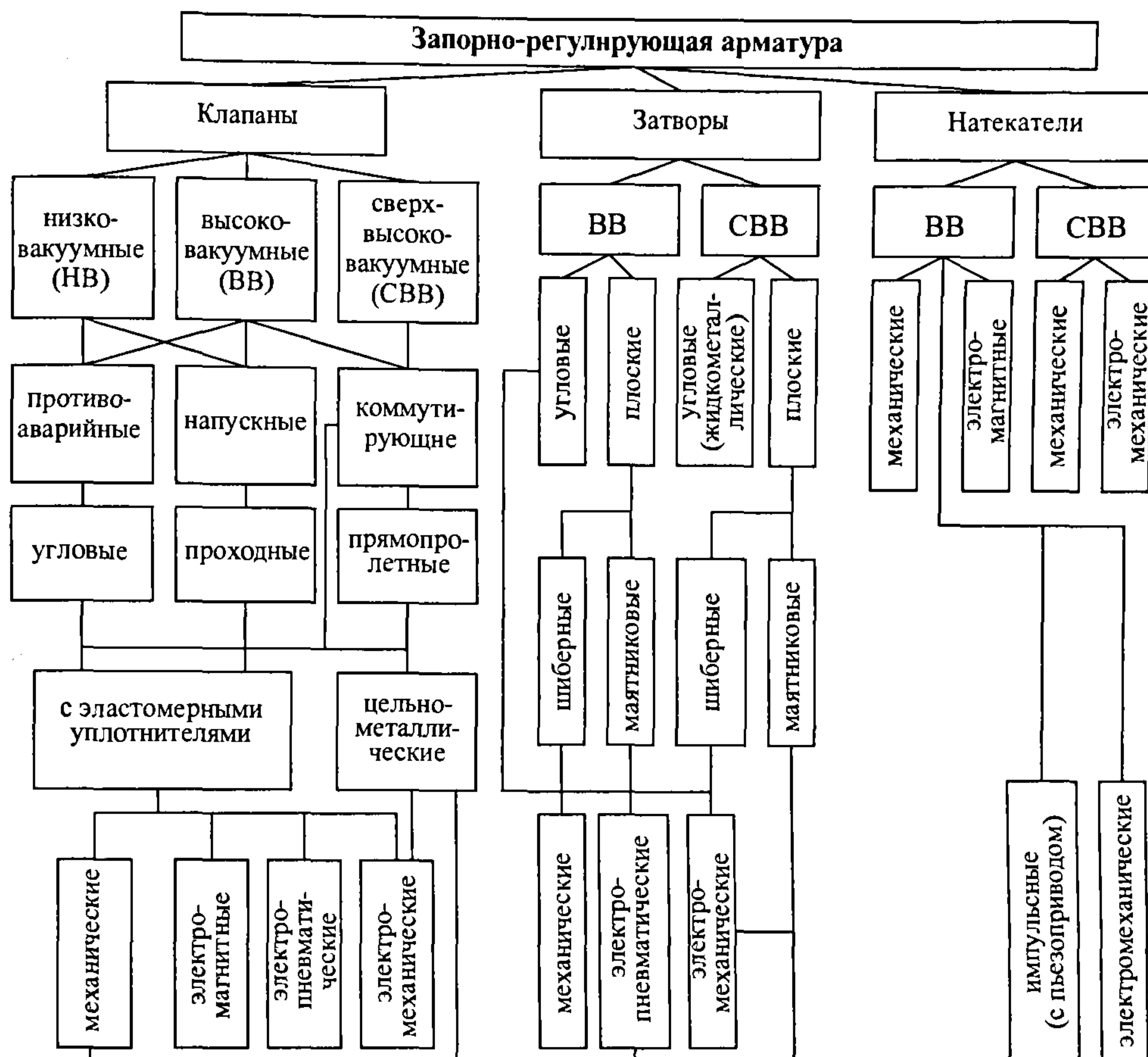


Рис. 7.1. Классификация запорно-регулирующей арматуры

В прогреваемой арматуре при давлении  $10^5 \dots 10^8$  Па применяют либо уплотнители из термостойкой резины марок 51-1539, ИРП-1345, 51-1735 (прогрев до  $150^\circ\text{C}$ ), либо ТКр (прогрев до  $300^\circ\text{C}$ ), либо металлические уплотнители из меди М06, М1 (прогрев до  $400^\circ\text{C}$ ).

В случае использования сильфонных вводов движения и металлических медных уплотнителей арматура называется *цельнометаллической* и, как правило, прогревается до  $400^\circ\text{C}$  с целью максимального снижения газовыделения. Она применяется в оборудовании, работающем при давлении до  $10^{-10}$  Па в зависимости от средств откачки.

Давление герметизации с использованием резиновых уплотнителей составляет  $1 \dots 2$  МПа, а для металлических пар (медь – коррозионно-стойкая сталь) –  $15 \dots 30$  МПа.

Ведущие зарубежные фирмы в области создания и выпуска вакуумной арматуры: VAT (Швейцария), Varian (США), Leybold (Германия), Balzers (Лихтенштейн) и др. – в качестве материала уплотнителей используют либо термостойкую резину типа витон, прогреваемую до  $150^\circ\text{C}$ , либо металлические уплотнители из меди OFHC (прогрев до  $400^\circ\text{C}$ ).

Основными эксплуатационными характеристиками клапанов и затворов являются:

- степень герметичности  $q$ , определяемая потоком допустимого натекания газа через корпус и уплотнительную пару, ввод движения в вакуум и составляющая величину, зависящую от эксплуатационных требований;

- уровень удельных величин газопроницаемости и газовыделения, не превышающий значений  $10^{-5} \dots 10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>) (в зависимости от типа клапана или затвора);

- вакуумная проводимость в открытом положении  $U$ , м<sup>3</sup>/с, т.е. отношение потока газа  $Q$ , проходящего через полость клапана (затвора), к разности давлений  $p_1 - p_2$  в его входном и выходном отверстиях;

- быстродействие, определяемое временем герметичного перекрытия или открытия;

- ресурс, т.е. число циклов перекрытия газового потока через уплотнительную пару с обеспечением заданной степени герметичности.

К запорной и регулирующей вакуумной арматуре предъявляют ряд технических требований. Основные из них:

- высокая герметичность, т.е. допустимые потоки натекания через узлы герметизации тарели (заслонки), ввода движения в вакуум, корпуса не должны превышать  $10^{-7} \dots 10^{-11}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> (по гелию);

- максимально возможная вакуумная проводимость;

- высокая надежность (средний ресурс  $\geq 5 \cdot 10^5$  циклов «открыто-закрыто», средняя наработка на отказ  $\geq 5 \cdot 10^4$  циклов);

- возможность прогрева с целью обезгаживания до 150...450 °С;

- наименьшие масса и габаритные размеры;

- минимальные энергетические показатели;

- соответствие конструкции международным стандартам ISO;

- возможность использования в автоматизированных системах;

- возможность применения отдельных видов арматуры в вакуумно-технологическом оборудовании с агрессивными газами.

Одно из важных требований, предъявляемых к вакуумной запорной аппаратуре, – минимальный поток газовыделения.

Газовый поток  $Q_{\Sigma}$ , выделяющийся из основных элементов клапана, можно представить в виде суммы потоков:

$$Q_{\Sigma} = Q_n + Q_r + Q_p + Q_m,$$

где  $Q_n$  – поток, натекающий через механический вакуумный ввод, разъемные и неразъемные вакуумные соединения;  $Q_p$  – поток, формирующийся проницаемостью через стенки и уплотнения клапана;  $Q_r$  – поток, создаваемый газовыделением с поверхностей клапана, обращенных в вакуум;  $Q_m$  – молекулярный газовый поток из диффузионно-щелевых каналов, образующихся при сборке клапана.

Для уменьшения суммарного газового потока следует применять соответствующие конструктивные средства, снижающие потоки  $Q_n$  и  $Q_m$ , а также рационально выбирать конструкционные материалы с целью уменьшения потоков  $Q_r$  и  $Q_p$ .

Запорную арматуру непрогреваемых вакуумных систем изготавливают из алюминиевого сплава АК7, стали 20 с защитными металлическими покрытиями. В качестве уплотнительных элементов в этом случае чаще всего применяют вакуумную резину. Прогреваемую аппаратуру изготавливают из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Для герметизации клапанов используют металлические или полимерные (например, фторопласт-4) уплотнения с малым газовыделением.

Высокие требования, предъявляемые к сверхвысоковакуумным клапанным соединениям, объясняются необходимостью их многократного срабатывания, в том числе при прогревах в закрытом положении. При этом сила герметизации должна быть минимальной, так как от нее зависят конструкция и мощность привода, а также габаритные размеры и масса клапана. Такие факторы, влияющие на силу гермети-



зации, как прочностные свойства материалов, площадь и состояние контактируемых поверхностей, а также вид соединения, взаимосвязаны и должны быть учтены наиболее рационально.

Распределение силы герметизации по контуру стыка должно быть равномерным при каждом цикле срабатывания клапана. Неравномерность распределения сил приводит к перенапряжению уплотнителя в одних местах и недостаточной нагрузке в других, что обуславливает появление течей.

В связи с этим необходимо обеспечивать центральное, перпендикулярное к плоскости разъема, воздействие силы на уплотнительные элементы и не допускать появления сил, вызывающих их смещение один относительно другого.

Для компенсации погрешностей изготовления и сборки, а также различных микросмещений, возникающих при эксплуатации клапанов, предусматривают возможность самоустановки элементов уплотнительной пары. На надежность герметизации значительно влияют отклонения формы и расположения поверхностей уплотнительных пар (например, отклонение от плоскостности), к которым предъявляются требования минимальности. В противном случае один из элементов уплотнительной пары упруго деформируется.

Элементы уплотнительных пар должны быть точно центрированы один относительно другого, так как многократное воспроизведение герметичности при постоянной силе герметизации возможно при контактировании одних и тех же участков поверхности от цикла к циклу.

Необходимое условие длительной работы уплотнительных пар — постоянство силы герметизации; поэтому клапаны снабжают устройствами и элементами для автоматической компенсации термических и механических деформаций, возникающих при эксплуатации и отрицательно влияющих на стабильность силы герметизации.

Материалы элементов уплотнительных пар должны быть строго согласованы

по физико-химическим свойствам, так как важным эксплуатационным фактором является прогрев клапанов в закрытом положении (значения коэффициентов температурного расширения материалов уплотнительных пар должны быть равны или близки). Кроме того, для одинакового распределения теплоты седло и клапан или уплотнительный диск необходимо согласовывать по габаритным размерам и массе. При прогреве клапанов в закрытом положении уплотнительные элементы пар не должны схватываться.

При конструировании клапанов следует предусматривать простую замену заслонки или уплотнительного диска и восстановление седла. С этой целью конструкции клапанов необходимо снабжать элементами, обеспечивающими соосность заслонки и седла. В некоторых случаях для повышения ремонтпригодности и ресурса целесообразно использовать сменные элементы седла.

Основные технические характеристики клапанов и затворов следующие:

- диаметр условного прохода;
- диапазон рабочего давления;
- вакуумная проводимость в открытом положении;
- допустимый поток натекания через узел герметизации;
- время срабатывания (время полного открытия или закрытия);
- показатели надежности: средняя наработка на отказ и средний ресурс, выражающиеся в числе циклов полных открытий и закрытий;
- температура прогрева;
- потребляемая электроэнергия или необходимое давление в пневмосистеме;
- рабочее положение;
- массогабаритные параметры.

При конструировании клапанов и затворов обязательно учитываются необходимые силы для герметизации уплотнительного узла на седле, на преодоление трения в узлах и воздействия атмосферного давления на уплотнительный узел и на сильфон (если имеется).

## 7.2. СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ КЛАПАНЫ

Цельнометаллические клапаны с механическим (ручным) приводом типа КРУТ ( $D_y = 6,3; 10; 16; 25; 40; 63$  мм) предназначены для комплектования сверхвысоковакуумного оборудования, работающего при давлении  $10^5 \dots 10^{-10}$  Па.

Внешний вид клапанов КРУТ-6,3 и КРУТ-10 показан на рис. 7.2, а и б соответственно. Главная их особенность – то, что они являются прогреваемыми в закрытом положении до температуры  $300^\circ\text{C}$ . Присоединительные размеры фланцев соответствуют ГОСТ 26526–85 и стандарту ISO-3669–1986, за основу которого взяты соединения типа «Conflat».

Основной конструкционный материал – коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T, материал уплотнителя – медь М06, М1. Технические характеристики клапанов приведены в табл. 7.1.

На рис. 7.3 представлены сверхвысоковакуумные клапаны одной из ведущих зарубежных фирм – фирмы VAT: серия 57 с  $D_y 16, 40, 63, 100, 160$  мм. Рабочий диапазон давления  $5 \cdot 10^5 \dots 10^{-10}$  Па. Клапаны прогреваются в открытом состоянии до температуры  $450$  и до  $350^\circ\text{C}$  – в закрытом состоянии. Допустимый поток натекания  $\leq 1 \cdot 10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Количество циклов до первого обслуживания 10 000. Материал корпусов – коррозионно-стойкая сталь, уплотнителей – медь. Фланцевые соединения «Conflat».

### 7.1. Технические характеристики клапанов КРУТ

Характеристика	КРУТ-6,3	КРУТ-10	КРУТ-16	КРУТ-25	КРУТ-40	КРУТ-63
Диаметр условного прохода, мм	6,3	10	16	25	40	63
Проводимость, дм <sup>3</sup> /с	2,5	6,3	10	16		100
Габаритные размеры, мм:						
длина	70	70	70	85	115	145
ширина	60	60	80	65	90	115
высота	100	120	150	215	235	255
Масса, кг	0,85	1,0	2,0	5,6	7,0	10,0

Примечания. 1. Рабочее давление  $10^5 \dots 10^{-10}$  Па.

2. Допустимый поток натекания  $5 \cdot 10^{-11}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>.

3. Нарботка на отказ (с прогревом в закрытом состоянии при  $300^\circ\text{C}$ ) – 150 циклов.

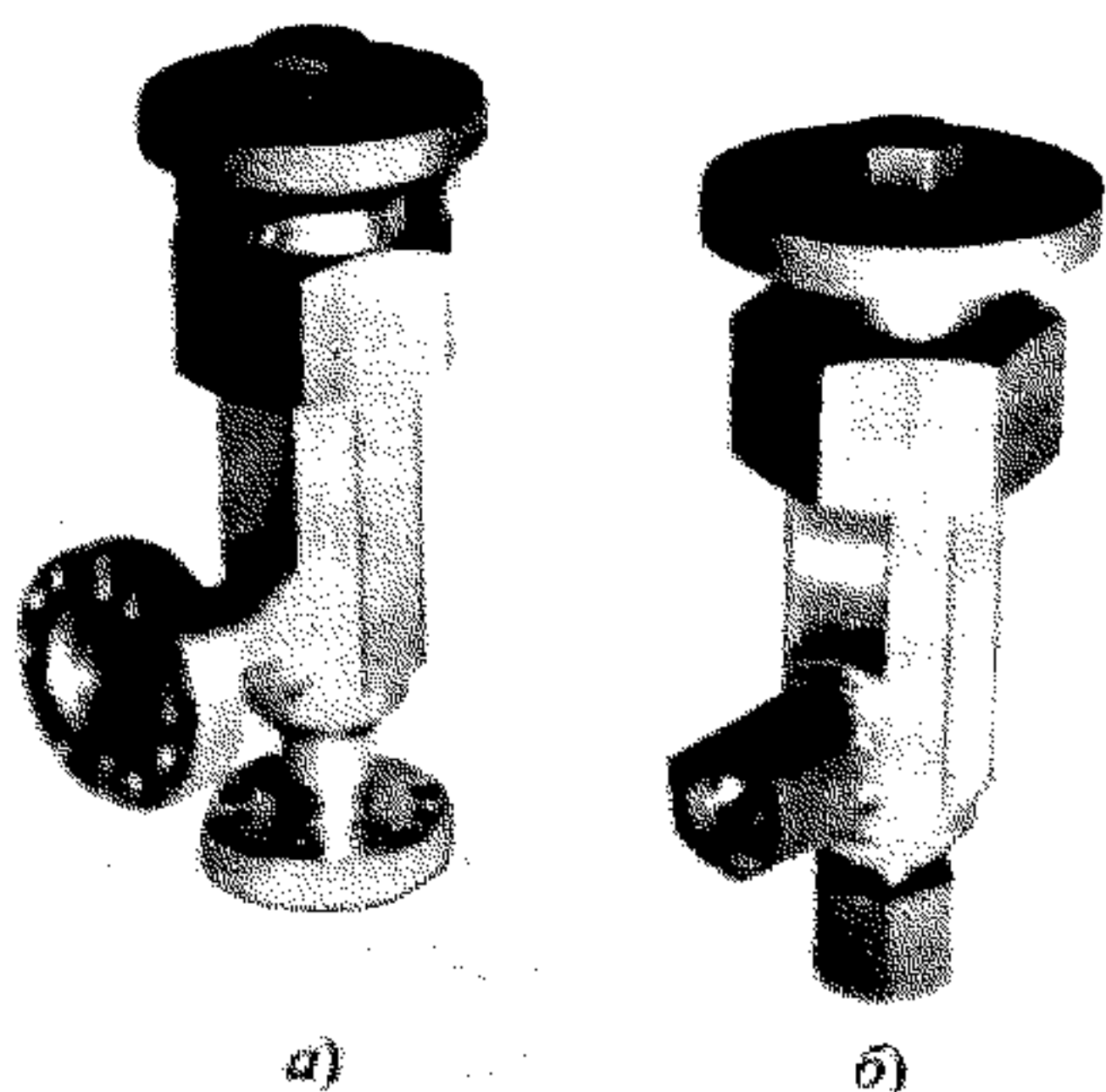


Рис. 7.2. Цельнометаллические клапаны угловые КРУТ

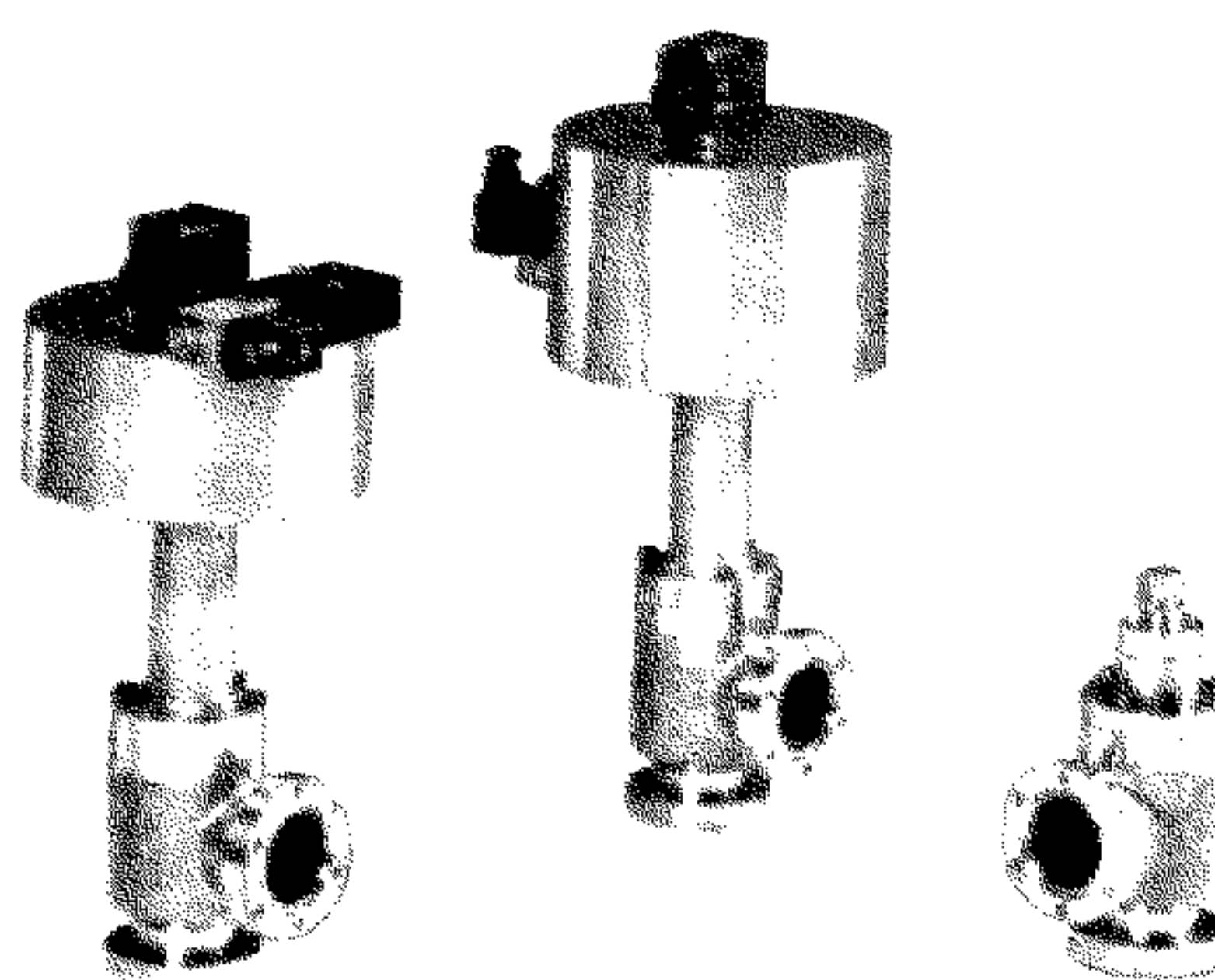


Рис. 7.3. Сверхвысоковакуумные цельнометаллические клапаны с ручным и электропневматическим приводом фирмы VAT (Швейцария)



### 7.3. ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ И ФОРВАКУУМНЫЕ КЛАПАНЫ

В составе высоковакуумного оборудования, прогреваемого с целью обезгаживания до температуры 250 °С, используются клапаны КПУТ (клапаны пневма-

тические угловые термостойкие) с электропневматическими приводами с  $D_y$  40, 63, 100 мм.

На рис. 7.4 а показан внешний вид прогреваемых клапанов КПУТ-40, КПУТ-63, КПУТ-100 с электропневматическим приводами, а на рис. 7.4, б – их конструкция.

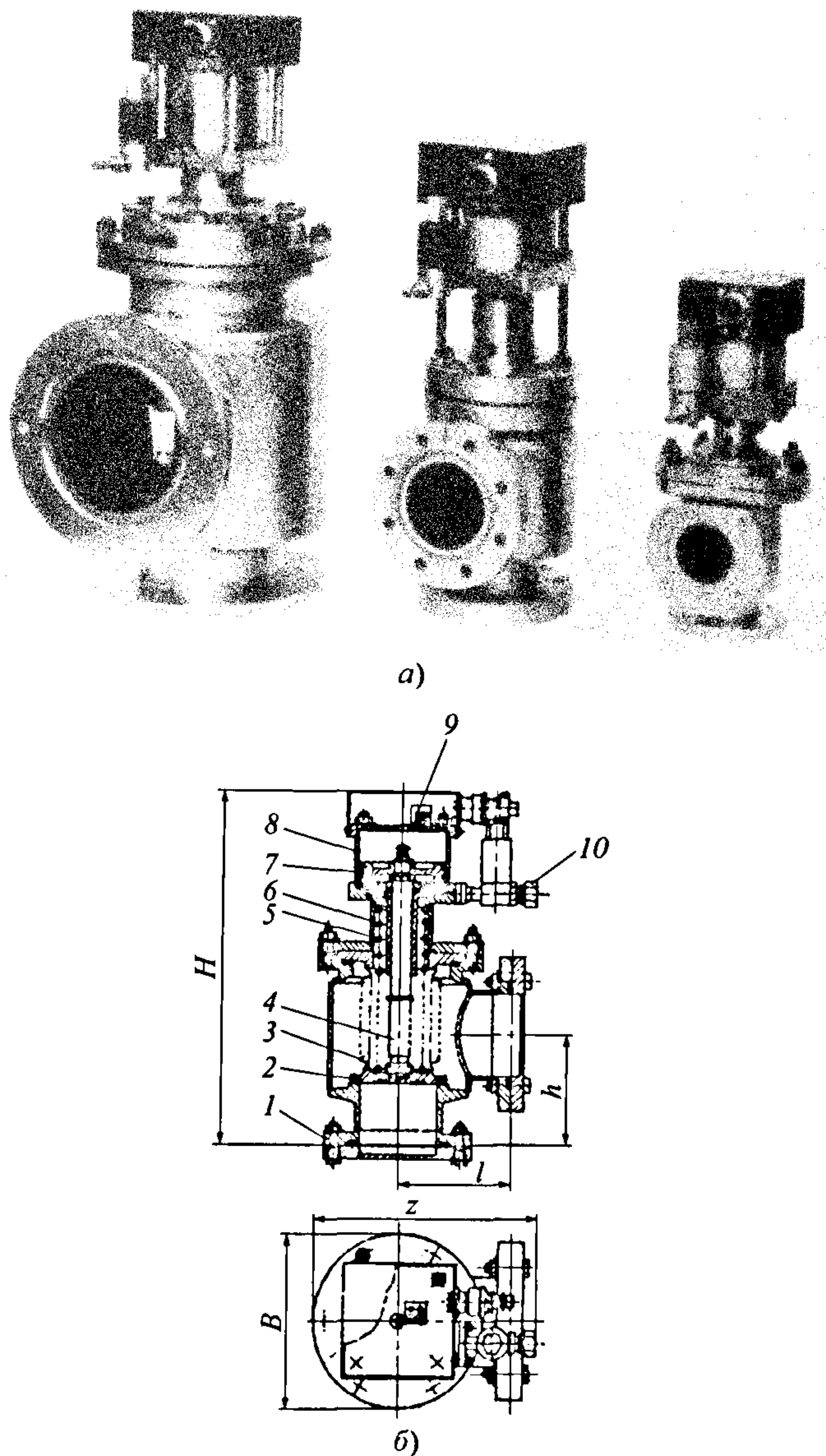


Рис. 7.4. Высоковакуумные угловые клапаны с электропневматическим приводом КПУТ ( $D_y$  10, 63, 100 мм), прогреваемые до температуры 300 °С



С целью предохранения механизма привода от воздействия температуры прогрева привод удален от корпуса 1 (рис. 7.4, б), а наружная втулка 6 соединительного устройства имеет отверстия для естественного охлаждения.

Ввод движения сильфонный. Между сильфоном 3 и штоком 4, перемещающим уплотнительный узел 2 в открытое или закрытое положение, расположена пружина 5, обеспечивающая герметизацию клапана при его закрытии.

Шток клапана приводится в движение поршнем 7 пневмоцилиндра 8; подача сжатого воздуха под давлением 0,4...0,6 МПа осуществляется через электромагнитный клапан 10; сигнализация и управление — через микропереключатель 9.

Основной конструкционный материал — коррозионно-стойкая сталь. В качестве

материала уплотнителей используется термостойкая вакуумная резина ТК<sub>р</sub>, допускающая нагрев до 300 °С. Клапаны химически стойкие к фтор- и хлорсодержащим газам.

Конструкция клапана КПУТ-100 отличается тем, что тарель при открывании клапана поворачивается на угол 35° для увеличения проводимости. Кроме того, проводимость повышается за счет увеличения подъема тарели, для чего шток клапана герметизируется двумя сильфонами, один из которых установлен внутри другого.

Технические характеристики клапанов КПУТ приведены в табл. 7.2.

На рис. 7.5 показаны высоковакуумные клапаны с электропневматическими приводами фирмы VAT серий 620 и 621.  $D_y$  25, 40, 50 мм. Рабочий диапазон давления  $2 \cdot 10^5 \dots 10^{-8}$  Па. Допустимый поток натекания через уплотнительную пару тарель-седло в закрытом состоянии  $1 \cdot 10^{-8}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Материал корпусов — алюминиевый сплав или коррозионно-стойкая сталь, уплотнителей — витон. Присоединение к вакуумным системам выполняется фланцами с хомутами. Температура прогрева до 150 °С.

Клапаны КВУМ-Л с электромагнитным приводом, внешний вид которых приведен на рис. 7.6, также предназначены для комплектования непрогреваемого оборудования, работающего при давлении  $10^5 \dots 10^{-5}$  Па.

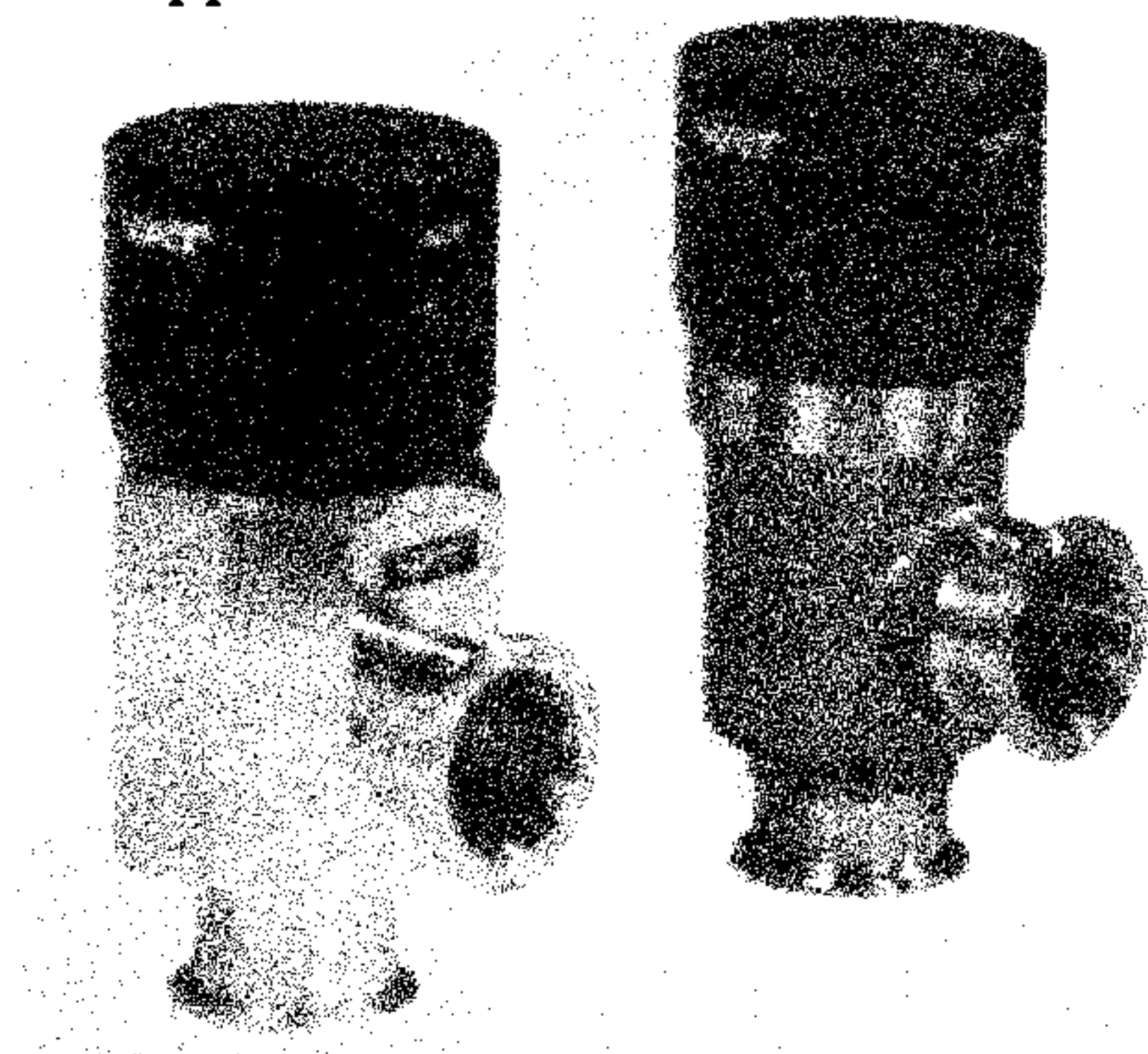


Рис. 7.5. Клапаны серии 620 и 621 фирмы VAT (с электропневматическим приводом)

## 7.2. Технические характеристики клапанов КПУТ

Характеристика	КПУТ-40	КПУТ-63	КПУТ-100
Диаметр условного прохода, мм	40	63	100
Проводимость, дм <sup>3</sup> /с	40,5	97	302
Время срабатывания, с	0,3	0,4	0,6
Габаритные размеры, мм	140×90×270	175×134×290	200×170×100
Масса, кг	5,2	8,2	9,5

Примечания. 1. Рабочее давление  $10^5 \dots 10^{-6}$  Па.

2. Допустимый поток натекания  $6 \cdot 10^{-11}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>.

3. Средняя наработка на отказ  $2 \cdot 10^4$  циклов, средний ресурс  $1,2 \cdot 10^5$  циклов.

4. Температура нагрева 300 °С.



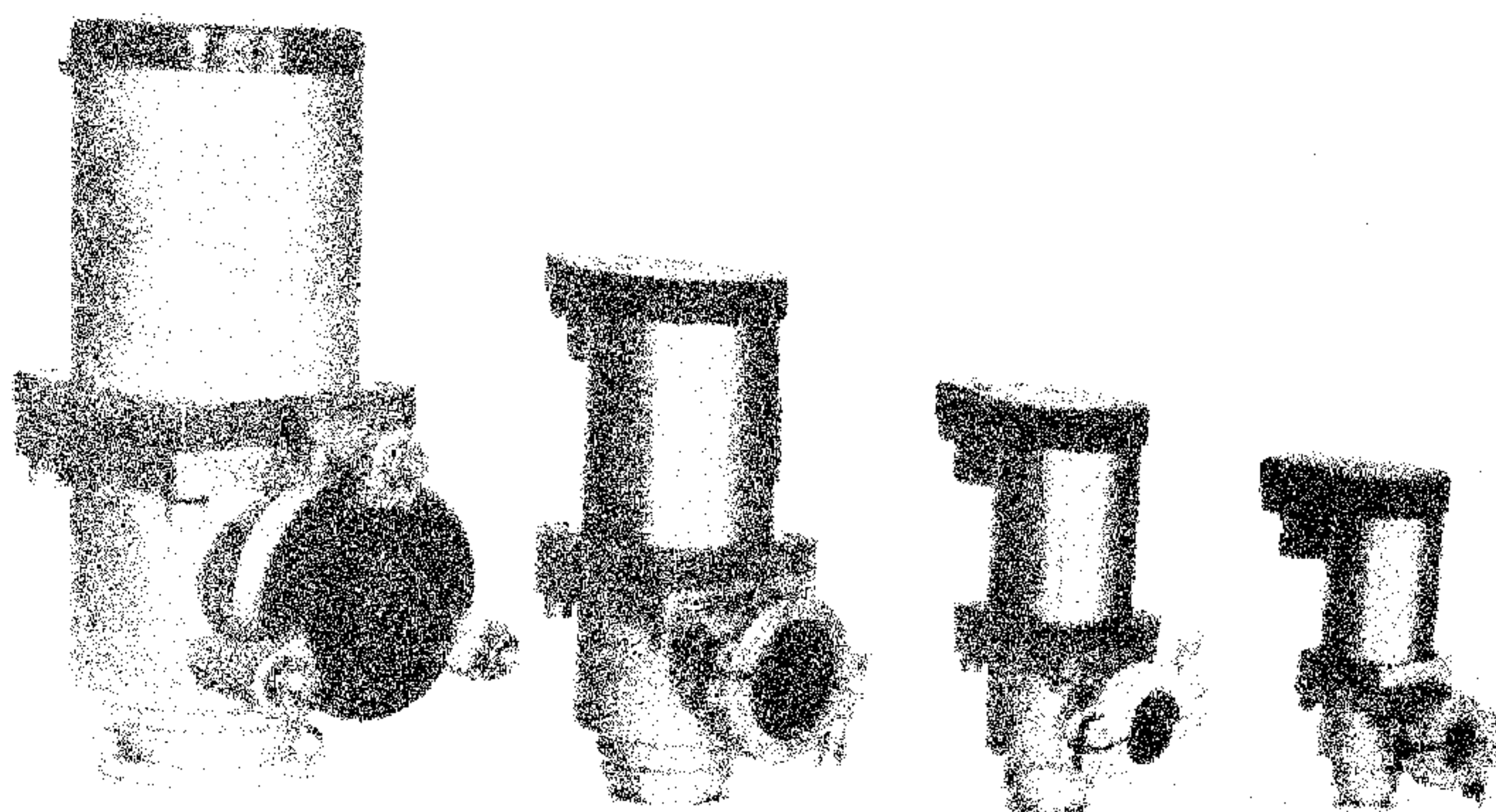


Рис. 7.6. Угловые клапаны КВУМ-Л с электромагнитным приводом ( $D$ , 16, 25, 40, 63 мм) с быстроразъемными фланцевыми соединениями типа «Хомут»

Особенность клапанов — высокое быстродействие. Корпуса клапанов — литые из алюминиевого сплава АК7. Метод литья — в кокиль расплавленного в вакуумной камере алюминиевого сплава. Предварительно алюминиевый сплав расплавляется в вакуумной камере.

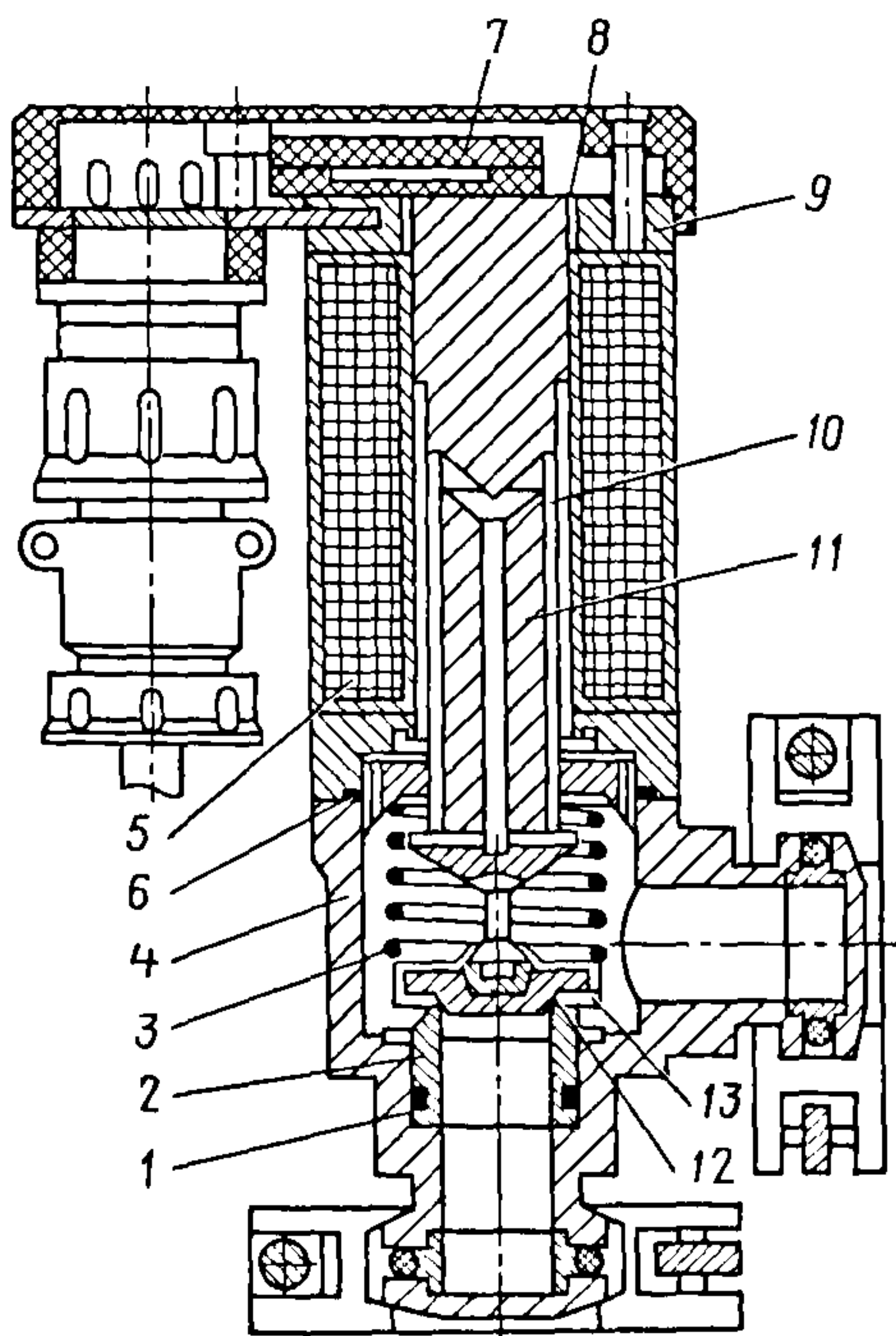


Рис. 7.7. Устройство клапана КВУМ-Л

Нормально-закрытый клапан КВУМ-Л (рис 7.7) состоит из корпуса 4, соединенного через уплотнительную прокладку 6 с корпусом 10 электромагнита 5. На якоре 11 электромагнита закреплены уплотнительный узел 13 и уплотнитель 12. Между торцами корпуса, электромагнита и узлом 13 размещена возвратная пружина 3. В корпусе 4 установлено седло 2, герметично уплотненное прокладкой 1. Для контроля положения клапана в электромагните предусмотрен магнитоуправляемый контакт 7.

Для открытия клапана на катушку электромагнита 9 подается импульс пускового напряжения и якорь 8 с уплотнительным узлом 13 поднимается, сжимая пружину 3. Затем пусковое напряжение автоматически снижается до значения, достаточного для удержания якоря в открытом положении клапана. Закрытие происходит при отключении электромагнита. При этом пружина 3 прижимает якорь с диском к седлу 2 с силой, необходимой для герметизации. Технические характеристики клапанов типа КВУМ-Л приведены в табл. 7.3.

Клапаны КВУМ-Л комплектуют отдельными специальными блоками питания и управления БП-1 и БП-2. Имеется модификация этих клапанов со встроенными блоками питания.



## 7.3. Технические характеристики клапанов КВУМ-Л

Характеристика	КВУМ-16	КВУМ-25	КВУМ-40	КВУМ-63
Диаметр условного прохода, мм	16	25	40	63
Проводимость, $\text{дм}^3/\text{с}$	10	16	64	160
Время срабатывания, с	0,1		0,12	
Сила тока в электромагните, А:				
при пуске	4,0	5,3	6,8	9,5
при удержании	0,3	0,4	0,5	0,7
Число включений в минуту	17	15	10	
Средняя наработка на отказ, число циклов	$3 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^3$
Ресурс, число циклов	$3 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^4$
Габаритные размеры, мм	$105 \times 55 \times 160$	$125 \times 70 \times 190$	$145 \times 90 \times 230$	$185 \times 120 \times 310$
Масса, кг	1,2	2,4	5,0	13,0

Примечания. 1. Допустимый поток натекания  $10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

2. Материал уплотнителя – резина 9024.

Широкое распространение, особенно в зарубежном оборудовании, получили угловые клапаны с электропневматическим приводом. Они просты по конструкции, отличаются малыми габаритными размерами и надежны в эксплуатации. Для работы клапанов необходимо наличие пневмосети или компрессора, обеспечивающих подачу сжатого воздуха под давлением 0,4...0,6 МПа.

На рис. 7.8 показаны электропневматические клапаны КПУ-Л (клапаны пневматические угловые). Клапаны КПУ-25Л, КПУ-40Л, КПУ-63Л предназначены для комплектования непрогрываемого вакуумного оборудования, работающего при давлении  $10^5 \dots 10^{-5}$  Па. Корпуса клапанов, литые из алюминиевого сплава АК7, по конструкции аналогичны корпусам клапанов КВУМ. Материал уплотнителей – резина 7889.

На рис. 7.9 представлена конструкция клапана КПУ-Л.

При подаче напряжения на золотниковое устройство 9 в пневмоцилиндр клапана 3 поступает сжатый воздух, который,

воздействуя на поршень 2, поднимает диск 7 с уплотняющей резиновой прокладкой 8. В крайнем положении штока 4, герметично уплотненного сильфоном 6, конечный выключатель 1 сигнализирует об открытии клапана. Для закрытия последнего отключается электропитание золотникового устройства и шток 4 с диском 7 под воздействием пружины 5 с помощью поршня 2 вытесняет воздух и одновременно опускается на седло, герметично уплотняя его.

В табл. 7.4 приведены технические характеристики клапанов КПУ-Л.

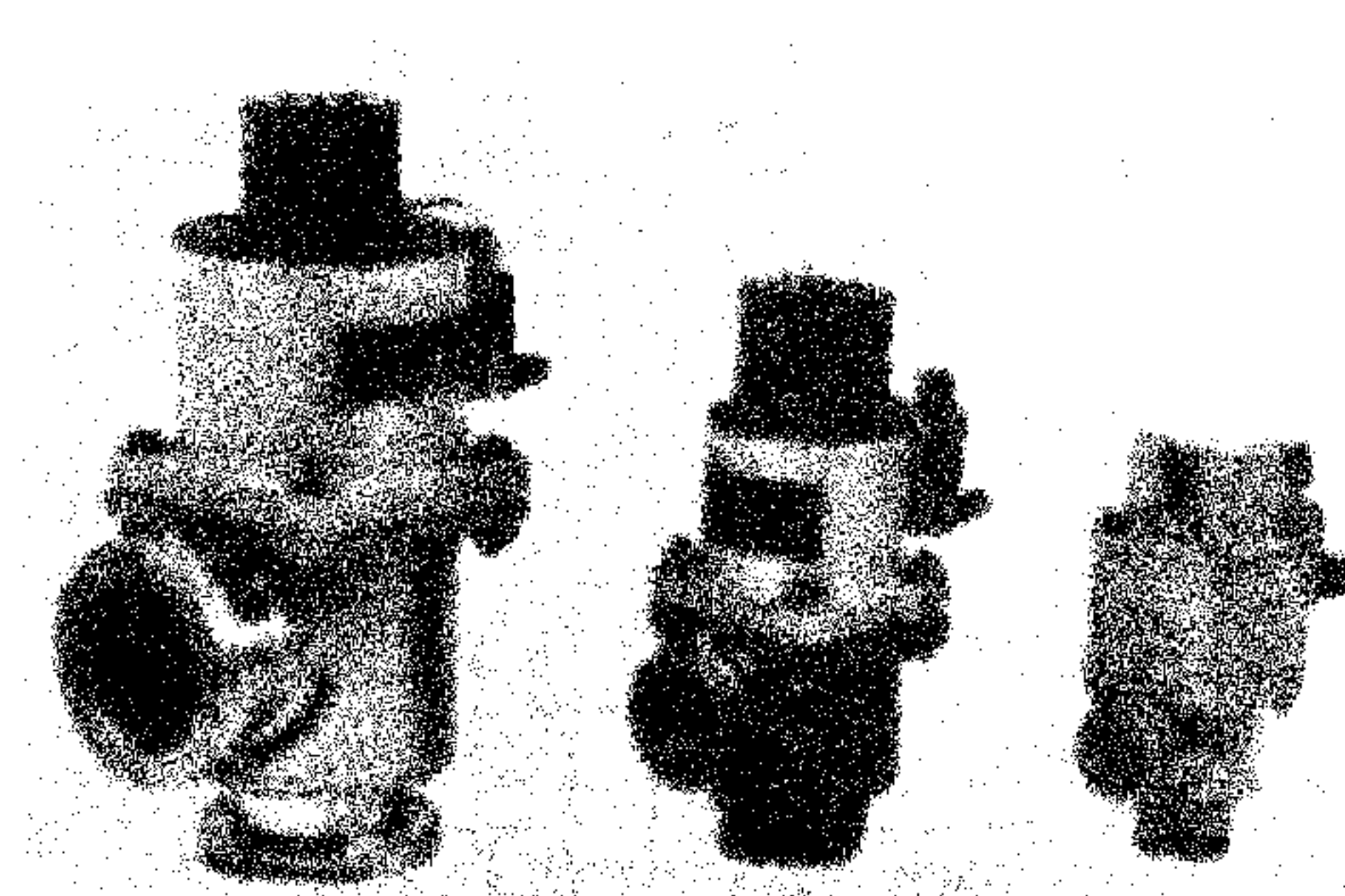


Рис. 7.8. Клапаны угловые КПУ с электропневматическим приводом ( $D_y$  25, 40, 63 мм)



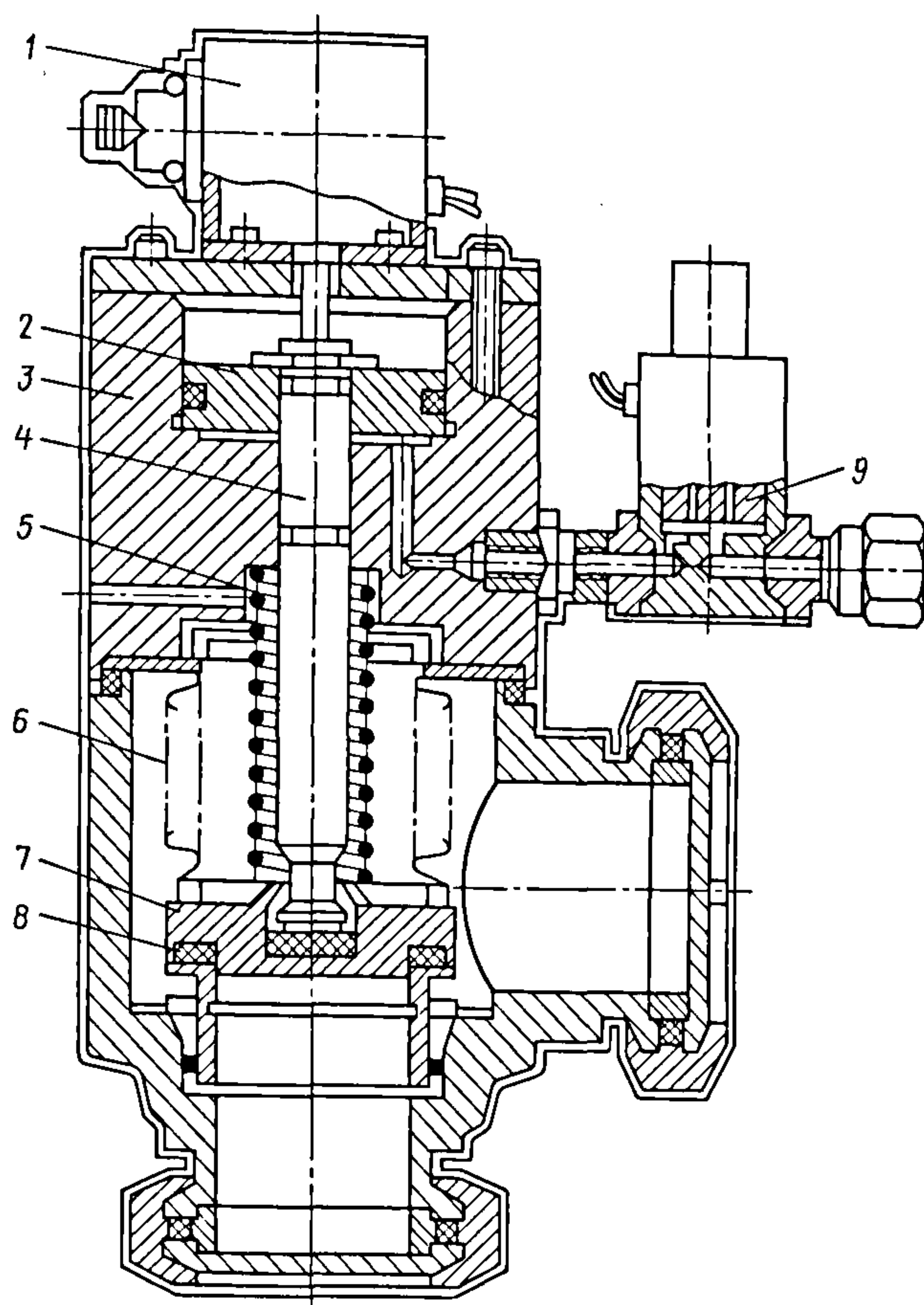


Рис. 7.9. Устройство клапана КПУ-Л

#### 7.4. Технические характеристики клапанов КПУ-Л

Характеристика	КПУ-25Л	КПУ-40Л	КПУ-63Л
Диаметр условного прохода, мм	25	40	63
Проводимость, $\text{дм}^3/\text{с}$	16	30	45
Время срабатывания, с	0,2	0,3	0,5
Габаритные размеры, мм	170×75×210	195×90×260	245×135×355
Масса, кг	2,2	3,6	7,6

Примечания. 1. Допустимый поток натекания  $5 \cdot 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

2. Потребляемая мощность 7,2 Вт.

3. Средняя наработка на отказ  $10^4$  циклов, средний ресурс  $10^5$  циклов.

4. Напряжение питания золотника 24 В.

В отечественной практике в отличие от зарубежной широко распространена запорная арматура с электромеханическим приводом.

Вакуумные клапаны с электромеханическим приводом типа КВЭ (рис. 7.10 и 7.11, табл. 7.5 и 7.6) предназначены для

герметичного перекрытия вакуумных систем в диапазоне давлений  $1 \cdot 10^{-5} \dots 1,07 \cdot 10^5$  Па ( $7,5 \cdot 10^{-8} \dots 800$  мм рт.ст.) на трубопроводах для воздуха и неагрессивных газов. Применяются они в электронной, электротехнической, химической и других отраслях промышленности.

### 7.5. Технические характеристики клапанов КВЭ

Характеристика	КВЭ-25	КВЭ-63	КВЭ-100
Проводимость (теоретическая) в молекулярном режиме, л/с, не менее	14,2	180	470
Наибольшая величина натекания, Па·л/с (л·ммкм рт.ст./с), не более	$1 \cdot 10^{-10}$ ( $7,5 \cdot 10^{-7}$ )		
Диапазон давлений, Па (мм рт.ст.)	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1,07 \cdot 10^5$ ( $7,5 \cdot 10^{-8} \dots 800$ )		
Время открытия (закрытия), с, не более	0,3	0,5	0,8
Масса, кг, не более	3,2	5,2	10
Средний ресурс до капитального ремонта, число циклов, не менее	60 000		
Средний срок службы до капитального ремонта, число лет, не менее	8		
Перепад давления в закрытом положении с любой стороны клапана, Па (мм рт.ст.), не более	$1,07 \cdot 10^5$ (800)		
Мощность электродвигателя, Вт	25		60
Напряжение питания, В	380		

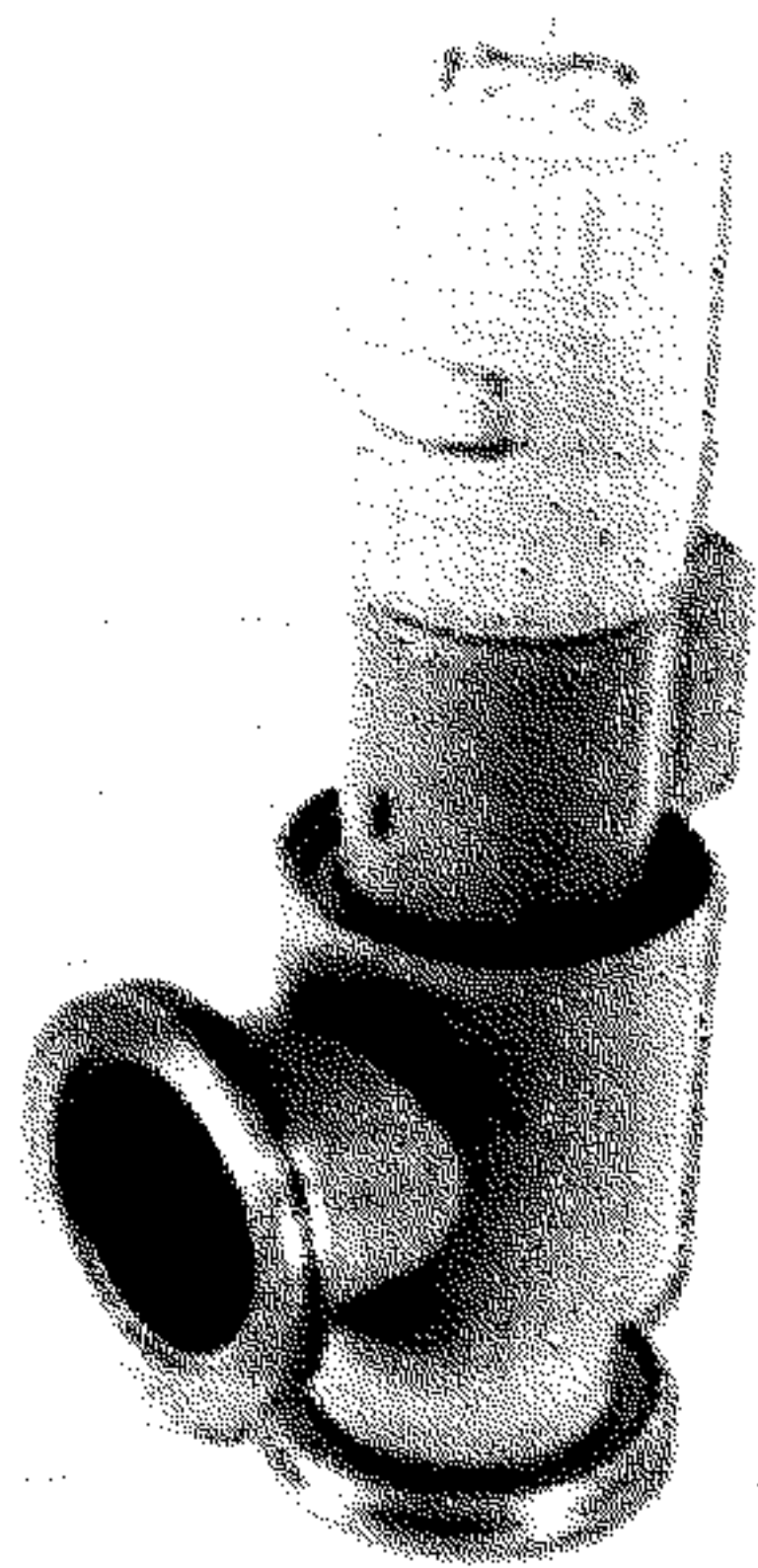


Рис. 7.10. Вакуумный клапан с электромеханическим приводом типа КВЭ

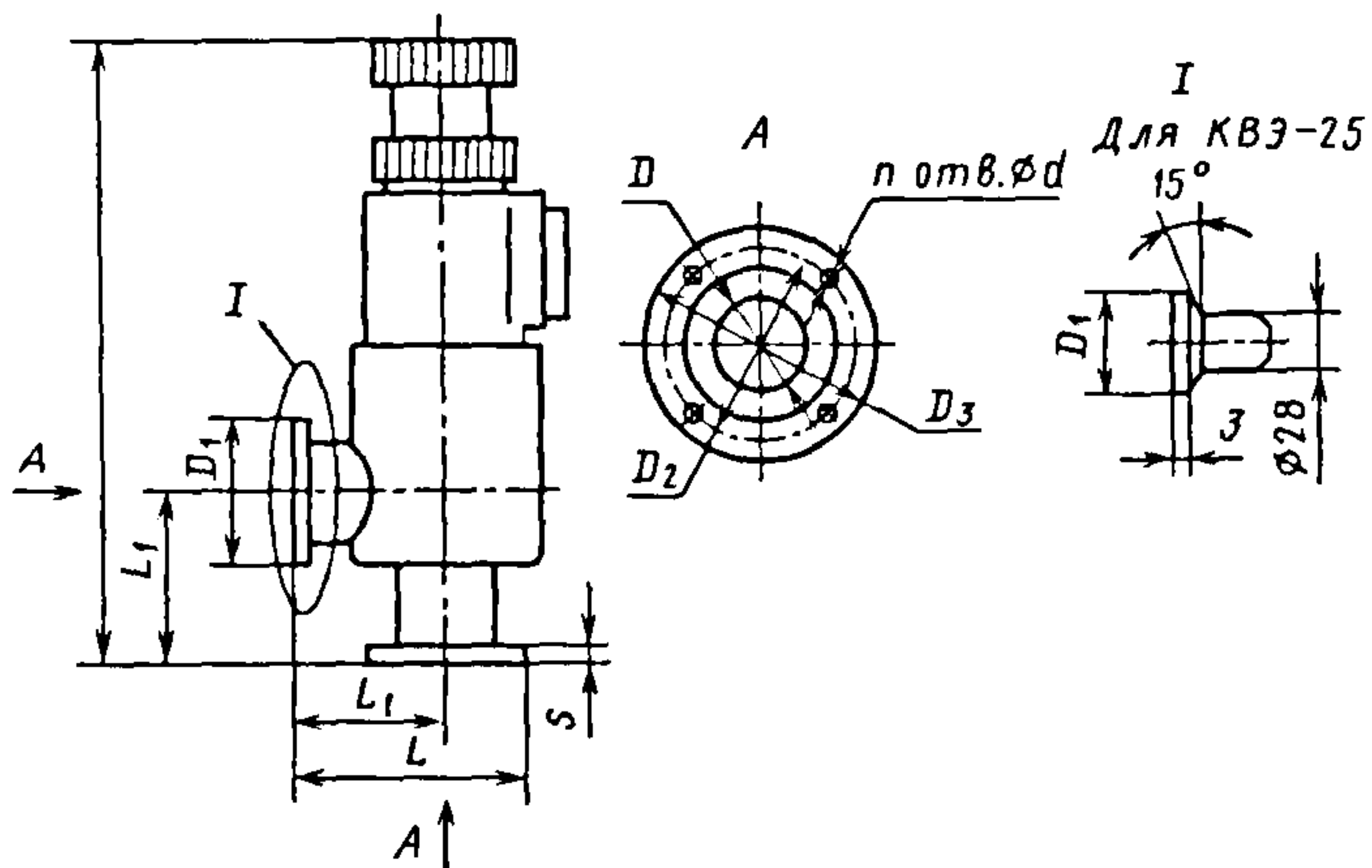


Рис. 7.11. Габаритный чертеж клапана типа КВЭ



## 7.6. Габаритные и присоединительные размеры клапана КВЭ, мм

Тип клапана	$D_y$	$D$	$L$	$H$	$L_1$	$D_1$	$S$	$D_2^*$	$n^*$	$d^*$	$D_3^*$
КВЭ-25	25	26,2	110	270	50	40	3	—	—	—	—
КВЭ-63	63	70	155	345	90	95	12	110	4	9	130
КВЭ-100	100	102	200	450	110	130	12	145	8	9	165

\* Размеры накидных фланцев.

Клапаны КВЭ работают в любом установочном положении. Размеры ответных фланцев для клапана КВЭ-25 по СТ.СЭВ 298-76, для клапанов КВЭ-63, 100 — по ГОСТ 24935-81.

Клапаны КЭУн с электромеханическим приводом имеют комбинированный (прямой и угловой) проход и предназначены для работы при давлении  $10^5 \dots 10^{-5}$  Па (рис. 7.12).

На больших перемещениях при открытии или закрытии проходных отверстий для ускорения срабатывания перемещается уплотнительный узел (реализуется механизм с передаточным числом 1). На малых перемещениях при герметизации уплотнительной пары для выигрыша в силе используется механизм с возможно меньшим передаточным отношением.

В корпус 5, изготовленный из алюминиевого сплава, с проходными отверстиями  $a$  от вала 1 через ввод вращения 3, размещенный в крышке 4 с пазом 6, герметично введена ось 7 с кулачком 6, который через ролик 11, связанный с осью 8 и

опорой качения 2, воздействует на уплотнительный диск 10 с прокладкой 9. При открытии или закрытии проходного отверстия  $a$  ролик 11 находится во впадине кулачка 6, образуя фиксированное соединение уплотнительного диска с кулачком. В этом случае при угле поворота  $90^\circ$ , необходимом для закрытия или открытия проходного отверстия, привод непосредственно воздействует на диск.

В табл. 7.7 приведены технические характеристики клапанов КЭУн.

Вакуумные клапаны с ручным приводом типа КВЭ (рис. 7.13 и 7.14; табл. 7.8 и 7.9) предназначены для герметичного перекрытия вакуумных систем в диапазоне давлений  $1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^5$  Па ( $7,5 \cdot 10^{-8} \dots 3,8 \cdot 10^3$  мм рт.ст.) на трубопроводах для воздуха и неагрессивных газов при температуре рабочей среды  $1 \dots 40^\circ \text{C}$ .

Применяются они в электротехнической и электронной промышленности.

Материалы основных деталей: корпус — сталь 08пс, уплотнитель — вакуумная маслостойкая резина марки 9024.

## 7.7. Технические характеристики клапанов КЭУн

Характеристика	КЭУн-25	КЭУн-40	КЭУн-63
Диаметр условного прохода, мм	25	40	63
Проводимость, $\text{дм}^3/\text{с}$	20	70	190
Время открытия или закрытия, с	5		10
Габаритные размеры, мм	124×112×181	127×112×186	190×225×200
Масса, кг	2,3	2,4	7,5

Примечания. 1. Допустимый поток натекания  $10^{-8}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>.

2. Средний ресурс  $2 \cdot 10^4$  циклов.

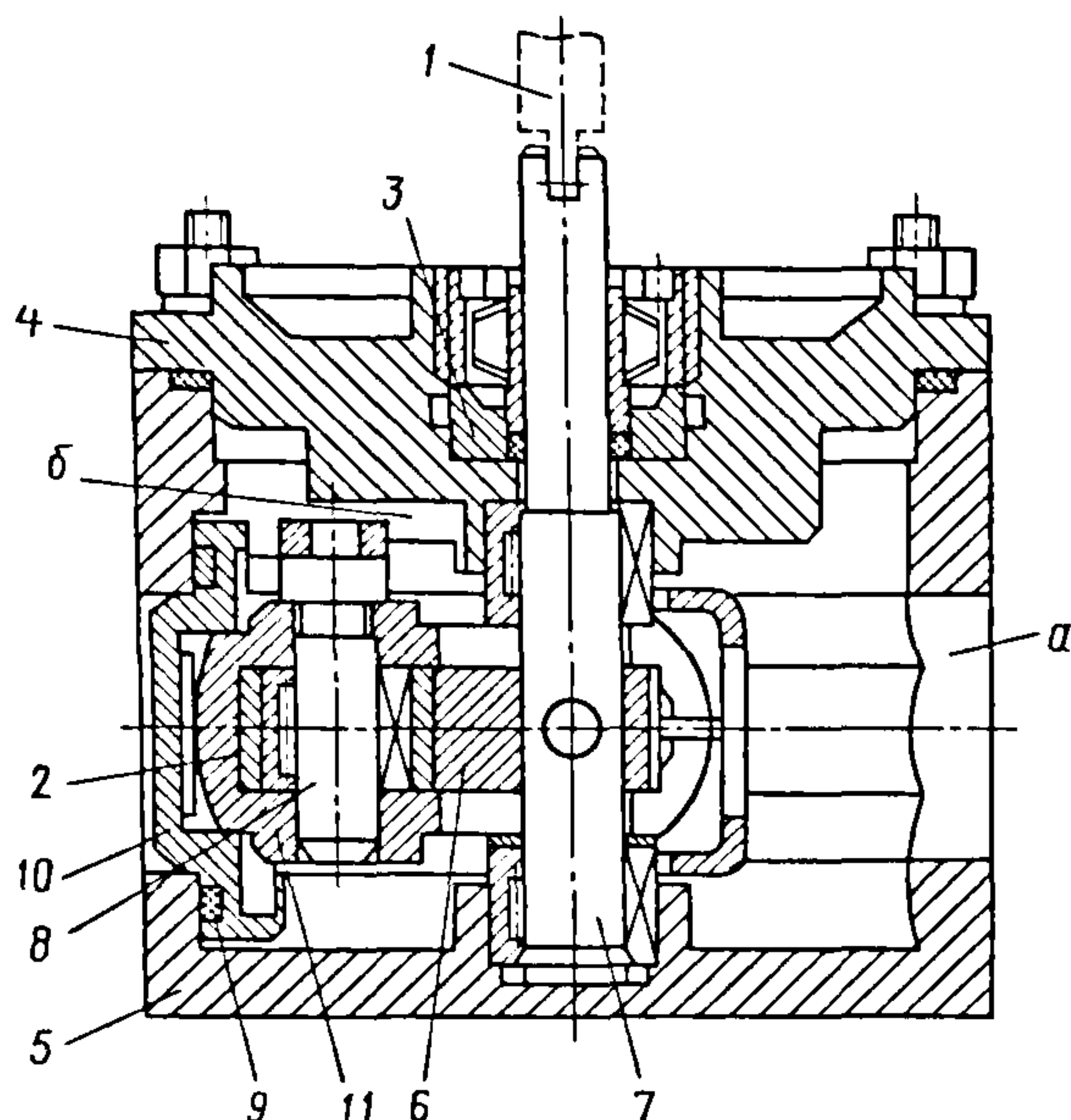


Рис. 7.12. Универсальный клапан (проходной и угловой) КЭУн (без привода)

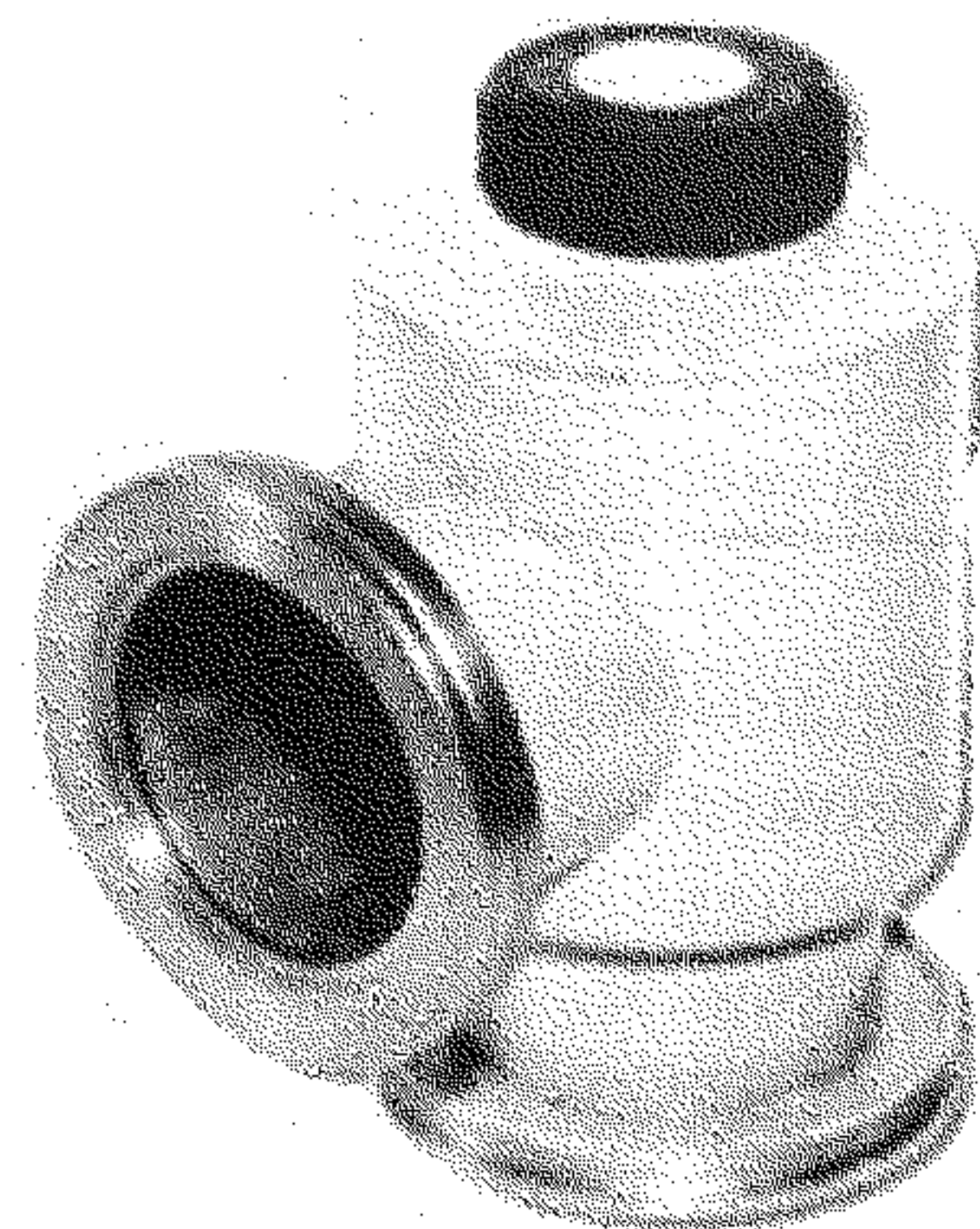


Рис. 7.13. Вакуумный клапан с ручным приводом типа КВР

### 7.8. Технические характеристики клапанов КВР

Характеристика	КВР-25	КВР-63	КВР-100
Проводимость (теоретическая) в молекулярном режиме, л/с, не менее	16	180	470
Наибольшая величина натекания, Па·л/с (л·мм рт.ст./с), не более	$1 \cdot 10^{-10} (7,5 \cdot 10^{-7})$		
Диапазон давлений, Па (мм рт.ст.)	$1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^5 (7,5 \cdot 10^{-8} \dots 3,8 \cdot 10^3)$		
Сила на маховике в момент уплотнения, Н (кгс), не более	50(5)	70(7)	90(9)
Перепад давлений в закрытом положении, Па (мм рт. ст.), не более, при большем давлении:			
над клапаном	$5 \cdot 10^5 (3,8 \cdot 10^3)$		
под клапаном	$1,07 \cdot 10^5 (800)$		
Габаритные размеры, мм, не более (высота×длина×ширина)	110×80×60	215×150×120	250×185×150
Масса, кг, не более	0,65	3,8	6,5
Средний ресурс до капитального ремонта, число циклов, не менее	120 000		
Средний срок службы до капитального ремонта, число лет, не менее	8		



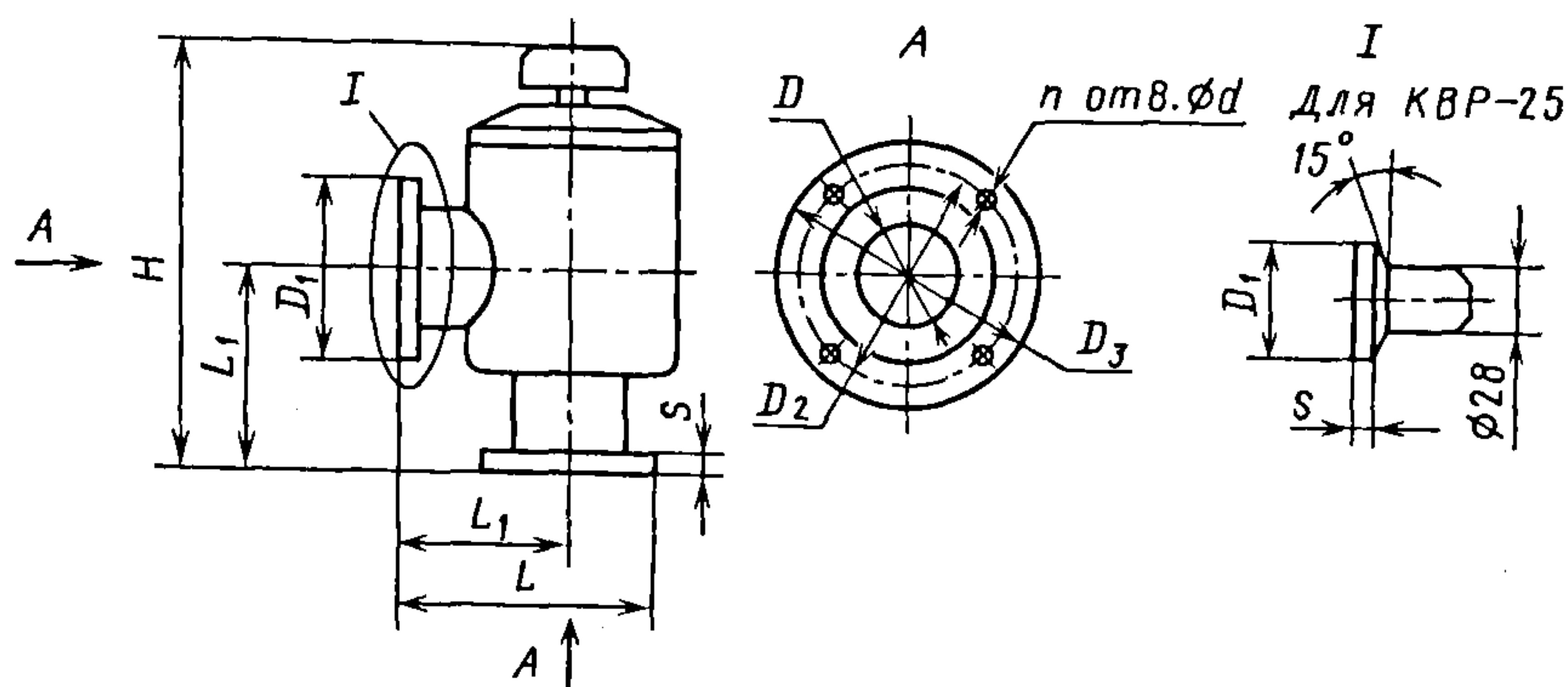


Рис. 7.14. Габаритный чертеж клапана типа КВР

### 7.9. Габаритные и присоединительные размеры, мм

Тип клапана	$D_y$	$D$	$L$	$H$	$L_1$	$D_1$	$s$	$D_2^*$	$n^*$	$d^*$	$D_3^*$
КВР-25	25	26,2	80	110	50	40	3	—	—	—	—
КВР-63	63	70	150	215	90	95	12	110	4	9	130
КВР-100	100	102	185	250	110	130	12	145	8	9	165

\* Размеры накладных фланцев.

Клапаны КВР работают в любом установочном положении. Размеры ответных фланцев для клапана КВР-25 по СТ.СЭВ 298-76, для клапанов КВР-63, 100 – по ГОСТ 24935-81.

### 7.4. ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ ЗАТВОРЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРИВОДАМИ

Для перекрытия вакуумных коммуникаций с  $D_y \geq 100$  мм используются вакуумные затворы. В зависимости от назначения существуют затворы двух типов: высоковакуумные непрогреваемые и сверхвысоковакуумные прогреваемые.

Из-за эксплуатационных преимуществ наибольшее распространение получили прямопролетные плоские затворы либо маятникового типа, либо шиберного с прямоугольными корпусами.

По сравнению с угловыми затворами плоские прямопролетные затворы обладают большей вакуумной проводимостью (примерно в 2 раза).

Плоские затворы особенно удобны при компоновке вакуумного оборудования с ионно-лучевой технологией, в ускорительной технике, а также для автоматического шлюзования образцов при научных исследованиях и производстве изделий электронной техники.

Для комплектования сверхвысоковакуумного оборудования, в частности оборудования для электронной промышленности, разработаны и серийно выпускаются затворы шиберного типа:

ЗЭПШТ с электромеханическим приводом с  $D_y$  100, 160, 250 мм и ЗЭПШ-400 (рис. 7.15);

ЗППШТ с электромеханическим приводом с  $D_y$  100, 160, 200, 250 мм.

Особенность затворов – высокая степень унификации: затворы различаются только приводами, а корпуса и основные механизмы и узлы идентичны.

Во всех затворах, кроме затвора ЗЭПШ-400, применяются уплотнители из термостойкой резины ТК<sub>р</sub> на основе

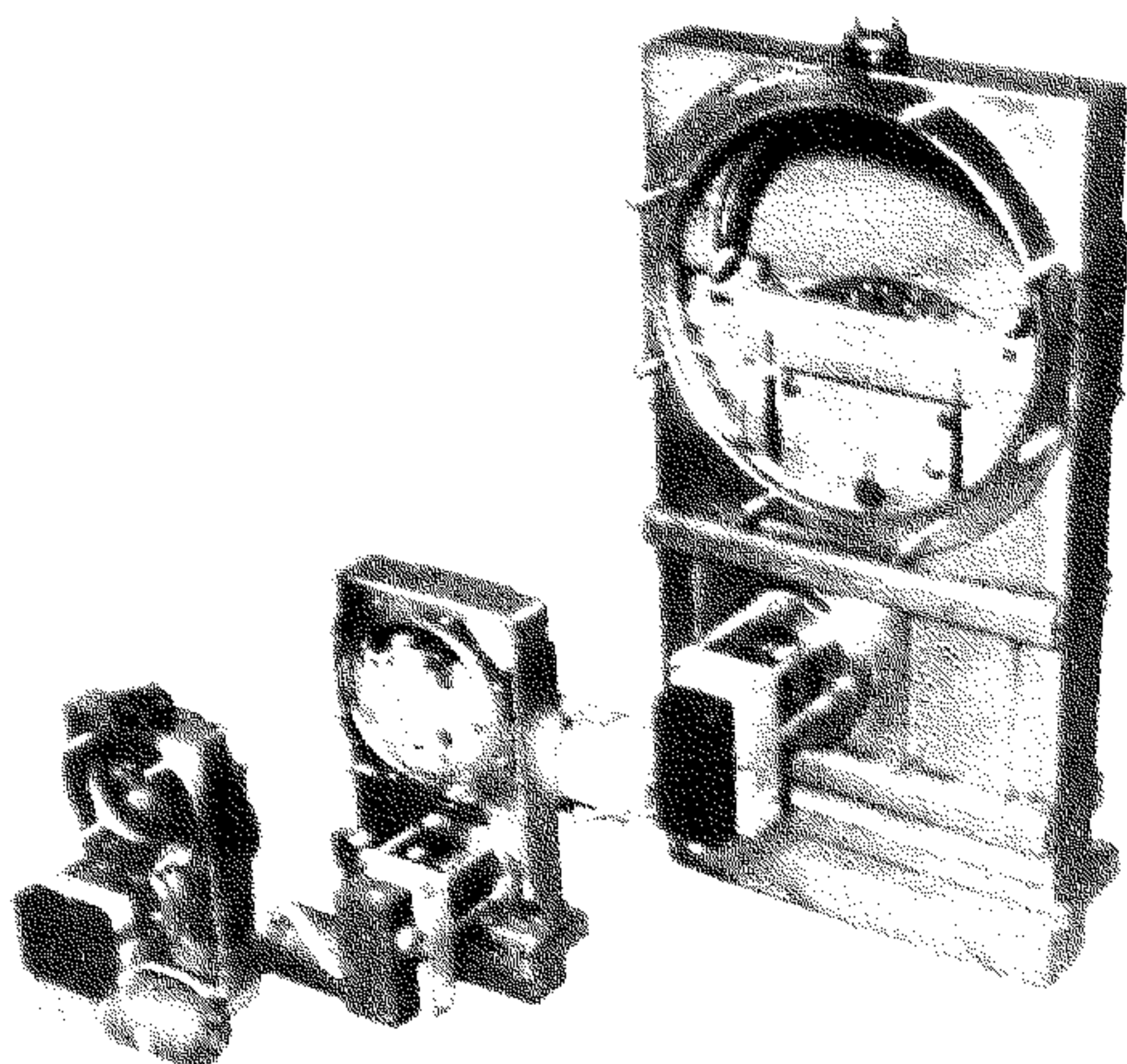


Рис. 7.15. Сверхвысоковакуумные плоские прямопролетные затворы ЗЭПШТ и ЗЭПШ

фторкаучука. При этом корпуса затворов, изготовленные из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, прогревают с целью обезгаживания до температуры 300 °С.

Затворы являются химически стойкими по отношению к фтор- и хлорсодержащим газам.

Эксплуатационная особенность затворов – возможность разборки и демонтажа внутренних узлов и механизмов при техническом обслуживании и ремонте через боковой прямоугольный фланец с сохранением корпуса в составе вакуумной установки.

#### Технические характеристики затворов ЗЭПШ

Рабочее давление, Па .....  $10^5 \dots 10^{-7}$   
 Поток натекания, Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> ...  $6 \cdot 10^{-11}$   
 Время открытия или закрытия, с ..... < 4  
 Средняя наработка на отказ, число циклов .....  $10^4$   
 Средний ресурс, число циклов  $5 \cdot 10^5$

Затвор ЗЭПШ-400 является непрогреваемым, поэтому его характеристики такие же, как у непрогреваемой арматуры.

В табл. 7.10 приведены технические характеристики затворов типа ЗЭПШ, ЗЭПШТ, ЗППШТ.

#### 7.10. Технические характеристики затворов ЗЭПШТ, ЗЭПШ, ЗППШТ

Характеристики	ЗЭПШТ-100	ЗЭПШТ-160	ЗЭПШТ-250	ЗЭПШ-400
Диаметр условного прохода, мм	100	160	250	400
Проводимость, м <sup>3</sup> /с	1,6	4,0	16	40
Тип привода	Электромеханический			
Мощность электродвигателя, Вт (при напряжении сети 220/380 В и частоте 50 Гц)	25	40		90
Давление в пневмосети, МПа	—			
Температура прогрева, °С	300			70
Габаритные размеры, мм	345×180×230	440×250×245	582×360×270	967×364×518
Масса, кг	15	25	43	100
Характеристики	ЗППШТ-160	ЗППШТ-200	ЗППШТ-250	
Диаметр условного прохода, мм	160	200	250	
Проводимость, м <sup>3</sup> /с	2,6	10	16	
Тип привода	Электропневматический			
Мощность электродвигателя, Вт (при напряжении сети 220/380 В и частоте 50 Гц)	—			
Давление в пневмосети, МПа	0,4...0,6			
Температура прогрева, °С	300			
Габаритные размеры, мм	445×255×215	500×318×205	575×360×205	
Масса, кг	11	32	41	



Для сверхвысоковакуумного оборудования разработаны цельнометаллические клапаны и затворы с использованием жидкометаллических уплотнителей на основе эвтектики индий–олово. Однако из-за технологических и эксплуатационных трудностей этот тип арматуры не нашел широкого применения и не был освоен в серийном производстве.

Среди зарубежных фирм значительных успехов в разработке и создании вакуумных затворов достигла швейцарская фирма VAT, которая выпускает более десяти серий различных затворов.

Наибольший интерес представляют собой цельнометаллические затворы серии 48 с диаметром условного прохода до 200 мм (рис. 7.16). Отечественные аналоги этих затворов отсутствуют. В них уплотнение заслонки по седлу осуществляется металлом, работающим в зоне упругих деформаций.

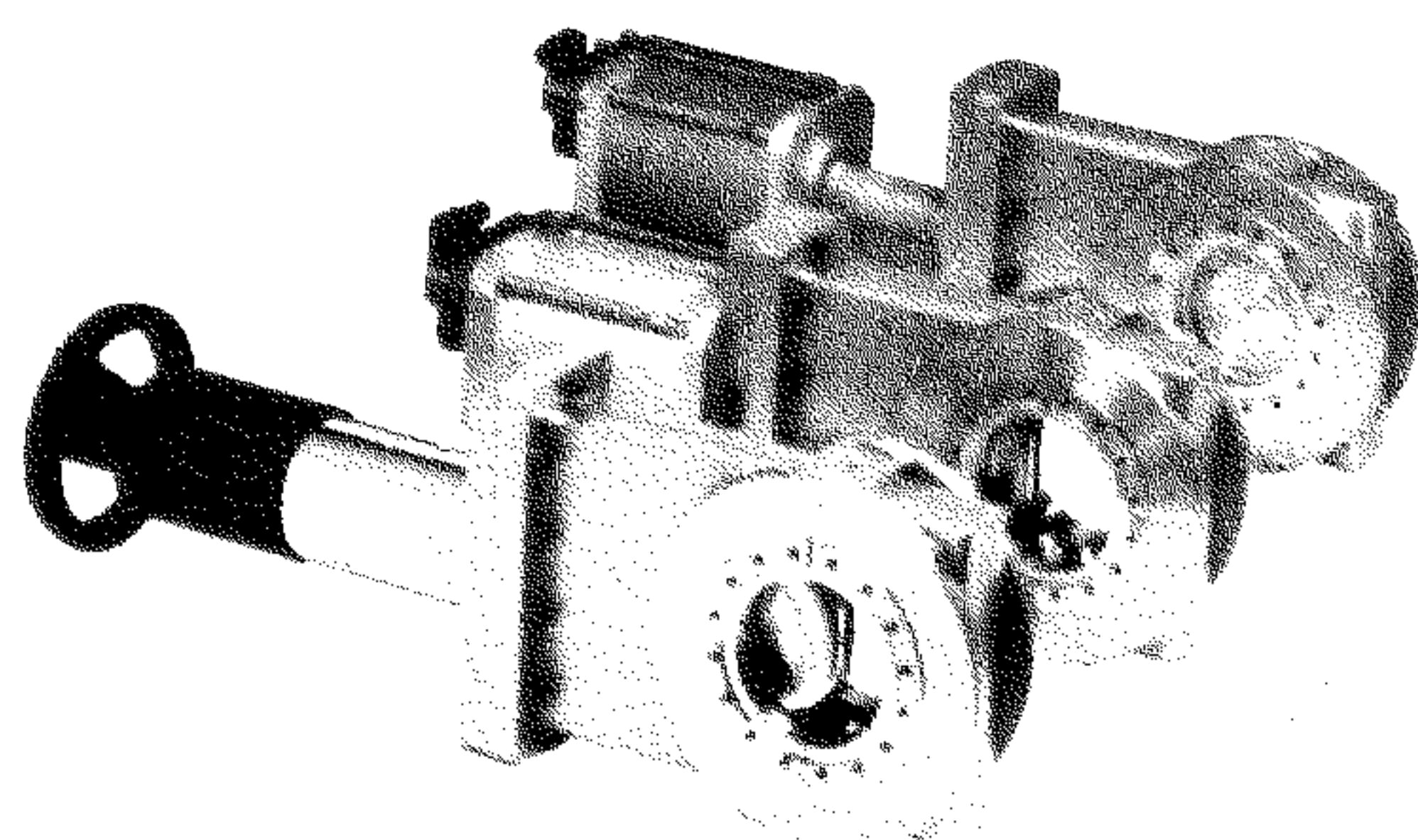


Рис. 7.16. Сверхвысоковакуумные цельнометаллические плоские затворы серии 48 фирмы VAT (Швейцария)

Диаметр условного прохода  $D_y$ , мм, 40, 63, 160, 200. Поток натекания (через корпус и уплотнительную пару)  $< 1 \cdot 10^{-11}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>. Число циклов «открыто-закрыто» (до первого ремонта) 20 000.

Температура прогрева, °С: корпуса  $\leq 300$ ; ручного привода  $\leq 140$ ; пневматического привода  $\leq 200$ .

Материал: корпуса – коррозионно-стойкая сталь, уплотнителя – специальный сплав.

Плоские затворы маятникового типа общепромышленного применения с электромеханическим приводом типа 23ВЭ (рис. 7.17 и 7.18, табл. 7.11 и 7.12) предназначены для герметичного перекрытия вакуумных систем в диапазоне давлений от  $1 \cdot 10^{-6} \dots 1,7 \cdot 10^5$  Па ( $0,75 \cdot 10^{-8} \dots 800$  мм рт.ст.) на трубопроводах для воздуха и неагрессивных газов. Температура окружающей среды  $1 \dots 35$  °С.

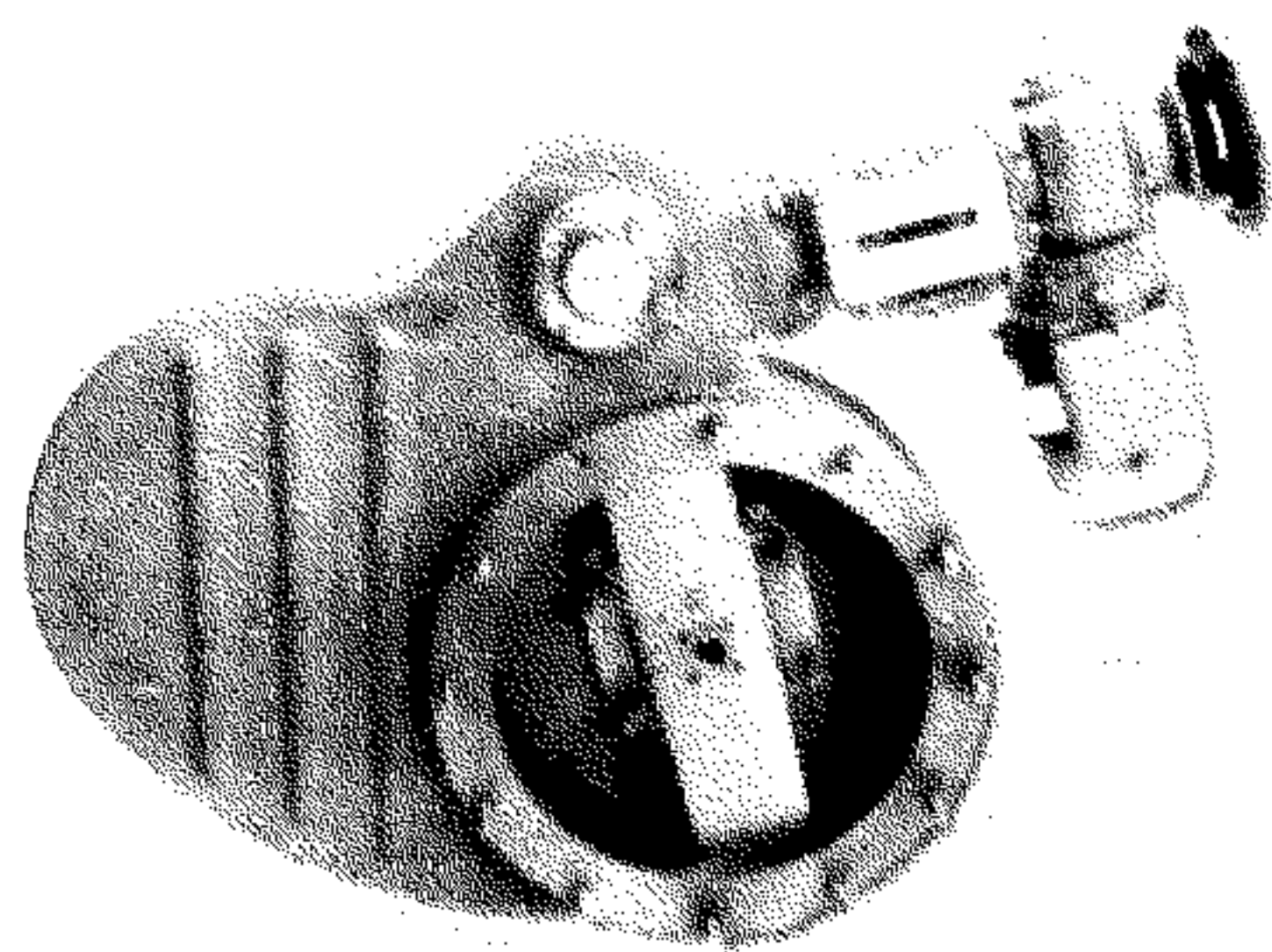


Рис. 7.17. Вакуумные затворы с электромеханическим приводом типа 23ВЭ

### 7.11. Технические характеристики затворов 23ВЭ

Характеристика	23ВЭ-100	23ВЭ-160	23ВЭ-250	23ВЭ-400	23ВЭ-500
Диаметр условного прохода $D_y$ , мм	100	160	250	400	500
Проводимость (теоретическая) в молекулярном режиме, л/с	1300	3340	13 400	46 250	80 000
Время открытия (закрытия), с, не более	3	4	9	27	55
Наибольшая величина натекания, Па·л/с, (л·мкм рт.ст/с) не более	$1 \cdot 10^{-10}$ ( $7,5 \cdot 10^{-7}$ )				
Потребляемая мощность, Вт, не более	63	100		200	400
Напряжение питания, В	220/380				
Частота, Гц	50				

Окончание табл. 7.11

Характеристика	23ВЭ-100	23ВЭ-160	23ВЭ-250	23ВЭ-400	23ВЭ-500
Перепад давления в закрытом положении с любой стороны заслонки, Па (мм рт. ст.)	$1,07 \cdot 10^5$ (800)				
Допустимый перепад давления при открытии заслонки, Па (мм рт. ст.), не более	$1,33 \cdot 10^3$ (10)				
Средний ресурс до капитального ремонта, число циклов	50 000				
Масса, кг, не более	17	24	46	110	240

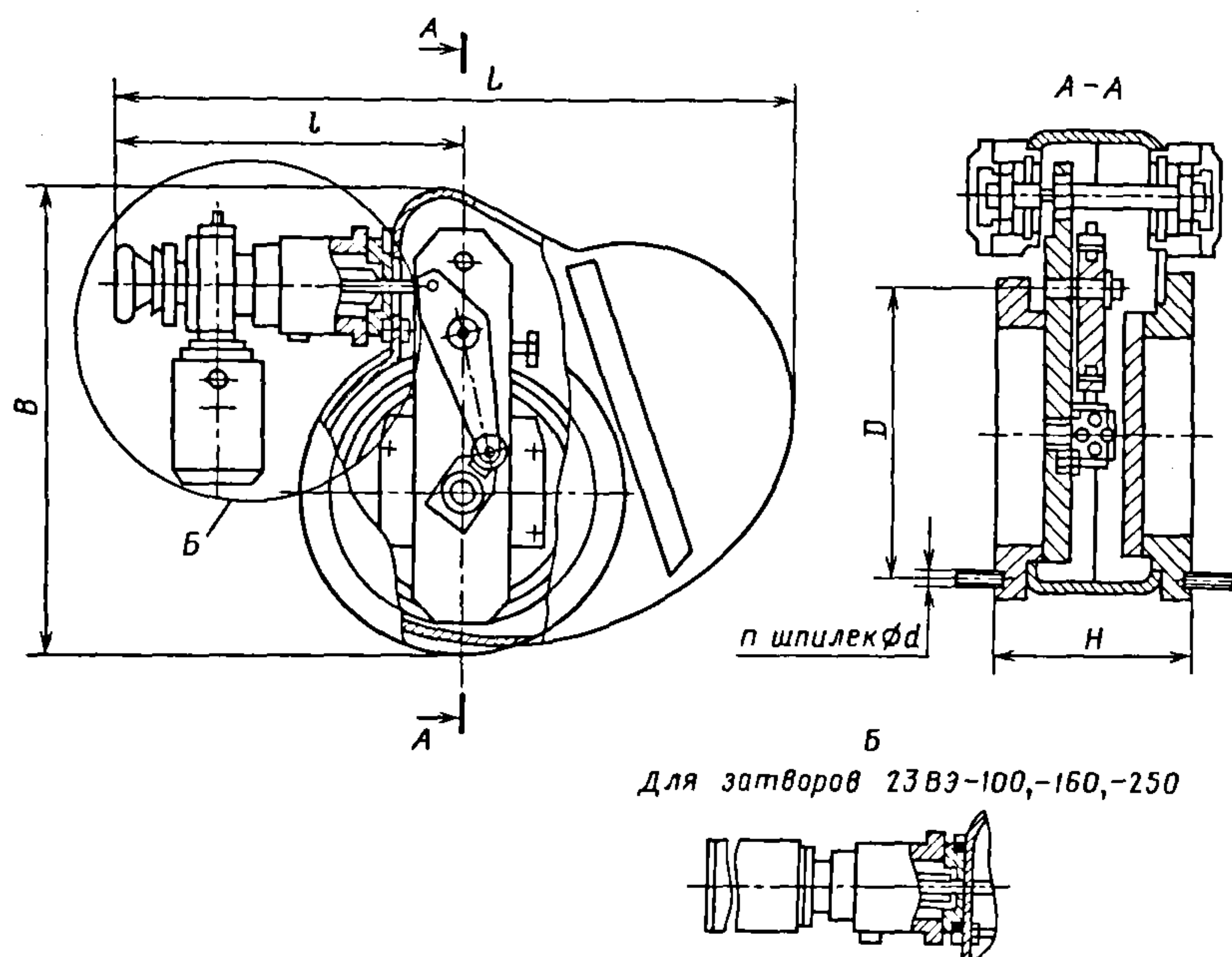


Рис. 7.18. Габаритный чертеж вакуумных затворов типа 23ВЭ

## 7.12. Габаритные и присоединительные размеры затворов 23ВЭ, мм (см. рис. 7.18)

Тип затвора	<i>L</i>	<i>l</i>	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>d</i>	<i>n</i>
23ВЭ-100	630	435	100	290	145	M10	4
23ВЭ-160	720			370	210		8
23ВЭ-250	840	440	140	510	300	M12	
23ВЭ-400	1070	480	160	750	455	M16	12

Противоаварийными клапанами могут служить нормально закрытые электромагнитные клапаны КВУМ-Л (см. рис. 7.6), установленные на форвакуумных трубопроводах.

В случае внезапного отключения электроэнергии эти клапаны мгновенно закрываются, обеспечивая сохранение вакуума в оборудовании.



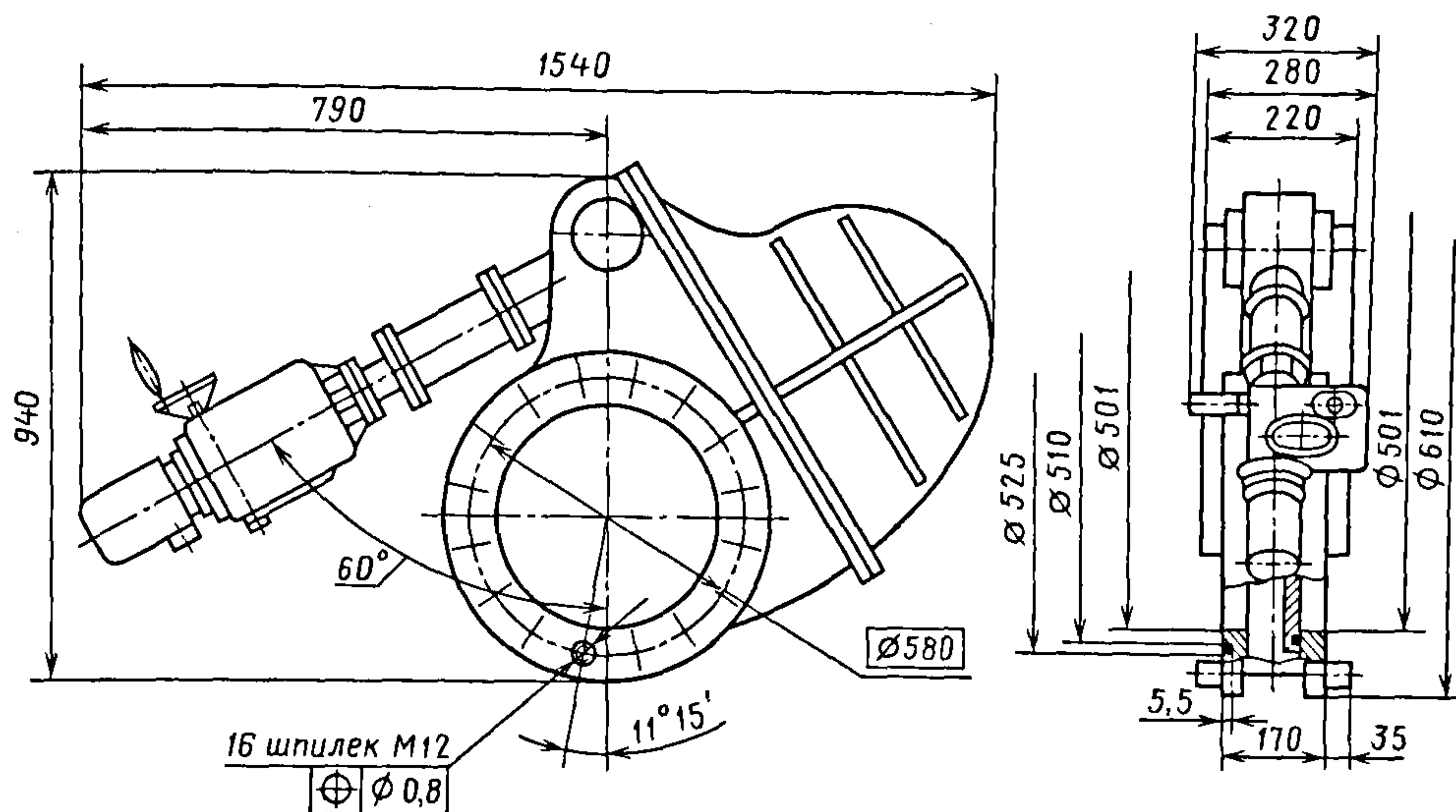


Рис. 7.19. Габаритный чертеж затвора 23ВЭ-500

### 7.5. ПРОТИВОАВАРИЙНЫЕ И НАПУСКНЫЕ КЛАПАНЫ

Для аварийного или запрограммированного напуска атмосферного воздуха в вакуумную систему или в форвакуумный насос при отключении электроэнергии применяются аварийно-напускные клапаны КМАН-4 и КМАН-10 (рис. 7.20). В обесточенном состоянии клапаны открыты, т.е. являются нормально открытыми. Рабочее давление  $10^5 \dots 10^{-3}$  Па. Напряжение питания соленоидов клапанов 220 В, переменное, частотой 50 Гц. Время срабатывания 1 с. Средний ресурс 100 тыс. циклов.

Для напуска газа в вакуумные системы и установки служат клапаны КМПН (клапаны магнитные проходные напускные) с электромагнитным приводом (рис. 7.21). Рабочее давление  $10^5 \dots 10^{-4}$  Па. Эти клапаны являются проходными и нормально закрытыми. При отключении электроэнергии сердечник соленоида кла-

пана под действием внутренней пружины возвращается в исходное положение и проходное отверстие перекрывается.

Технические характеристики клапанов КМПН-1,6 и КМПН-10 приведены в табл. 7.13.

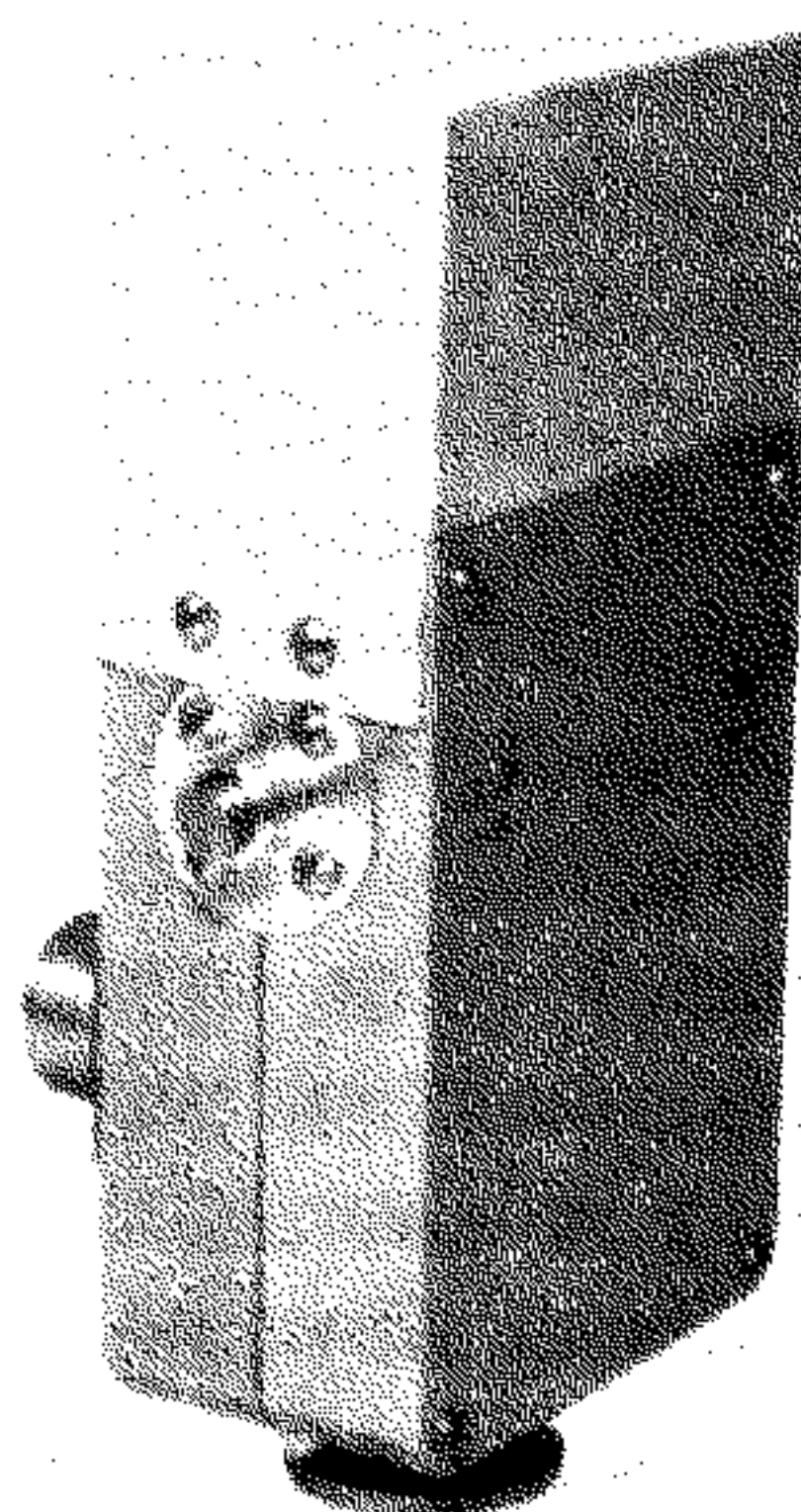


Рис. 7.20. Аварийно-напускной клапан КМАН-10 (нормально открытый) с электромагнитным приводом

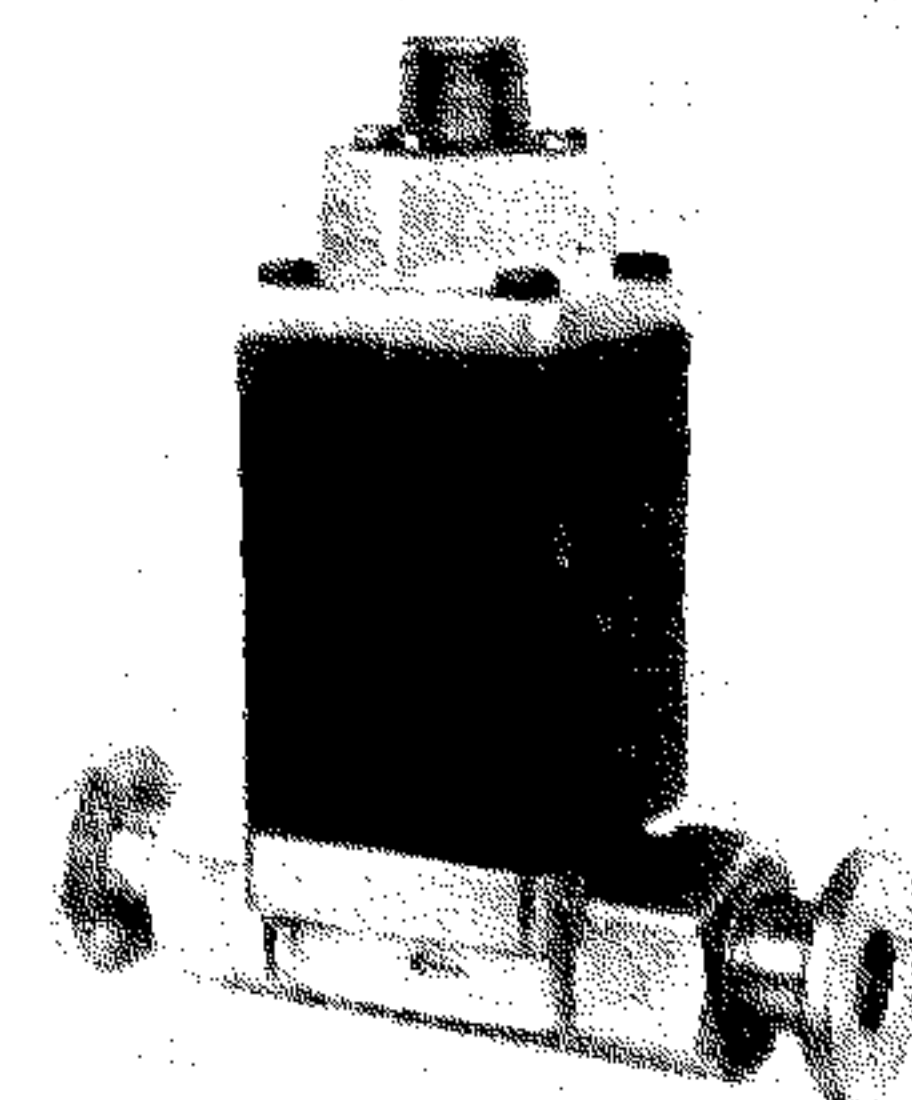


Рис. 7.21. Проходной напускной клапан КМПН-10 с электромагнитным приводом

### 7.13. Технические характеристики клапанов КМПН

Характеристика	КМПН-1,6	КМПН-10
Диаметр условного прохода, мм	1,6	10
Пропускная способность, дм <sup>3</sup> /с	0,25	4
Потребляемая мощность, Вт	2	8
Время срабатывания, с	0,02	0,03
Габаритные размеры, мм	55×30×125	102×40×140
Масса, кг	0,25	0,75

Примечания. 1. Допустимый поток натекания  $10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

2. Напряжение питания 220 В.

3. Материал уплотнителя – резина 7889.

### 7.6. НАТЕКАТЕЛИ

Для испытаний элементной базы вакуумных систем (насосов, запорной арматуры, газоанализаторов, манометрических преобразователей и др.), а также для проведения ряда технологических процессов требуются плавный напуск и регулирование поступления потока рабочего газа в вакуумные камеры технологического оборудования. Для этих целей служат натекатели.

Натекатели применяются также для дозированного напуска газов или плавного регулирования давления в вакуумных камерах электрофизических установок, ионных источниках, аналитических приборах.

Наиболее широкое распространение получили игольчатые натекатели, принцип действия которых основан на установлении определенного потока газа изменением положения конической иглы по отношению к седлу и проходному отверстию корпуса натекателя.

На рис. 7.22 показан вакуумный натекатель НРП-1,6 с ручной подстройкой, предназначенный для плавного регулирования потока газа, напускаемого в вакуумную камеру, в диапазоне давлений  $10^5 \dots 10^{-4} \text{ Па}$ .

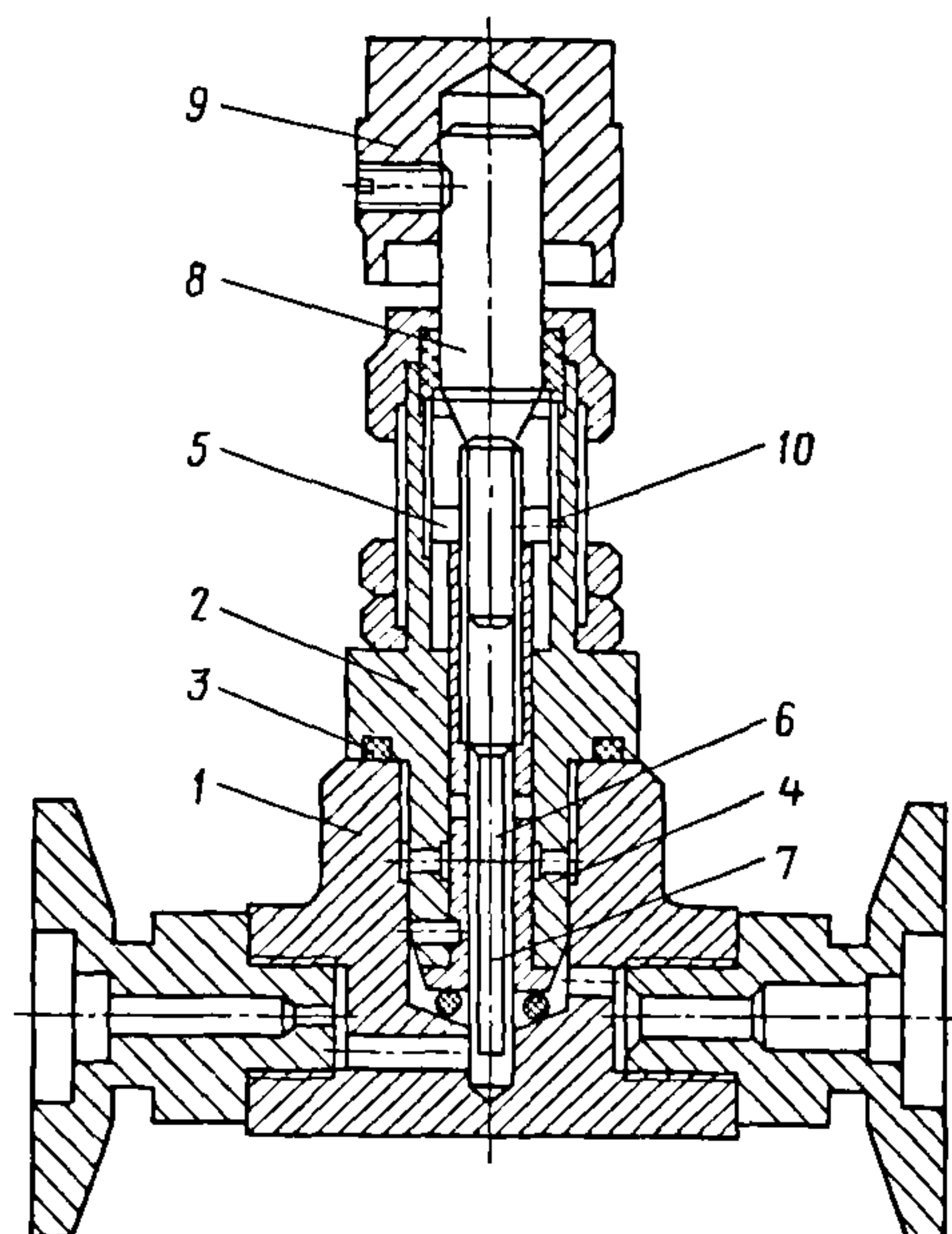


Рис. 7.22. Игольчатый натекатель с ручным приводом НРП-1,6

Основной материал натекателя – коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т, уплотнителей – вакуумная резина 7889.

Натекатель состоит из корпуса 1 с фланцами, верхней втулки 2 с газовыми каналами. Втулка через уплотнитель 3 с помощью наружных гаек крепится к корпусу. Под втулкой 2 в середине натекателя размещается седло 4, в котором передвигается игла 7, соединенная со штоком 8. Шток 6 перемещается в резьбовой втулке 5, соединенной с верхней втулкой по средством штифта 10. Уплотнитель штока выполнен в виде фигурного сальника, размещенного под верхней крышкой. Рукоятка 9 связана со штоком фиксирующим винтом. Натекатель непрогреваемый.

#### Технические характеристики натекателя НРП-1,6

Привод ..... Ручной  
Поток натекателя,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  .....  $5 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-2}$   
Средний ресурс, число циклов  $\geq 10^4$   
Габаритные размеры, мм .....  $60 \times 30 \times 80$   
Масса, кг ..... 0,2



Натекатель с электромагнитным приводом НМБ-1 (рис. 7.23) работает от источника постоянного тока напряжением 24 В.

Натекатель состоит из корпуса 5 с фланцами 6. Микроклапан 2 с резиновым уплотнителем через спиральную пружину 3 соединен с подвижным сердечником. Основание электромагнита 9 через уплотнитель 8 посредством резьбового соединения крепится к корпусу.

К корпусу через уплотнитель крепится сменное седло 7 с отверстием диаметром 0,1; 0,3; 0,5 мм (в зависимости от требуемого газового потока).

Соленоидная катушка 4 с магнитопроводом 1 и наружным магнитным экраном соединяется с корпусом посредством гайки 10. При подаче напряжения сердечник втягивается, деформируя пружину 3, и открывает поступление газа через микродиафрагму.

При снятии напряжения сердечник под действием пружины движется в обратном направлении и уплотняет калиброванное отверстие седла.

Если напряжение питания подается от автоматического электронного устройства генератора короткими импульсами длительностью ~50...100 мс, то, изменяя скважность подачи импульсов, можно изменить усредненный газовый поток. Натекатель не прогревается.

#### Технические характеристики натекателя НМБ-1

Газовый поток,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$  ...  $1,6 \cdot 10^{-6}$   
 Время срабатывания, с ...  $5 \cdot 10^{-6}$   
 Основной конструкционный материал ... 12Х18Н10Т  
 Материал уплотнителя ... Резина 7889  
 Габаритные размеры, мм ... 70×40×80  
 Масса, кг ... 0,35

При замене марки 7889 резины уплотнителей маркой 51-1735 или ТК<sub>р</sub> натекатели НРП-1,6 и НМБ-1 становятся пригодными для напуска фтор- и хлорсодержащих газов, т.е. химически стойкими.

Серийно выпускаются комбинированные натекатели НВ-1, в конструкции

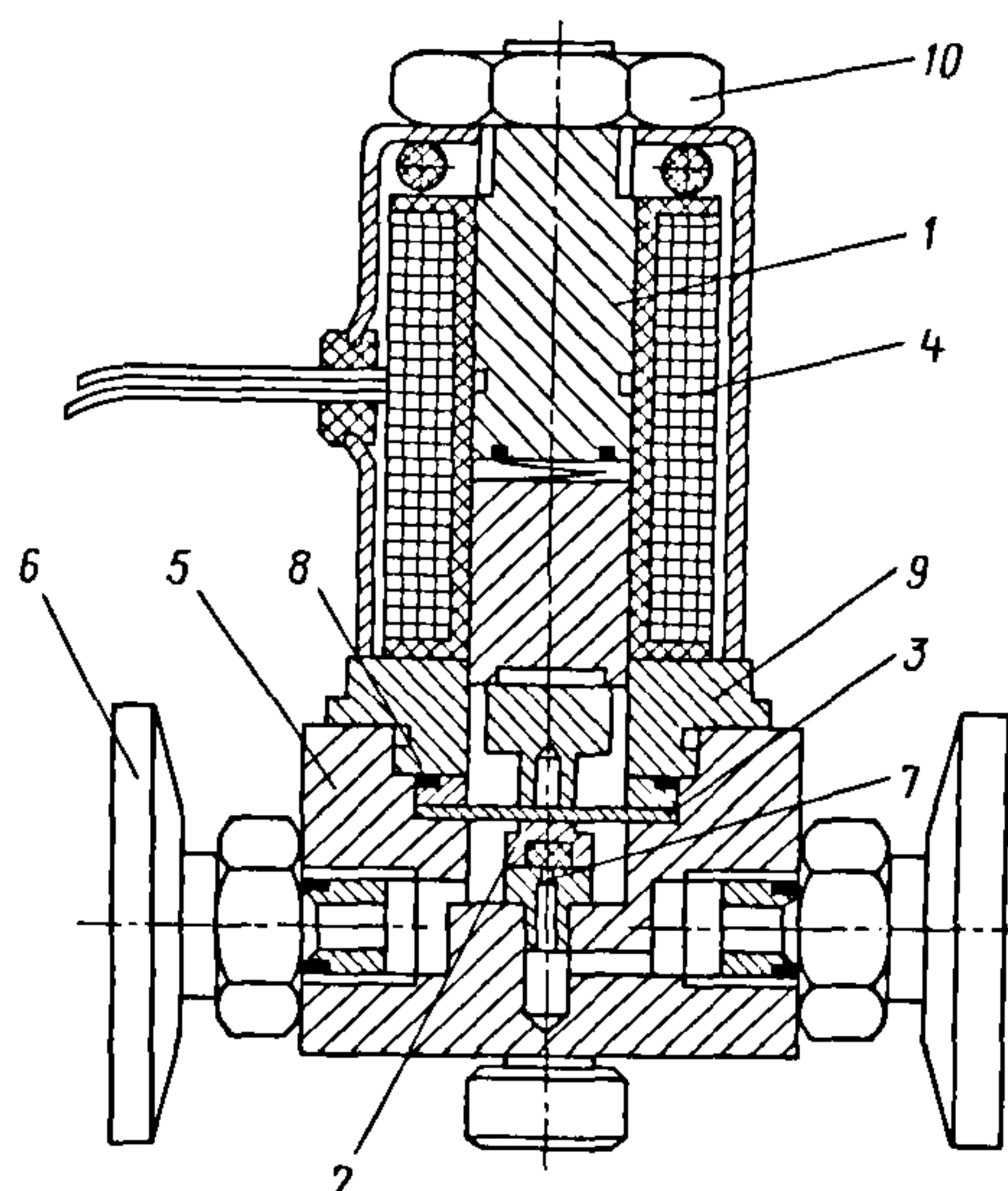


Рис. 7.23. Быстродействующий натекатель НМБ-1 с электромагнитным приводом

которых сочетаются и электромагнитный, и игольчатый варианты. Натекатель снабжен электронным устройством, обеспечивающим импульсный режим питания электромагнитной части натекателя, а игольчатая часть служит для ручной настройки уровня рабочего давления. Натекатель не прогревается.

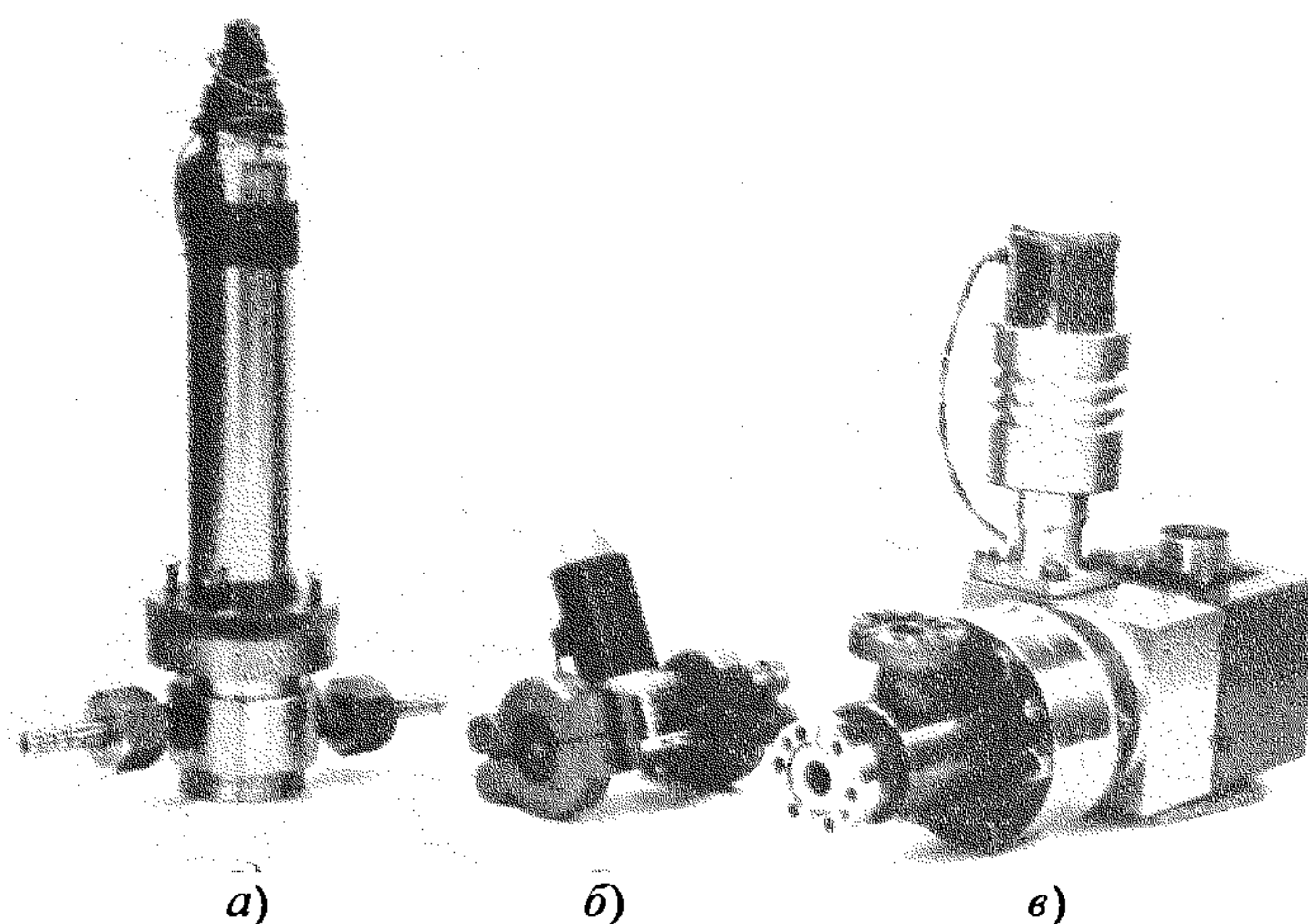
#### Технические характеристики натекателя НВ-1

Газовый поток,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$  ...  $5 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-5}$   
 Потребляемая мощность, Вт 50  
 Нарботка на отказ, число циклов ...  $10^5$   
 Ресурс, число циклов ...  $10^6$   
 Габаритные размеры, мм ... 148×80×58

В сверхвысоковакуумном автоматическом оборудовании применяются цельнометаллические натекатели с электро-механическим и пьезоэлектрическим приводами, которые показаны на рис. 7.24.

Сверхвысоковакуумный натекатель с электро-механическим приводом НБИ-1 представляет собой цельнометаллический игольчатый натекатель углового типа, в котором в качестве присоединительных фланцев использованы фланцы с  $D_y = 10$  мм (с металлическими уплотнителями) типа «Conflat».





**Рис. 7.24. Натекатели с автоматизированным приводом:**  
*а* – с пьезоэлектрическим приводом НПС-1; *б* – модернизированный НМБ-1М;  
*в* – сверхвысоковакуумный с электромеханическим приводом НБИ-1

За основу электропривода взят высокоскоростной микродвигатель ДПР с редуктором.

#### Технические характеристики натекателя НБИ-1

Газовый поток,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$  ...  $10^{-2} \dots 10^{-6}$   
 Температура прогрева натекателя (в открытом состоянии),  $^{\circ}\text{C}$  ... До 400  
 Габаритные размеры, мм ...  $235 \times 155 \times 72$   
 Масса, кг ... 2,1

В натекателе с пьезоэлектрическим приводом **НПС-1** в качестве уплотняющей пары применены шарик из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и седло из стали ХВГ.

Соединение натекателя с газонапускной камерой штуцерное.

#### Технические характеристики натекателя НПС-1

Газовый поток,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  ...  $5 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-6}$   
 Температура прогрева корпуса,  $^{\circ}\text{C}$  ... До 300  
 Напряжение питания, В 500  
 Время полного открытия или закрытия, мс ... 3  
 Габаритные размеры, мм  $210 \times 90 \times 60$

На базе электромагнитных натекателей **НМБ-1М** (модернизированных) и игольчатого **НБИ-1** разработана четырехканальная газонапускная автоматизиро-

ванная система с микропроцессорным управлением.

На рис. 7.25, *а* представлен общий вид, а на рис. 7.25, *б* чертеж сверхвысоковакуумного цельнометаллического натекателя с ручным приводом рычажного типа фирмы Varian (США). Регулирование напускаемого газового потока осуществляется за счет изменения микрозазора между оптически обработанным плоским сапфировым элементом, встроенным в подвижный поршень, и плоским металлическим уплотнителем с центральным отверстием. Соотношение плеч рычага 13 000 : 1. В закрытом состоянии не обнаруживаются течи  $> 1 \cdot 10^{-11} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  (с помощью чувствительного масс-спектрометрического течеискателя).

#### Основные характеристики течекателя Variable Leak Valve

Диапазон рабочих давлений, Па  $10^5 \dots 10^{-9}$   
 Минимальный натекаемый поток,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  ...  $10^{-10}$   
 Температура прогрева,  $^{\circ}\text{C}$  ... 450  
 Габаритные размеры, мм ...  $111 \times 70 \times 114$   
 Масса (с ответными фланцами), кг 2,5  
 Присоединительные фланцы Типа «Conflat»



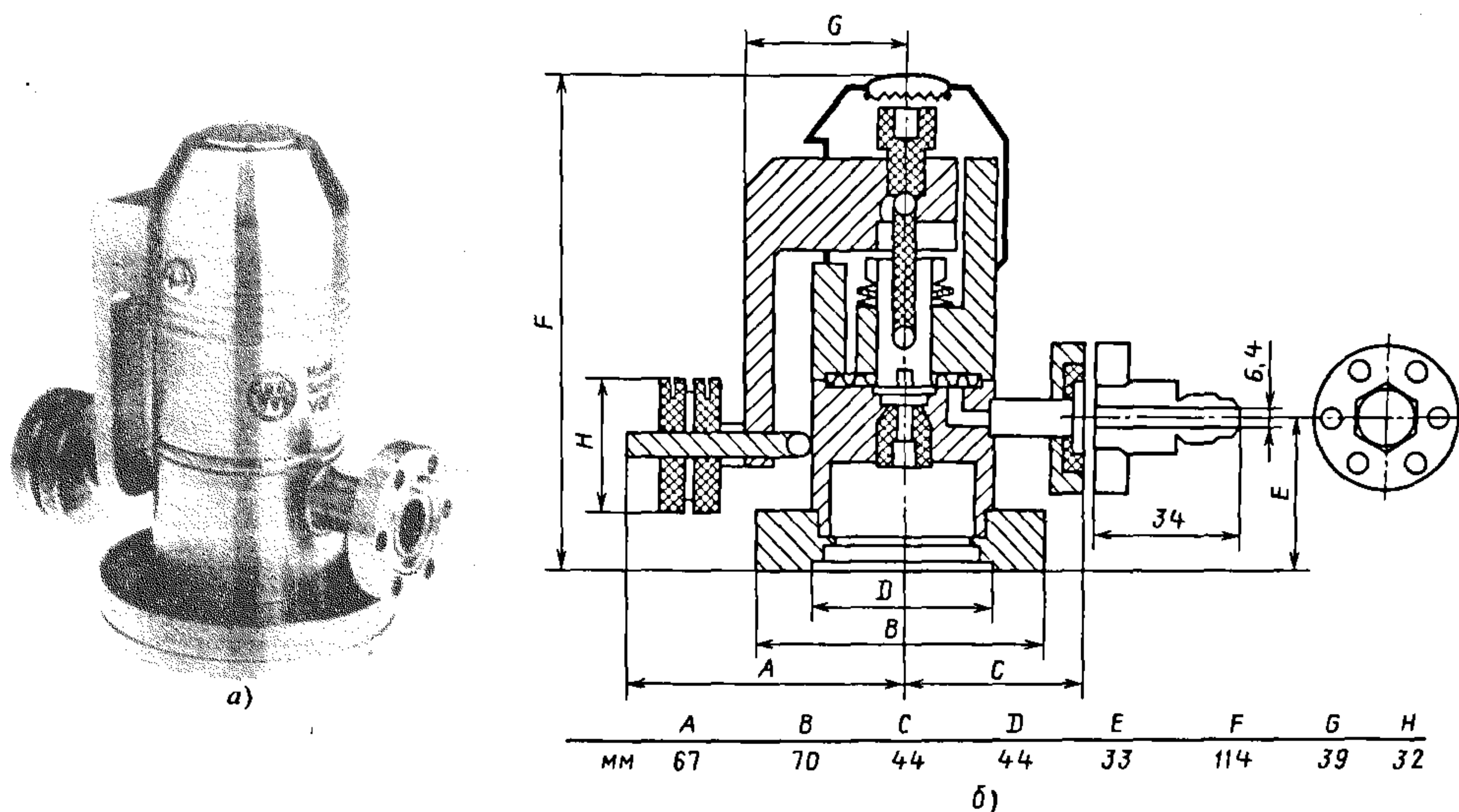


Рис. 7.25. Сверхвысоковакуумный цельнометаллический натекатель типа Variable Leak Valve (фирма Varian)

## 7.7. ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Одной из важнейших составных частей вакуумного технологического оборудования являются газовые системы (ГС), выполняющие подготовку, распределение, контроль, транспортирование технологических газов и парогазовых смесей (ПГС) в рабочие камеры (реакторы установок).

Газовой системой называется часть технологической установки, осуществляющая следующие функции: очистку, смешение, распределение, транспортирование, измерение и регулирование параметров газов и ПГС, а также нейтрализацию продуктов реакций. Для выполнения указанных функций ГС содержит аппаратуру различных типов. Включение той или иной аппаратуры зависит от ее назначения и конструктивно-технологических особенностей. Результаты технологических процессов существенно зависят от состава ПГС и точности ее поддержания на заданном уровне. Таким образом, ГС в значительной степени определяют технико-экономические показатели оборудования в целом.

ГС состоят из специальных элементов (клапанов, регуляторов давления, расхода реагента, расхода газов и т.д.), к которым предъявляют ряд очень высоких требований.

ГС классифицируют по следующим основным признакам:

технологическому назначению (для эпитаксиальных, окислительных, диффузионных, плазменных и других процессов);

агрегатному состоянию реагентов (с твердыми, жидкими или газообразными реагентами);

степени автоматизации (с ручным управлением, автоматизированным управлением, в том числе программным, с регулированием параметров газов и параметров процесса, в том числе программным);

конструктивному исполнению (в виде отдельно функционально законченных шкафов или блоков; в виде конструктивных модулей, встроенных в оборудование).

ГС должны отвечать ряду важных технологических требований, от выполнения которых зависит качество получаемых слоев и пленок, в частности быть герметичными. Конструкция и монтаж ГС должны исключать проникновение в сис-



тому воздуха и влаги из окружающей среды, а из системы в окружающую среду – реакционных газов, в особенности токсичных и взрывоопасных. Материалы ГС не должны вносить загрязнений и примесей в вещества, используемые в процессах, и вступать с ними в реакции.

Конструкции систем не должны содержать непродуваемых участков и застойных зон, в которых могли бы скапливаться реагенты и отходы реакций; должны обеспечивать всесторонний доступ к аппаратуре, трубопроводам и разъемам для периодического осмотра, испытаний на герметичность, регламентных работ и регулярного демонтажа для очистки.

Кроме того, ГС должны обеспечивать:

надежную работу стабилизирующей и запорно-распределительной аппаратуры, особенно при автоматизированном управлении циклами;

минимальные гидравлические сопротивления при достаточных пропускных способностях отдельных участков;

безопасные условия эксплуатации при нормальной работе и защиту в аварийных режимах;

минимально возможное потребление энергоносителей, минимальные габаритные размеры и стоимость.

В ГС применяются разнообразные клапаны, вентили, дроссели, посредством которых ведется распределение газов по каналам. Эта аппаратура в зависимости от газовых сред, в которых она используется, может быть разделена на две группы. К одной группе относятся аппаратура для технических и продувочных газов: обеспыленного воздуха, азота; аргона; водорода. Во вторую группу входит аппаратура, устанавливаемая в линиях реакционных газов, чистого водорода, а также линиях ПГС, содержащих пары жидких реагентов.

И к тем, и к другим группам элементов предъявляются одинаковые требования по чистоте (привносимой дефективности), герметичности, химической стойкости и другим показателям. Все металлические элементы этих конструкций должны быть выполнены из коррозионно-

стойких сталей типа 03Х17Н14М3, а магистраль, контактирующая с ПГС и высокотоксичными агрессивными средами, – из фторопласта; трубопроводы, по которым транспортируются газы, должны иметь полированную внутреннюю поверхность.

Соединение трубопроводов между собой желательно обеспечивать через металлические никелевые уплотнения.

Высококачественное проведение технологических процессов требует стабилизации параметров, в том числе расходов и давлений газов, входящих в состав ПГС. Для этой цели в ГС применяют регуляторы давлений и расходов газов. Регулятор давления поддерживает заданное давление в канале ГС или на входе в регулятор путем дросселирования потока газа.

Чувствительным элементом регулятора давления, как правило, является мембрана, воспринимающая силы, создаваемое давлением газа. При изменении давления мембрана деформируется и перемещает дроссельный регулирующий орган, который изменяет поток газа, в камеру регулятора.

Регуляторы расхода предназначены для поддержания постоянного во времени объемного или весового расхода газов. Необходимость стабилизации расхода связана с возможными изменениями гидравлических сопротивлений каналов ГС (перегибы трубопроводов, перекрытие запорных органов и т.д.).

При равномерно установившемся движении объемный расход  $Q_V$  газа, проходящего через сечение  $S$ , равен

$$Q_V = \mu S v_{cp},$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода, характеризующий неравномерность скорости по сечению потока;  $v_{cp}$  – средняя скорость при малых перепадах давления газа, м/с;

$$v_{cp} = \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma}},$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на исполнительном органе регулирующего устройства, Па;  $\gamma$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.



Для непрерывного регулирования расхода газа необходимо (при прочих равных условиях) изменять либо проходное сечение исполнительного органа, либо перепад давления.

Схема типовой ГС технологической установки показана на рис. 7.26. Технологические газы  $G_1 \dots G_4$  из баллонов 10 через клапаны 9 и регуляторы хода газа 8 поступают в рабочую камеру 5. Давление в рабочей камере измеряется датчиком 4, а поддерживается в требуемом диапазоне регуляторами расхода газа 8 и дросселирующим клапаном (заслонкой) 7, который изменяет эффективную быстроту откачки рабочей камеры вакуумным насосом 6. Управление напуском газов осуществляется компьютером 2 с помощью микропроцессорных контроллеров 1 и 3.

Типовые образцы элементов ГС представлены на рисунках, а их технические характеристики – в таблицах.

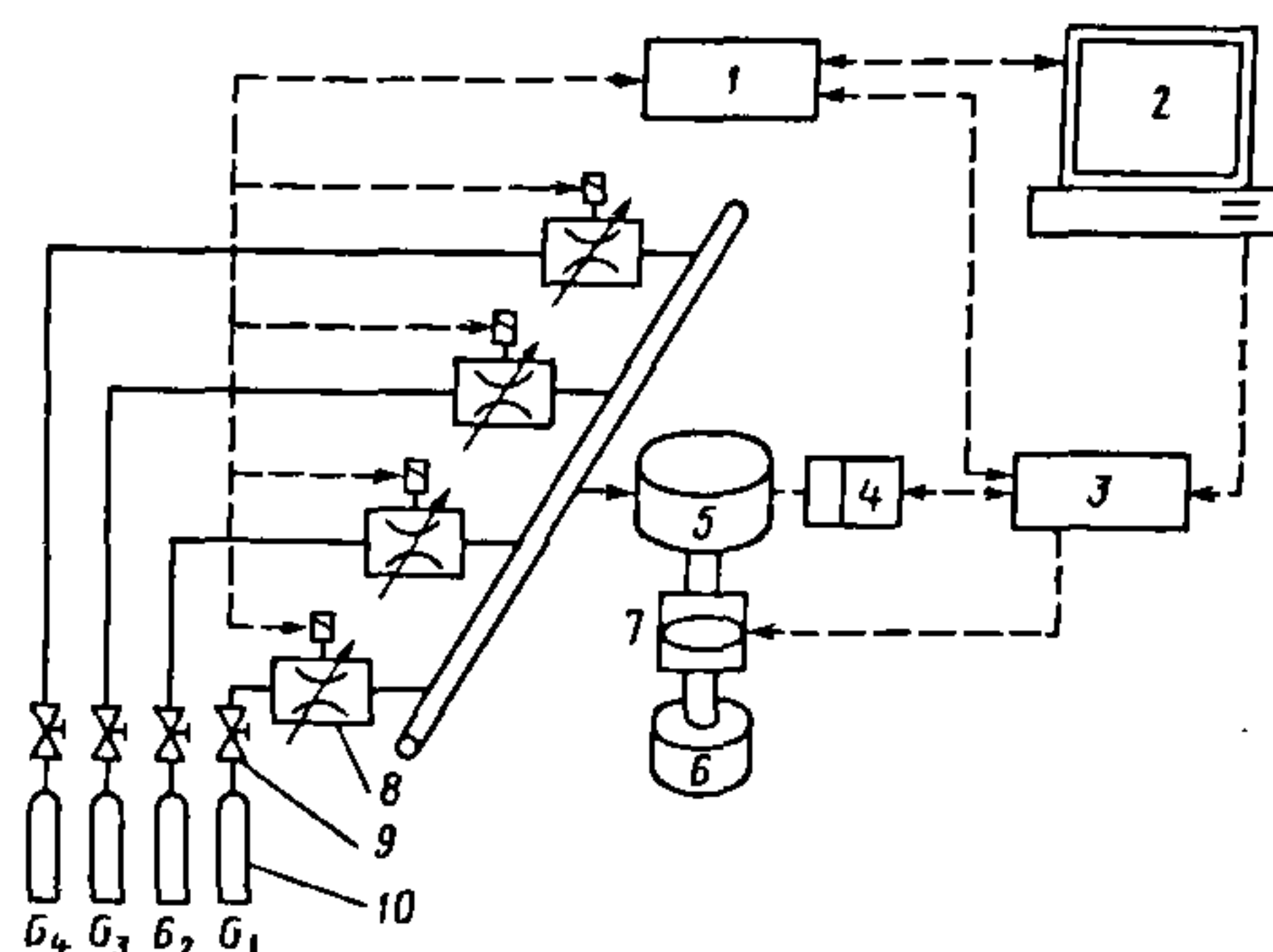


Рис. 7.26. Схема типовой ГС технологической установки

1. Запорные элементы, предназначенные для коммутации потоков газов и их смесей (могут работать как при избыточном давлении, так и при вакуумировании): с ручным управлением (рис. 7.27, а и табл. 7.14); с управлением от пневмопривода (рис. 7.27, б и табл. 7.15); с управлением от электромагнитного привода (рис. 7.28 и табл. 7.16).

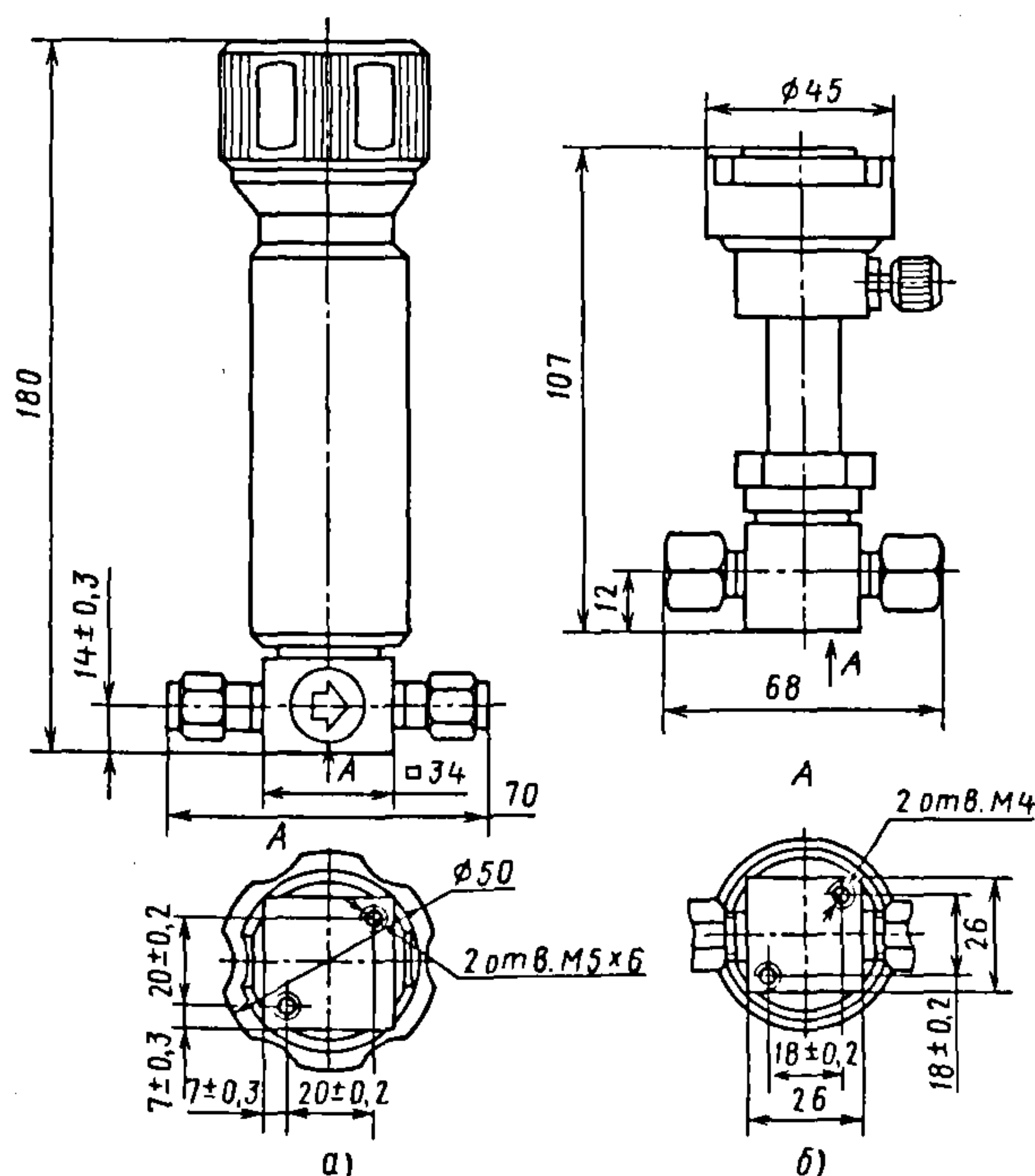


Рис. 7.27. Вентиль с ручным управлением (а) и клапан с управлением от пневмопривода (б)

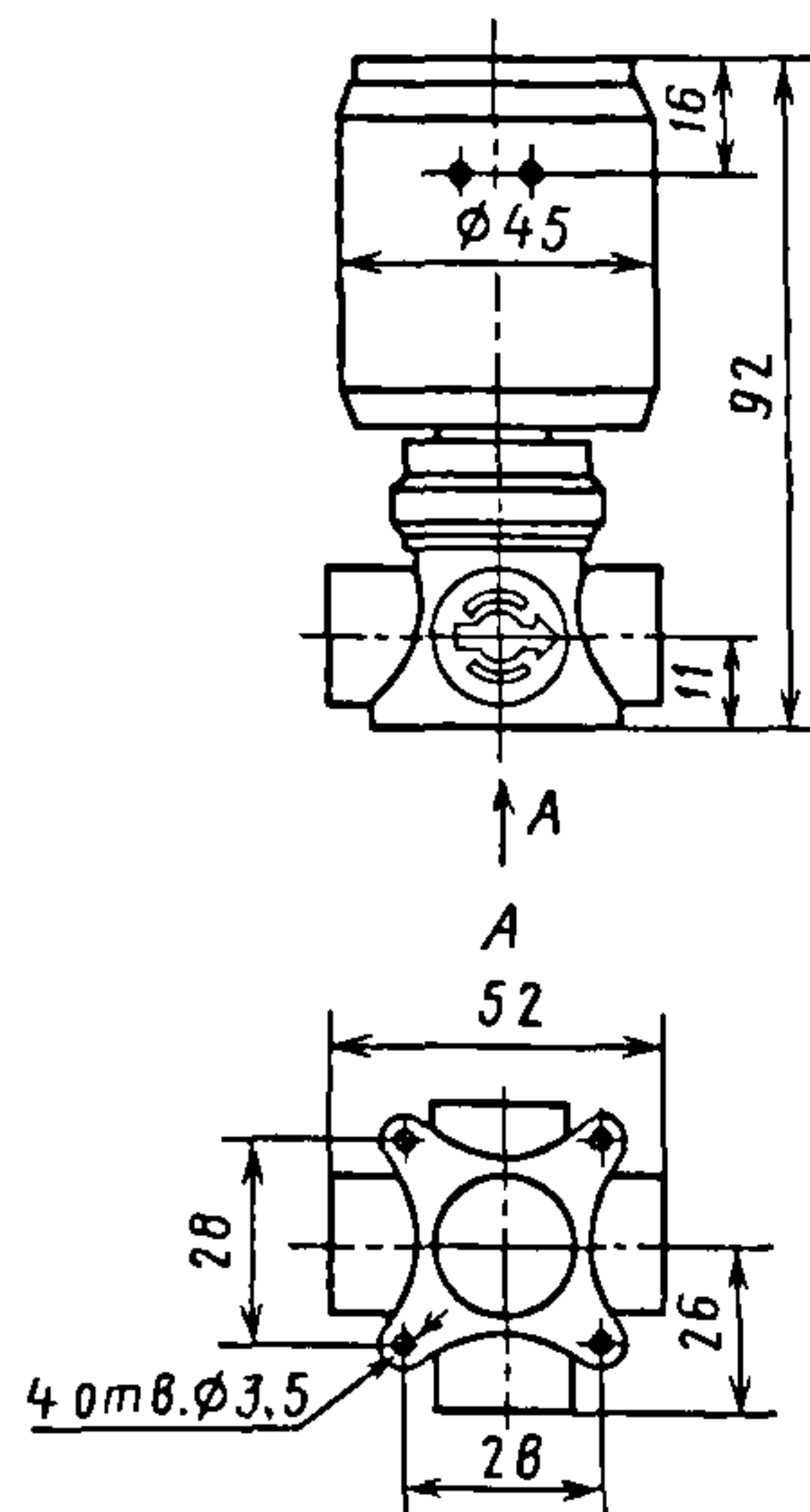


Рис. 7.28. Электромагнитный клапан

## 7.14. Технические характеристики запорных элементов с ручным управлением

Характеристика	Кран*				Вентиль	Вентиль*
Диаметр условного прохода, мм	4; 6; 8; 12; 16; 20	2	4; 8	2; 4	4	
Рабочее давление, МПа	0,4	16,0	0,6		4,0	16,0
Расход газа, дм <sup>3</sup> /ч	1800, 3600, 9000, 18 000, 36 000	3600	1800...3600	1800		18 000
Поток натекания, м <sup>3</sup> ·Па·с <sup>-1</sup> :						
через затвор	1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-8</sup>	1,3·10 <sup>-11</sup>		1,3·10 <sup>-8</sup>	1,3·10 <sup>-9</sup>
в окружающую среду	1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-8</sup>	1,3·10 <sup>-9</sup>			
из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании	—	—	1,3·10 <sup>-11</sup>		1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-11</sup>
Наработка на отказ, ч	25 000	30 000	300 000			200 000
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-4, резиновые смеси ИРП-1345, 51-1481	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-4	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-40	Сталь 03Х17Н14М3, фторопласт-40	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-4	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-40
Масса, кг	0,860	0,2	0,820	0,2	0,35	1,3

\* Имеет несколько типов соединений.

2. Предохранительные элементы: аварийные клапаны (рис. 7.29 и табл. 7.17) для аварийного перекрытия газовых магистралей при увеличении заданного расхода или при падении заданного давления

газов и их смесей, и обратные клапаны (рис. 7.30 и табл. 7.18), рассчитанные на защиту газовых магистралей от обратных потоков газов и их смесей.



7.15. Технические характеристики клапанов с управлением от пневмопривода

Характеристика	I*	II*	III*	IV	V*	VI*	VII*	VIII*	IX*	X*	XI*	XII*	XIII
Диаметр условного прохода, мм	4		6; 8; 12; 16; 20		4				4; 8			2; 4	12
Рабочее давление, МПа		0,6			4,0				0,6				0,1...13,3
Управляющее давление, МПа						0,3...0,6							0,4...0,6
Расход газа, $\text{дм}^3/\text{ч}$	3600		36 000	9000		3600			9000			3600	—
Поток истечения, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ ; через затвор		$1,3 \cdot 10^{-9}$		$1,3 \cdot 10^{-7}$						$1,3 \cdot 10^{-9}$			—
в окружающую среду		$1,3 \cdot 10^{-9}$								$1,3 \cdot 10^{-9}$			
из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании			$1,3 \cdot 10^{-9}$			$1,3 \cdot 10^{-5}$				$1,3 \cdot 10^{-11}$			—
Наработка на отказ, число циклов	$10^6$		$10^5$	$5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$			$8 \cdot 10^5$				$10^5$
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т, резиновые смеси 51-1481 и 51-1578		Сталь 12Х18Н10Т и резиновые смеси ИРП-13445, 51-1481	Сталь 10Х17Н13М2Т и резиновая смесь 51-1578	Фторопласт-10 и -40	Сталь 03Х17Н14М3, фторопласт-40							Сталь 12Х18Н10Т и резиновая смесь ИРП-2043
Масса, кг	0,5		1,4	0,8	0,95	0,15	1,0	0,99	1,05	1,02	0,4		1,4

\* Имеет несколько типов.

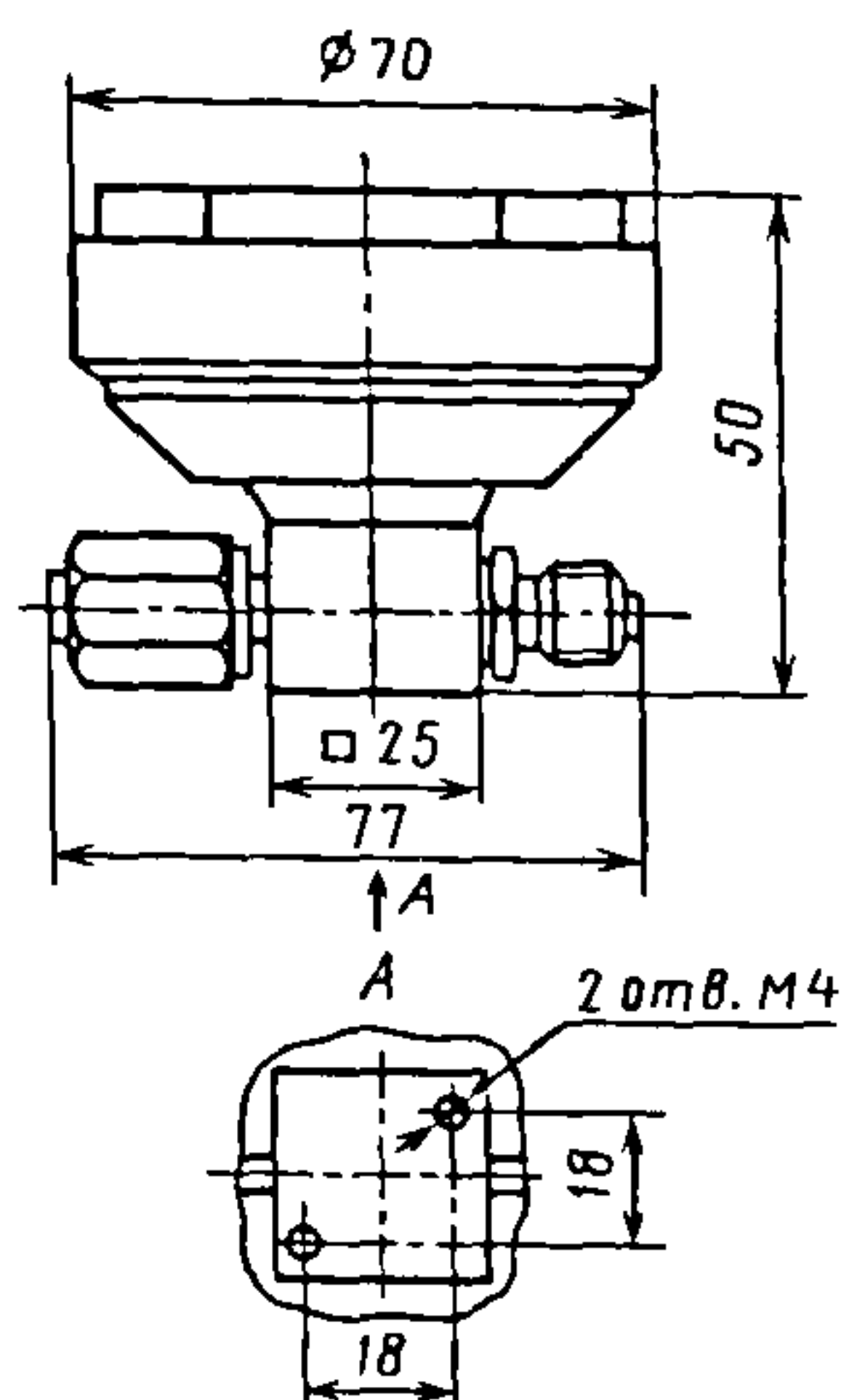


Рис. 7.29. Аварийный клапан

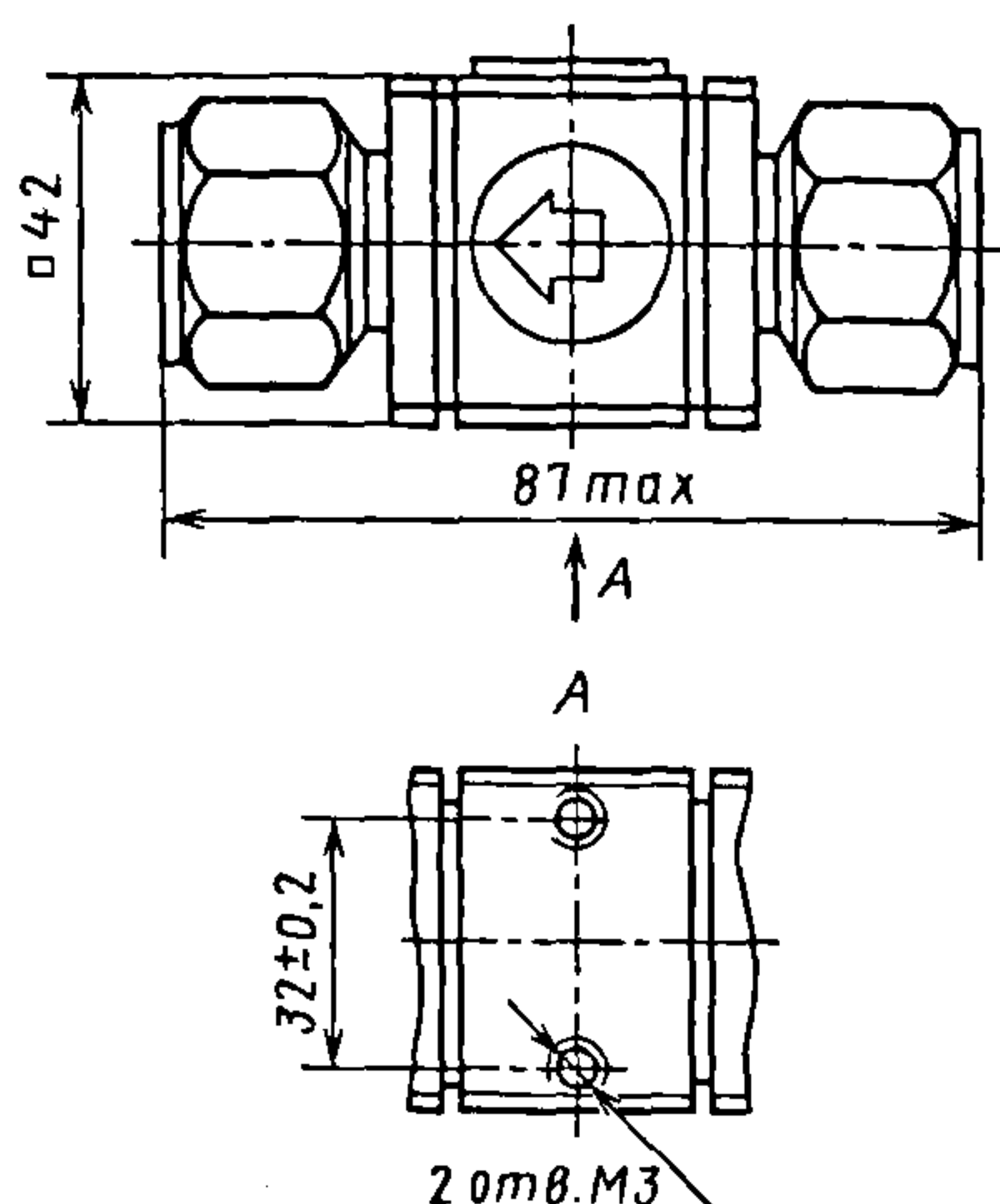


Рис. 7.30. Обратный клапан

### 7.16. Технические характеристики клапанов с управлением от электромагнитного привода

Характеристика	Клапан исполнения		Блок клапанов
	I	II	
Диаметр условного прохода, * мм	1,6	4	1,6
Поток натекания, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ : через затвор в окружающую среду	$1,3 \cdot 10^{-8}$		
Наработка на отказ, число циклов	$10^6$	$1,2 \cdot 10^4$	$10^6$
Рабочая среда	Сжатый воздух	Агрессивные газы, кислоты, щелочи	Сжатый воздух
Потребляемая мощность, Вт	6,5	6	13
Масса, кг	0,2	0,5	0,45

\*Имеет несколько типов соединений.

Примечания. 1. Рабочее давление 0,6 МПа.

2. Напряжение питания  $(24 \pm 4)$  В.

3. Относительная продолжительность включения 100 %.

### 7.17. Техническая характеристика аварийных клапанов

Характеристика	Клапан исполнения	
	I	II
Диаметр условного прохода, мм	4; 8	2; 4
Рабочее давление, МПа	0,1...10	0,1...16
Перепад давления срабатывания, МПа	0,025	0,003
Поток натекания из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$	—	$1,3 \cdot 10^{-11}$
Масса, кг	1,6	1,1

Примечания. 1. Поток натекания в окружающую среду  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

2. Материал, контактирующий с рабочей средой, – сталь 03X17H14M3, резиновая смесь 51-148I или ИРП-1345.

3. Нарботка на отказ 300 000 ч.



7.18. Технические характеристики обратных клапанов EM 465

Характеристика	Клапан исполнения						
	I*	II*	III	IV	V	VI	VII
Диаметр условного прохода, мм	10; 12; 16; 20	4; 6; 8	4; 8	4	8	2; 4	
Рабочее давление, МПа	0,5		До 16		0,6		0,6±0,02
Давление открытия, МПа	0,02				0,01		0,62
Расход газа, $\text{дм}^3/\text{ч}$	36 000	9000	3600	1800	9000	1800	
Поток нагнетания, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ : в окружающую среду							$1,3 \cdot 10^{-9}$
из окружаю- щей среды во внутреннюю полость при ее вакуумирова- нии							$1,3 \cdot 10^{-11}$
Материал, кон- тактирующий с рабочей средой	Сталь 12X18H10T, резиновая смесь 51-1481 и 51-1578	Сталь 12X18H10T, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345, фторопласт-26	Сталь 12X18H10T, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345	Сталь 03X17H14M3, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345	Сталь 12X18H10T, резиновая смесь 51-1481 и 51-1578	Сталь 03X17H14M3, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345	Сталь 03X17H14M3, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345, фторопласт-4
Наработка на отказ, ч	25 000	250 000	300 000	125 000	300 000		
Масса, кг	0,62	0,4	0,26	0,64	0,6	0,3	

\* Имеет несколько типов соединений.



3. Регулирующие элементы: регуляторы расхода газа (рис. 7.31–7.33 и табл. 7.19 и 7.20), предназначенные для регулирования потоков напускаемых в рабочую камеру газов.

На рис. 7.31, а приведена конструкция типового регулятора расхода газа, основными узлами которого являются входной 1 и выходной 4 штуцера, устрой-

ство дросселирования потока газа 2 и электромагнитный нагнетатель 3. Грубая регулировка расхода газа осуществляется дросселирующим устройством, а тонкая – электромагнитным нагнетателем (рис. 7.31, б), состоящим из следующих основных элементов: седла 5; клапана 6 с уплотнительной прокладкой из резиновой смеси марки ИРП-1345; упругой мембраны 7;

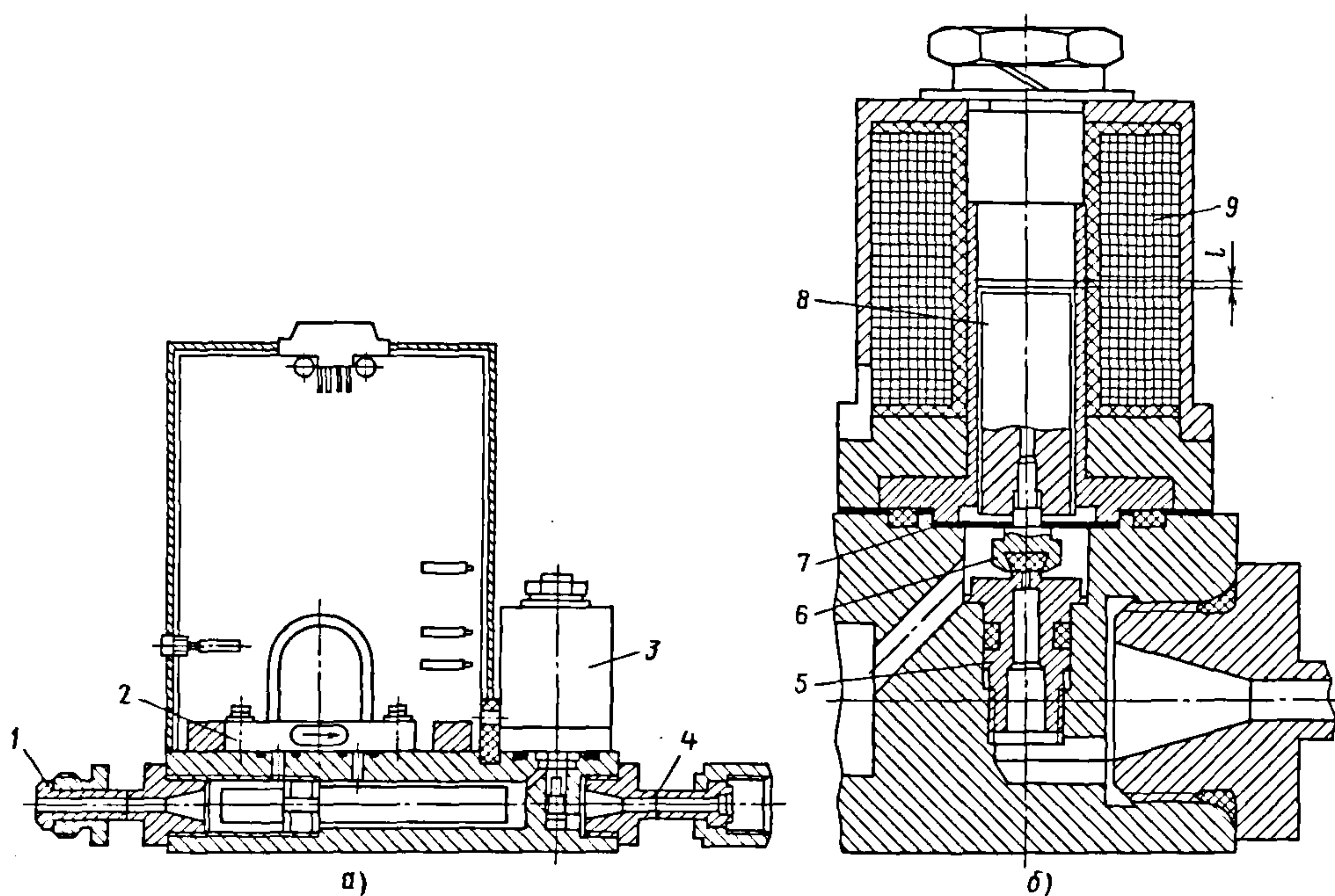


Рис. 7.31. Регулятор расхода газа РРГ (а) и электромагнитный нагнетатель (б)

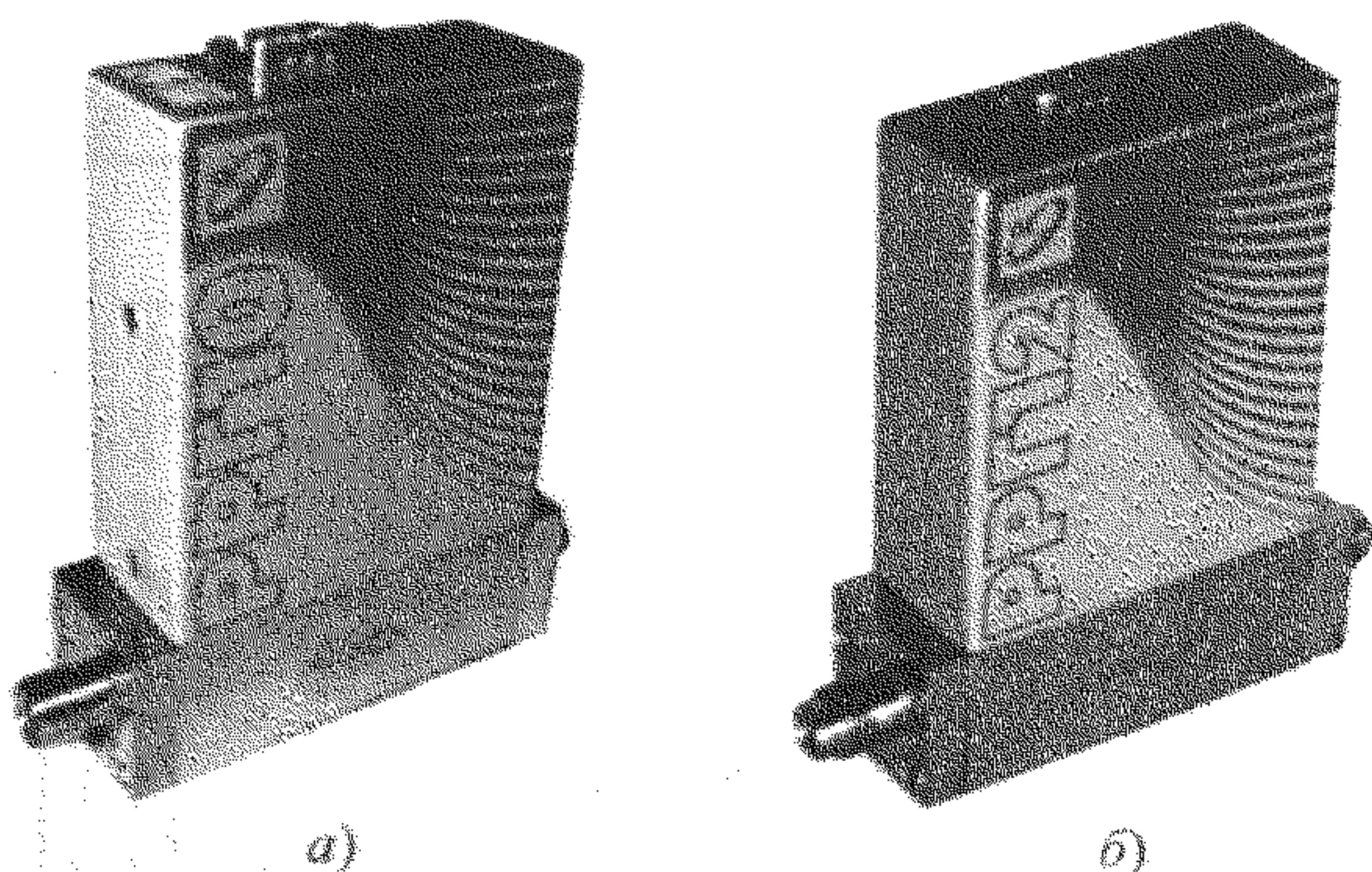


Рис. 7.32. Внешний вид регуляторов расхода газа РРГ-10 (а) и РРГ-12 (б)

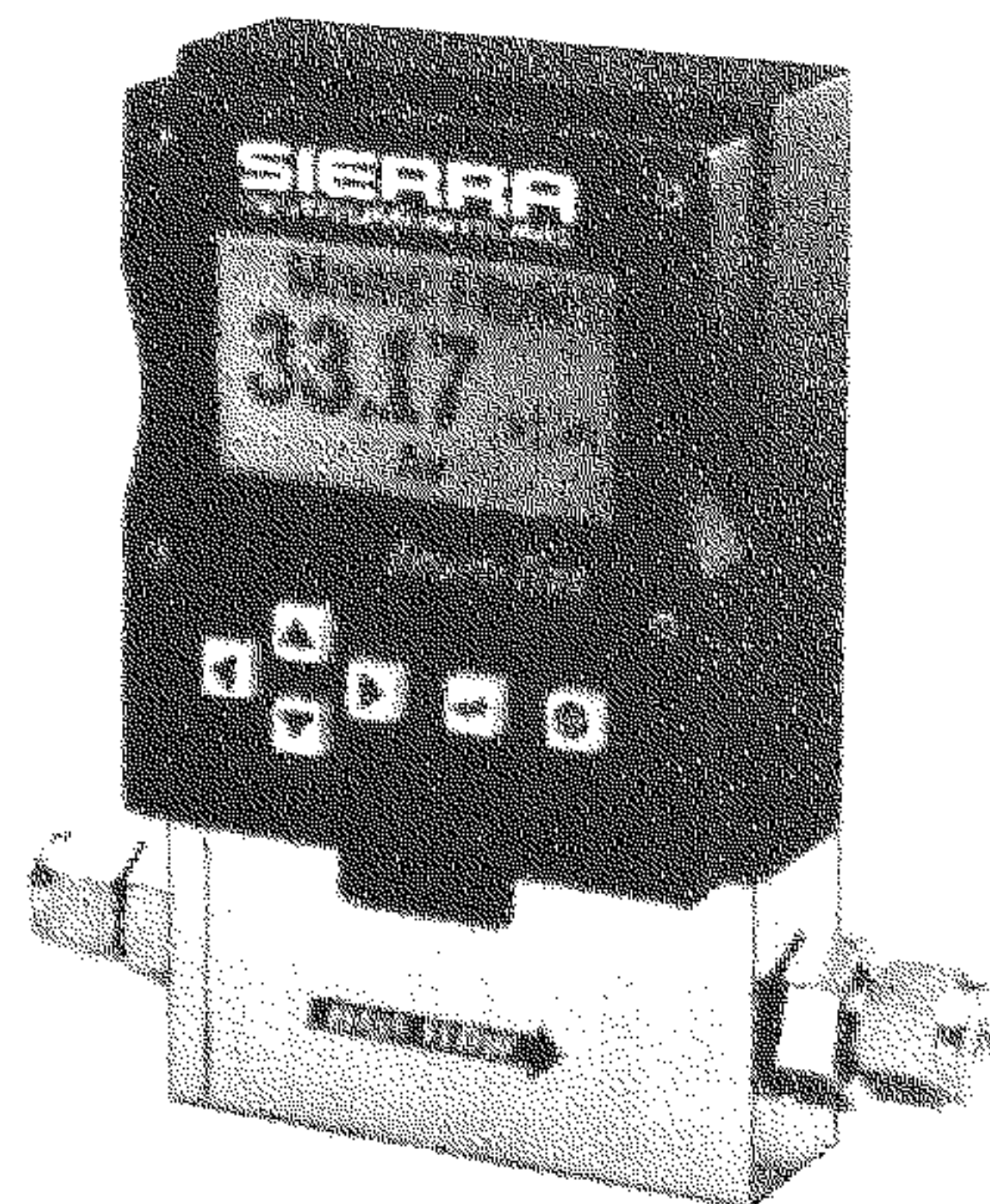


Рис. 7.33. Регулятор расхода газа компании Sierra Instruments, Inc.



## 7.19. Технические характеристики регуляторов расхода газа

Характеристика	Регулятор			
	РРГ-3*	РРГ-7*	РРГ-8	РРГ-9
Диаметр условного прохода, мм	4	4; 6; 8; 12; 16	4	2; 4
Верхний предел регулирования и преобразования расхода газа $Q_{в.п.}$ , $\text{дм}^3/\text{ч}$	3,6; 9; 18; 36; 90; 180; 360; 540; 720	900; 1800; 3600; 9000; 18 000; 36 000	0,36; 0,9	0,9; 3,6; 9; 18; 36; 90; 180; 360; 720; 900; 1800
Избыточное давление газа на входе, МПа	0,03...0,12	0,05...0,16	0,03...0,01	0,03...0,3
Систематическая составляющая приведенной основной погрешности, % от $Q_{в.п.}$ : преобразования расхода газа регулирования расхода газа	$\pm 1,1$	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,1$
	$\pm 1,1$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,1$
Линейность функции преобразования, %	$\pm 2$		$\pm 0,5$	
Быстродействие, с	10	15	2	
Напряжение питания от стабилизированных источников постоянного тока, В	$\pm 15$	$\pm 15$ ( $\pm 13$ ; $\pm 3$ )**	$\pm 15$	
Потребляемый от источников напряжения ток, А	0,2	0,1 (0,2)	0,2	
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т, никель, фторопласт-26, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1345	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-26, резиновая смесь ИРП-1345	Сталь 12Х18Н10Т, никель, фторопласт-26, резиновая смесь ИРП-1345	Сталь 12Х18Н10Т, никель, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1345
Наработка на отказ, ч	5000	3000	4000	15 000
Масса, кг	2,4	4,5	2,1	1,4

\* Имеет несколько типов соединений.

\*\* От нестабилизированных источников.

Примечания. 1. Управляющее напряжение задания 0...5 В.

2. Аналоговый сигнал при сопротивлении нагрузки  $> 2$  кОм равен 0...10 В.3. Поток натекания в окружающую среду при избыточном давлении 0,14 МПа составляет  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .4. Поток натекания в окружающую среду во внутреннюю полость при давлении  $10^{-3}$  МПа равен  $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

## 7.20 Технические характеристики регуляторов расхода газа РРГ-10, РРГ-12 и РРГ-300

Характеристика	РРГ-10	РРГ-12	РРГ-300
Верхний предел регулирования и преобразования расхода газа $Q_{a.n.}$ , л/ч	0,36; 0,9; 3,6; 9; 18; 36; 90; 180; 360; 720; 900; 1800		0,6; 3; 6; 12; 30; 60; 120
Систематическая погрешность, % от $Q_{a.n.}$ : преобразования расхода газа	$\pm 1,1$	$\pm 0,9$	$\pm 2,0$
регулирования расхода газа	$\pm 0,25$	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$
Линейность функции преобразования, % от $Q_{a.n.}$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$	$\pm 1,0$
Быстродействие (время установления показаний), с	2	2	$< 1$
Управляющее напряжение задания, В	0...5	0...5	—
Аналоговый выходной сигнал при сопротивлении нагрузки $> 2$ кОм, В	0...10 или 0...5		
Цифровое управление и выходная информация	Нет	По интерфейсу RS-232, RS-485 или USB	По интерфейсу RS-232 (RS-485)
Напряжение питания, В	$\pm 15$		
Потребляемый ток, А	0,2		
Избыточное давление газа на входе, МПа	0,03...0,3		
Герметичность, м <sup>3</sup> Па/с:			
по He	$1,3 \cdot 10^{-9}$		
РРГ с металлическим уплотнением	$1,3 \cdot 10^{-11}$		
Диаметр условного прохода, мм	4		
Материал, контактирующий с рабочей средой	Резина ИРП-1345, сталь 12Х18Н10Т, никель		
Средняя наработка на отказ, ч	15 000		
Габаритные размеры, мм	32×76×126		
Масса, кг	1,0		
	—		



жестко соединенного с клапаном 6 якоря 8, изготовленного из магнитного материала, и электромагнитной катушки 9.

С помощью катушки 9 якорь 8 втягивается в нее на расстояние  $l = 0,35$  мм и открывает доступ рабочего газа к отверстию седла 5. Упругая мембрана 7 возвращает клапан 6 в закрытое положение. Изменением соотношения длительностей нахождения клапана 6 в положениях «Открыто» и «Закрыто» регулируют поток рабочего газа, поступающего в технологическую камеру.

Регуляторы расхода газа РРГ-10 (усовершенствованный аналог РРГ-9М) и РРГ-12 (рис. 7.32) взаимозаменяемы с импортными аналогами компаний MKS Instruments Inc. (США), Bronkhorst (Нидерланды) и другими по габаритным, присоединительным, электрическим и основным техническим характеристикам. Регулятор РРГ-12 оснащен микропроцессорной схемой измерения и регулирования расхода газа и имеет цифровой и аналоговый выходы. Цифровое управление и выходная информация по интерфейсу RS-232, RS-485 или USB может работать в любых средах, конструкция штуцеров может быть изменена по требованию заказчика. Выпускаются регуляторы с резиновым и металлическим уплотнением штуцеров. Малогабаритный регулятор расхода газа РРГ-300 предназначен для работы в нейтральных средах. Технические характеристики РРГ-10, РРГ-12 и РРГ-300 приведены в табл. 7.20.

Компания Sierra Instruments, Inc. (Нидерланды) выпускает регулятор расхода газа с индикаторным блоком и шестью кнопками управления (рис. 7.33). Микропроцессор данного регулятора запрограммирован на 10 наиболее часто применяемых газов и имеет возможность перепрограммирования на другие газы.

**4. Регуляторы расхода реагента** (рис. 7.34 и табл. 7.21), предназначенные для регулирования расхода паров реаген-

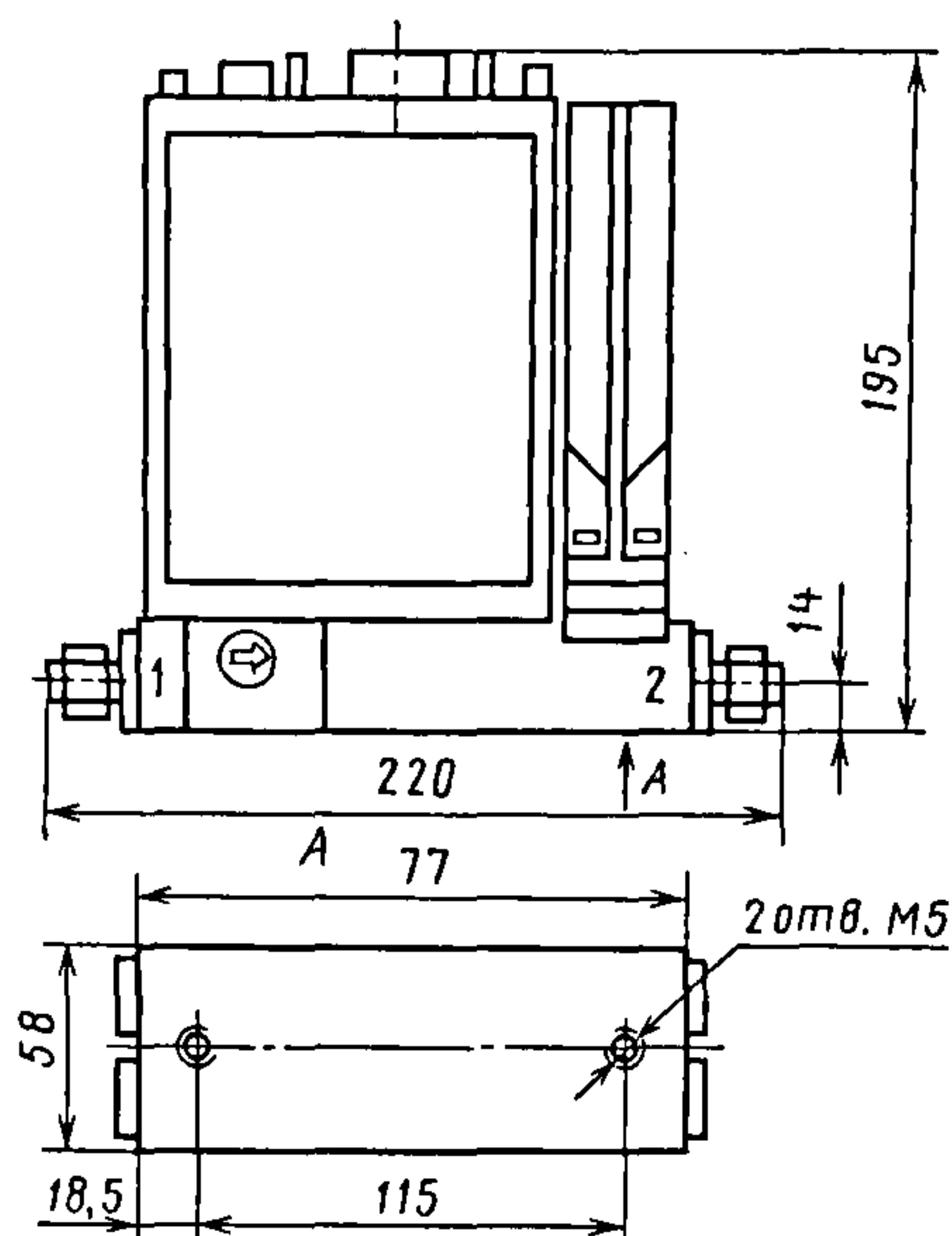


Рис. 7.34. Регулятор расход реагента типа РРР

тов независимо от их температуры и уровня исходного материала в испарителях.

**5. Регуляторы давления** (рис. 7.35 и табл. 7.22), рассчитанные на редуцирование и стабилизацию давления газов и их смесей.

На рис. 7.35 показана конструкция типового регулятора давления с чувствительным элементом в виде диафрагмы 5. Если пружина 8 не сжата, то клапан 3 под действием пружины 2 прижат к седлу 9 и газ, подводимый к входному каналу 1, не может поступить к выходному каналу 10. При настройке регулятора винтом 7 сжимают пружину 8, которая через шток 4 отжимает клапан 3 от седла 9, образуя кольцевую щель, через которую газ поступает в камеру 6 и далее к выходному каналу 10. При изменении давления газа в подводящей магистрали клапан 3, связанный с мембраной, перемещается, при этом изменяется проходное сечение кольцевой щели до наступления нового положения равновесия.

## 7.21. Технические характеристики регуляторов расхода реагента

Характеристика	Регулятор	
	PPP-1	PPP-2
Верхний предел расхода газа-носителя $Q_{в.п.}$ , $\text{дм}^3/\text{ч}$	540	9; 36; 90
Диапазон регулирования расхода реагента в зависимости от $Q_{в.п.}$ , $\text{мг/мин}$	150...1500	5...50; 20...200; 50...500; 0,03...0,12
Входное давление газа-носителя, МПа	0,07...0,12	0,03...0,12
Систематическая составляющая приведенной основной погрешности регулирования расхода реагента, % от $Q_{в.п.}$	$\pm 2$	$\pm 4$
Управляющее напряжение задания, В	0,5...5	0...5
Рабочая среда	$\text{SiCl}_4$ , газ-носитель $\text{H}_2$	$\text{BBr}_4$ , $\text{POCl}_3$ , $\text{PCl}_3$ , газ-носитель $\text{N}_2$
Наработка на отказ, ч	3000	4000
Масса, кг	3,3	3,5

Примечания. 1. Диаметр условного прохода 4 мм.

2. Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей приведенной основной погрешности регулирования расхода реагента  $\pm 0,5\%$  от  $Q_{в.п.}$ .

3. Время установления расхода реагента 1 мин.

4. Напряжение на входе при сопротивлении нагрузки  $> 2 \text{ кОм}$  равно 0...10 В.

5. Напряжение питания от источника постоянного тока  $\pm 0,15 \text{ В}$ .

6. Сила потребляемого тока 0,3 А.

7. Поток натекания в окружающую среду при избыточном давлении 0,2 МПа составляет  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

8. Поток натекания в окружающую среду во внутреннюю полость при давлении  $10^{-3} \text{ МПа}$  равен  $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

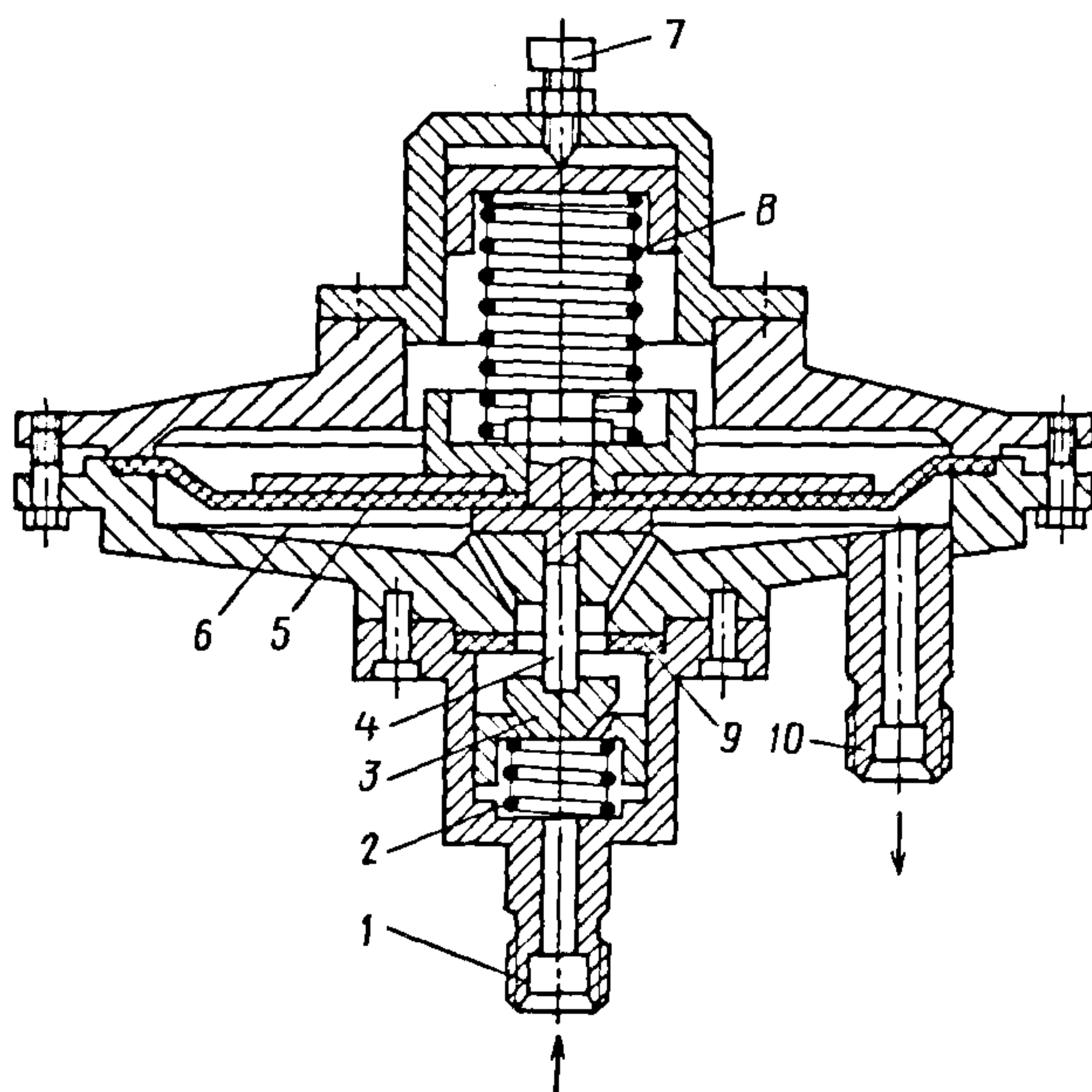


Рис. 7.35. Регулятор давления типа РДМ



7.22. Технические характеристики регуляторов давления газа и газовых смесей

Характеристика	Пневмо- управляе- мый кла- пан	Регуляторы давления		Регулятор давления- реле дав- ления	Регуляторы давления				РДМ-11	для агрессив- ных газовых смесей
		РДМ-1*	РДМ-4*		РДМ-7	РДМ-9	с высоким рабочим давлением	повышен- ной на- дежности		
Диаметр усло- вного прохода, мм	4		6; 8; 12; 16; 20	8		4			4	2; 4
Рабочее давле- ние, МПа:										
на входе	0...16	0,06...0,4		0...0,4	1,0...16,0	0,2...1,6	13,0...16,0	0,06...0,4	0,06...0,4	0,06...0,6
на выходе	0...0,4	0,01...0,1	0,06...0,3	0,02...0,1	0,02...0,3	0,2...0,4	0,1...4,0	0,02...0,1	0,02...0,02	0,02...1
Расход газа, дм <sup>3</sup> /ч	1800	3600	1800; 3600; 9000; 18 000; 36 000	3600	900		3600		9000; 18 000	360; 3600
Поток натека- ния, м <sup>3</sup> ·Па·с <sup>-1</sup> ; через затвор	1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-8</sup>		1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-8</sup>		1,3·10 <sup>-9</sup>		1,3·10 <sup>-8</sup>	1,3·10 <sup>-9</sup>
в окружаю- щую среду	1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-7</sup>								
из окружаю- щей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании	1,3·10 <sup>-11</sup>	5·10 <sup>-8</sup>		1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-8</sup>				1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-11</sup>
Наработка на отказ, ч	800 000	10 000			5000	10 000	300 000		10 000	
Материал, кон- тактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т, фторо- пласт-4, резиновые смеси 51-1481, 51-1578	Сталь 12Х18Н10Т, резиновые смеси 51-1481, 51-1578	Сталь 12Х18Н10Т, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1225 и фторо- пласт-4	Сталь 12Х18Н10Т, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1345	Сталь 12Х18Н10Т, резиновая смесь ИРП-1345	Сталь 12Х18Н10Т, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1345			Сталь 12Х18Н10Т, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1345	Сталь 03Х17Н14М3, резиновые смеси 51-1481, ИРП-1345
Масса, кг	2,08	1,0	2,0	1,85	1,02	0,9	1,75	2,0	1,12	0,75

\* Имеет несколько типов соединения.

Технические характеристики регуляторов давления РДМ-21 (рис. 7.36), РДМ-23 и РДМ-24 приведены в табл. 7.23. В РДМ-21 разделение внутреннего объема и внешней среды осуществляется металлической мембраной, РДМ-23 оснащен предохранительным клапаном, а РДМ-24 по требованию заказчика может изготавливаться в виде модификации для аммиачных сред;

электронные датчики и регуляторы давления (рис. 7.37 и табл. 7.24) предназначены для преобразования избыточного давления технологической среды в пропорциональный электрический сигнал и поддержания давления на заданном уровне; вентили (рис. 7.38 и табл. 7.25) рассчитаны на коммутацию и регулирование потоков газов и их смесей;

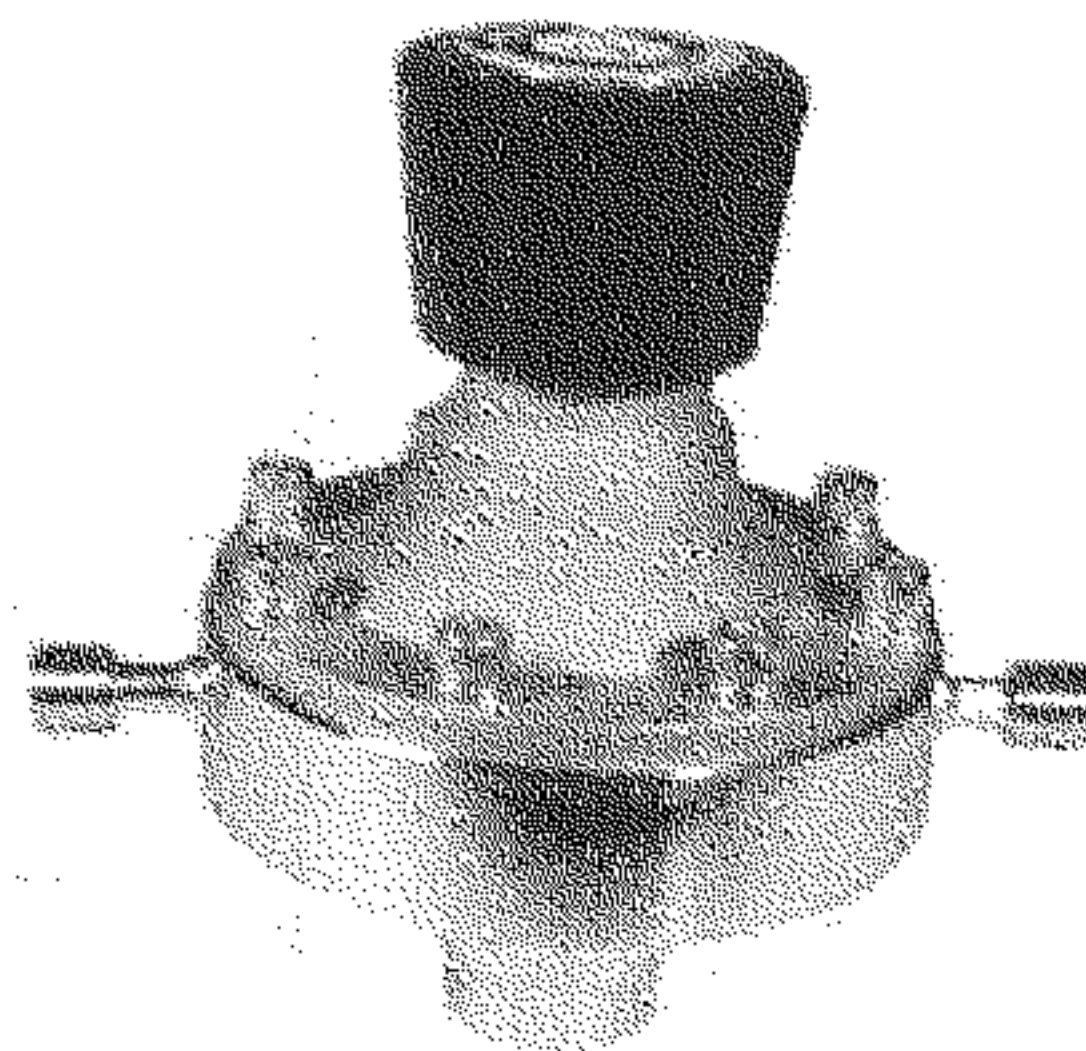


Рис. 7.36. Внешний вид регулятора давления РДМ-21

элементы контроля давления: индикаторы давления газов и их смесей (рис. 7.39 и табл. 7.26); однопозиционные реле (рис. 7.40 и табл. 7.27) служат для сигнализации о наличии заданного избыточного давления газов и их смесей;

двухпозиционные реле (рис. 7.41 и табл. 7.28) предназначены для сигнализации о наличии заданного верхнего и нижнего пределов избыточного давления газов и их смесей;

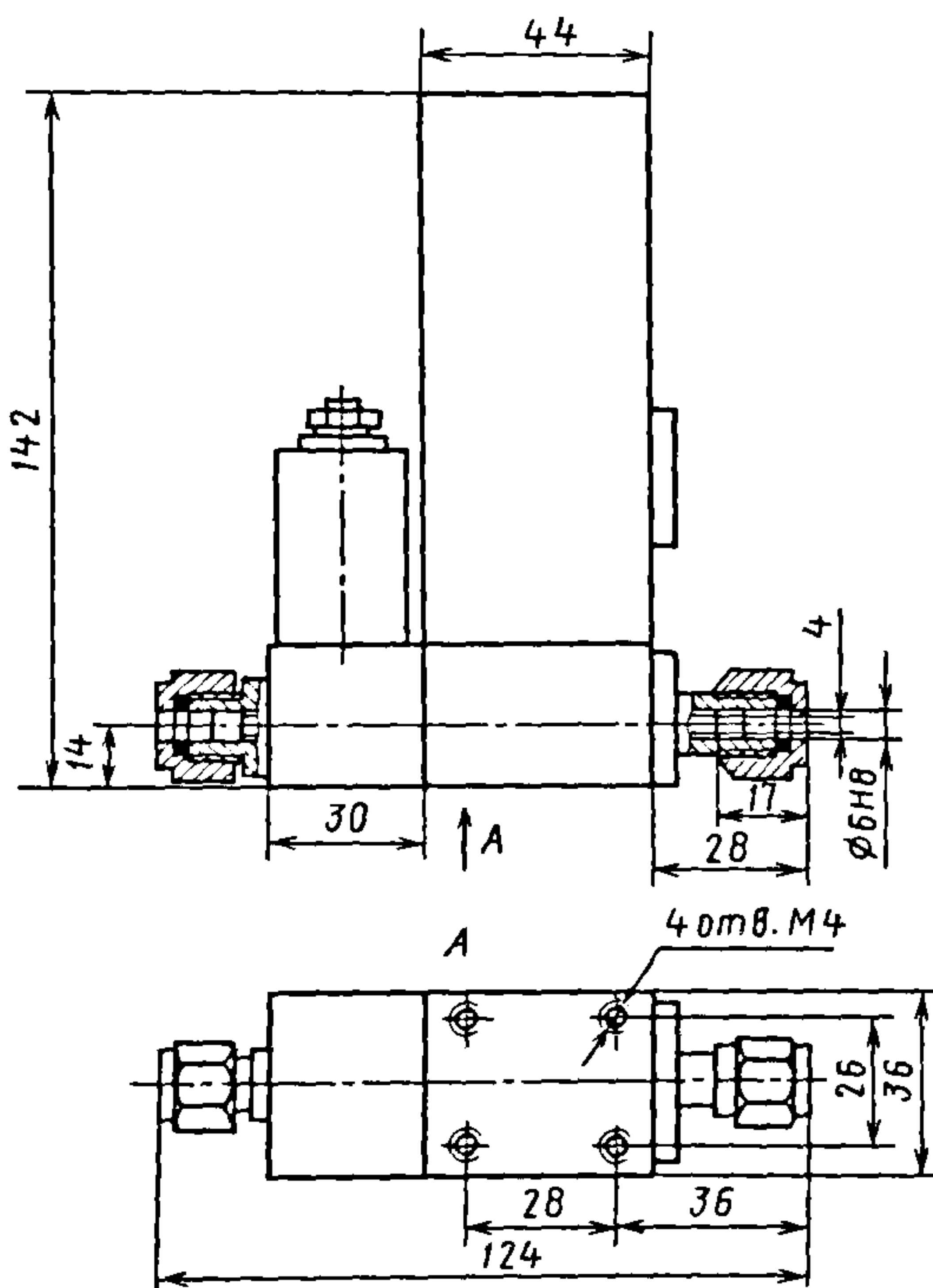


Рис. 7.37. Электронный регулятор давления

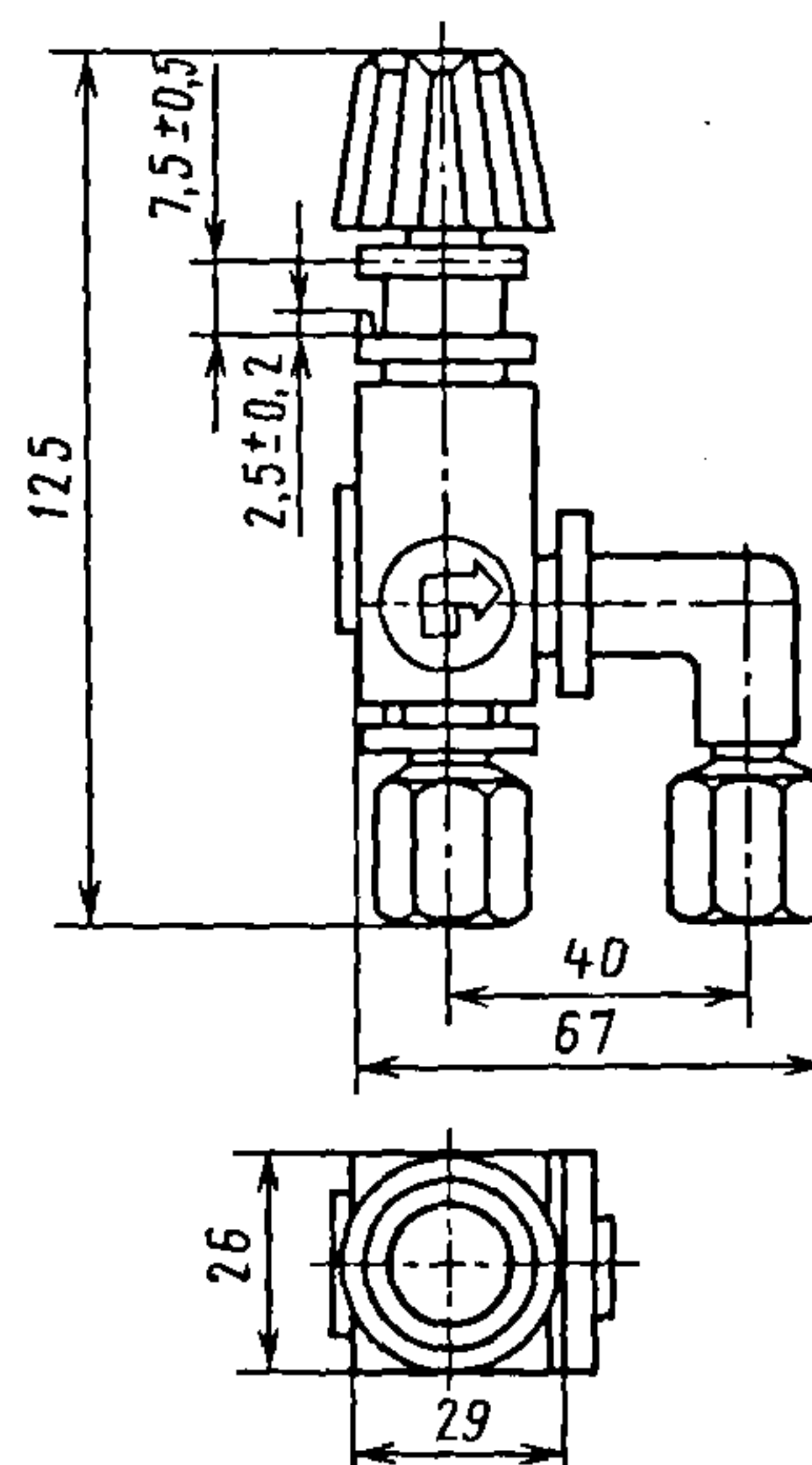


Рис. 7.38. Вентиль, предназначенный для коммутации и регулирования потоков газов и их смесей



**7.23. Технические характеристики регуляторов давления РДМ-21, РДМ-23 и РДМ-24**

Характеристика	РДМ-21	РДМ-23	РДМ-24
Диаметр условного прохода, мм	4		
Давление, МПа:			
на входе	0,2...16,0		0,06...0,6
на выходе	0,02...0,4		0,02...0,2
срабатывания предохранительного клапана	—	0,5...0,6	—
Расход газа, л/ч	3600	900	3600
Герметичность по гелию, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$		
Средняя наработка на отказ, ч	10 000		
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т, фторопласт-40	Сталь 12Х18Н10Т, резина ИРП-1345	
Масса, кг	2,3	0,9	0,8

**7.24. Технические характеристики электронного датчика и регулятора давления**

Характеристика	Датчик	Регулятор
Диаметр условного прохода, мм	4	
Рабочее давление, МПа	0...0,4	
Электрический выходной сигнал, В	0...10	
Напряжение питания постоянного тока, В	$\pm 15$	
Погрешность преобразования давления, %	$\pm 1,5$	
Расход газа, $\text{дм}^3 / \text{ч}$	—	1800
Поток натекания из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т и титановый сплав	
Масса, кг	0,8	1

**7.25. Технические характеристики вентилей**

Характеристика	Исполнение вентилей		
	I*	II*	III
Диаметр условного прохода, мм	4; 6; 8	12; 16; 20	2; 4
Рабочее давление, МПа	0,5		0,6
Расход газа, дм³/ч	9000	36 000	1800
Поток натекания, м³·Па·с⁻¹: через затвор	1,3·10⁻⁹	1,3·10⁻⁸	1,3·10⁻⁹
в окружающую среду			1,3·10⁻¹¹
из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании			
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, фторопласт-4, резиновая смесь 51-1481		Сталь 03Х17Н14М3, фторопласт-40
Наработка на отказ, ч	25 000		300 000
Масса, кг	0,5	0,95	0,25

\* Имеет несколько типов соединения.

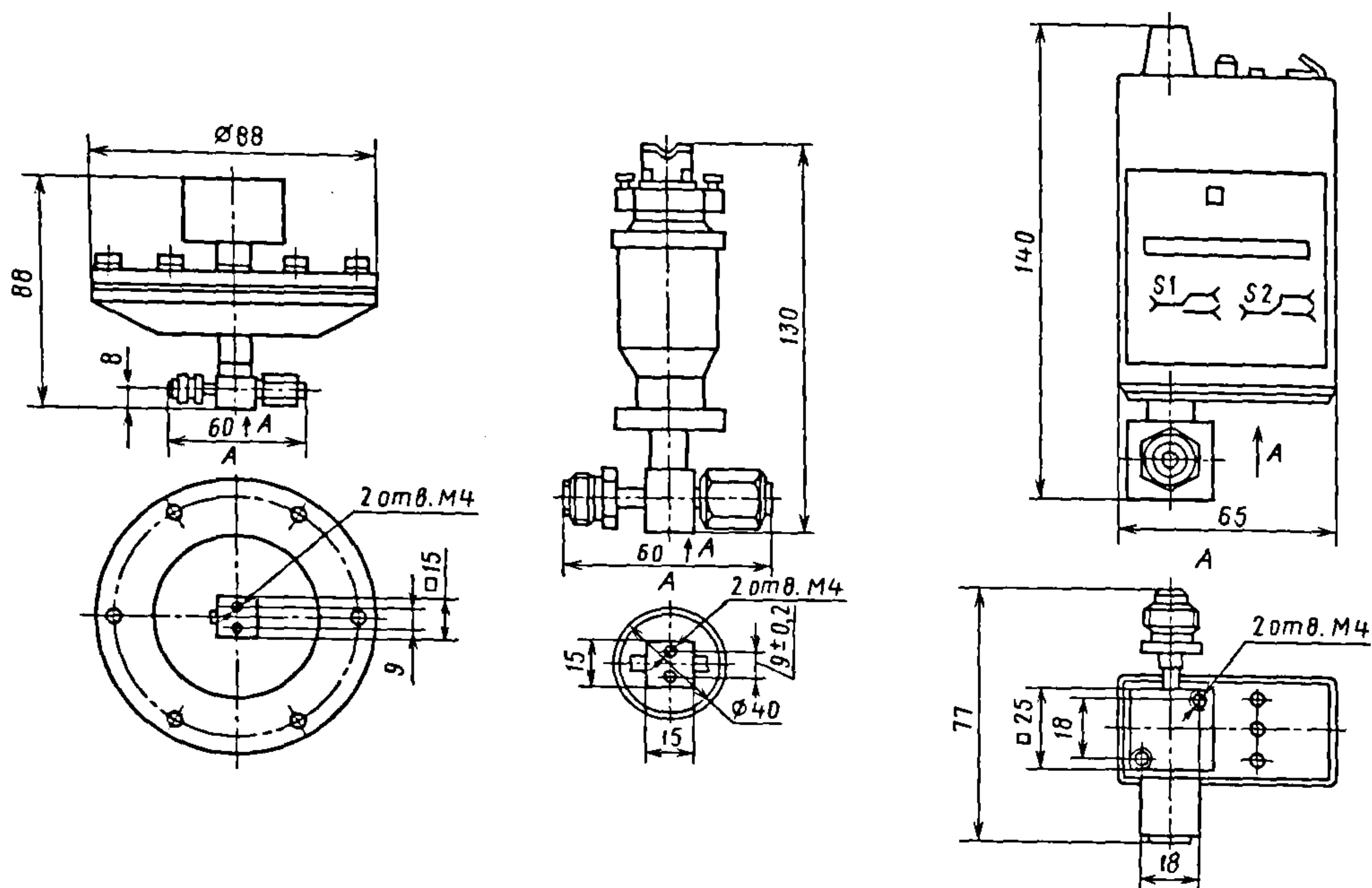


Рис. 7.39. Индикатор давления

Рис. 7.40. Однопозиционное реле давления

Рис. 7.41. Двухпозиционное реле давления

## 7.26. Технические характеристики индикаторов давления газов и их смесей

Характеристика	Индикатор исполнения					
	I	II	III	IV	V	VI
Диаметр условного прохода, мм	—	2; 4	4; 8		2; 4	
Рабочее давление, МПа	0,6; 2,5; 16	0,1; 0,6; 2,5; 16	0,16; 0,4	0,16		
Выходной сигнал, В	0...10	—				
Поток натекания, м <sup>3</sup> ·Па·с <sup>-1</sup> : в окружающую среду	—	1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-11</sup>	1,3·10 <sup>-9</sup>		
из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании		1,3·10 <sup>-11</sup>		1,3·10 <sup>-9</sup>	1,3·10 <sup>-11</sup>	
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12Х18Н10Т, титан, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345	Сталь 03Х17Н14М3	Сталь 12Х18Н10Т, резиновая смесь 51-1481 и ИРП-1345	Сталь 12Х18Н10Т, титан, резиновая смесь ИРП-1345	Сталь 03Х17Н14М3, никель	Сталь 12Х18Н10Т, титан, резиновая смесь ИРП-1345
Наработка на отказ, ч	15 000	30 000				
Масса, кг	0,42	0,45	1,2	0,99	1,5	0,3



**7.27. Технические характеристики однопозиционных реле давления**

Характеристика	Реле исполнения	
	I	II
Диаметр условного прохода, мм	4	2; 4
Рабочее давление, МПа	0,01...0,1	±0,1
Наработка на отказ, ч	10 000	30 000
Масса, кг	0,79	0,3

Примечания. 1. Поток натекания в окружающую среду  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

2. Поток натекания из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании  $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

3. Материал, контактирующий с рабочей средой, – сталь 03Х17Н14М3.

**7.28. Технические характеристики двухпозиционных реле давления**

Характеристика	Реле исполнения				
	I	II	III	IV	V
Диаметр условного прохода, мм	6	4	4; 8	2; 4	2; 4
Рабочее давление, МПа	0,006...0,1; 0,035...0,6	0,006...0,1	0,035...0,6		0,01...0,1
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12X18H10T	Сталь 03X17H14M3			
Наработка на отказ, ч	10 000			30 000	10 000
Масса, кг	0,37	0,6	0,44	0,38	0,4

Примечания. 1. Поток натекания в окружающую среду  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

2. Поток натекания из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании  $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ .

фильтры применяются для микроочистки газов и их смесей (рис. 7.42 и табл. 7.29); микроочистки и охлаждения отработанных газов и их смесей (рис. 7.43 и табл. 7.30);

**7.29. Технические характеристики фильтров микроочистки**

Характеристика	Фильтры		
	ФГФ-500	ФГФ-1000	патронные
Диаметр условного прохода, мм	4	6	12
Расход газа по воздуху, $\text{дм}^3/\text{ч}$	500	1000	20 000
Рабочее давление, МПа	0,1		0,6
Перепад давления, МПа	0,025		0,03
Поток натекания при контроле гелиевым течеискателем, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-8}$		$1,3 \cdot 10^{-9}$
Материал, контактирующий с рабочей средой	Фторопласт-40, -26		Сталь 03Х17Н13М3, фторопласт-15
Тип фильтрующего элемента	Дисковые мембраны		–

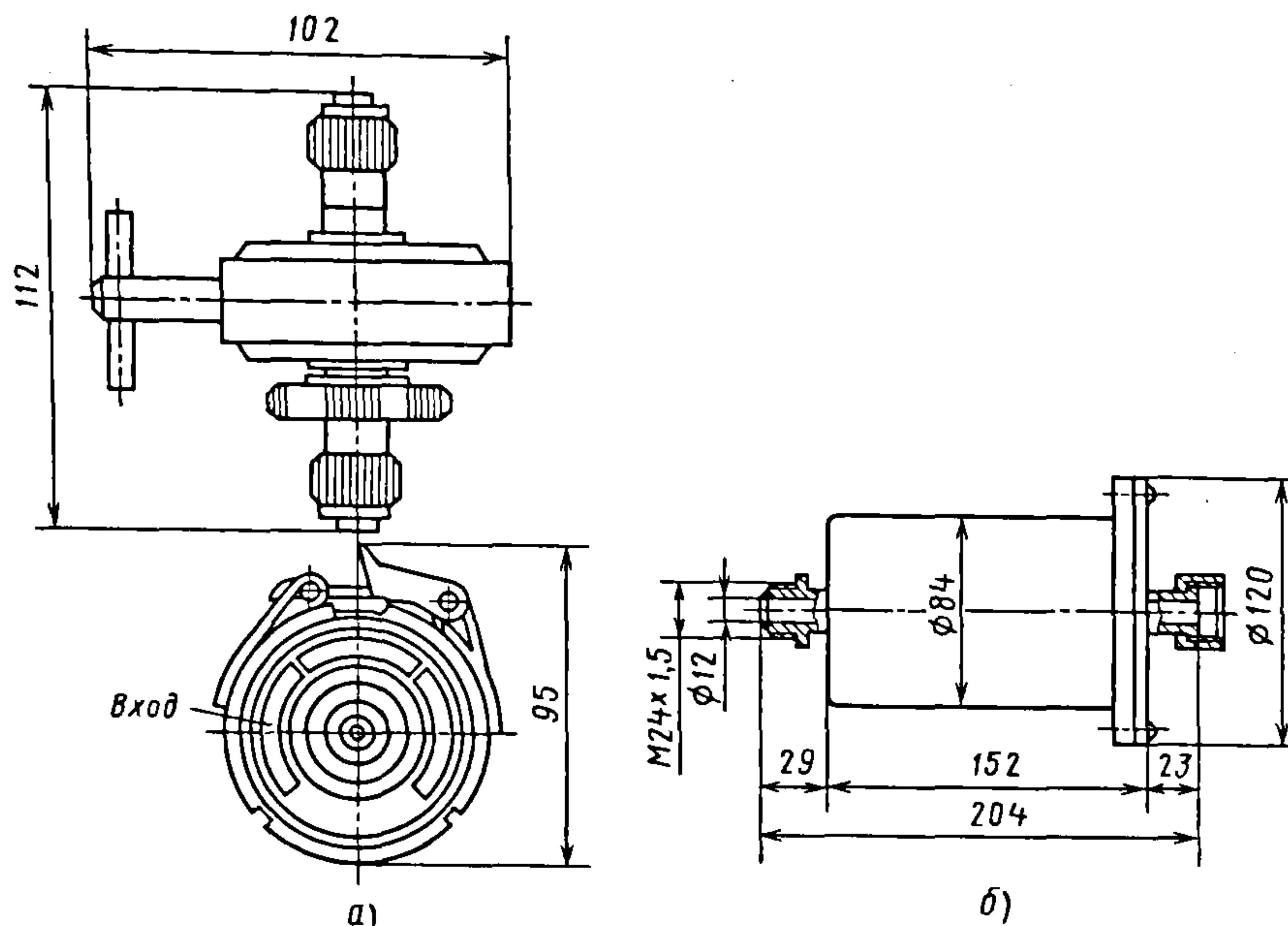


Рис. 7.42. Фильтры микроочистки:  
а – ФГФ-1000; б – патронного типа

### 7.30. Технические характеристики фильтров микроочистки и охлаждения (см. рис. 7.43)

Характеристика	Фильтр исполнения	
	I	II
Диаметр условного прохода, мм	40; 63	40; 63
Присоединительные размеры, мм:		
$d$	60	40
$D_1$	63,1	41,1
$D$	80	55
Масса, кг	5	8

Примечания. 1. Рабочее давление 0,1...13,3 МПа.

2. Поток натекания из окружающей среды  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$ .

3. Материал, контактирующий с окружающей средой, – сталь 12Х18Н10Т.

фильтродержатели (рис. 7.44 и табл. 7.31) рассчитаны на размещение в них дисковых фильтрующих элементов, в комплекте с которыми используются для фильтрации газов и их смесей;

присоединительные элементы: тройники (рис. 7.45 и табл. 7.32), крестовины, уголки, разъемы, ниппели и прокладки служат для монтажа газовых и вакуумных систем.

Для повышения возможностей управления газовыми потоками в вакуумном технологическом оборудовании предназначен цифровой дросселирующий клапан серии 61 (рис. 7.46) фирма VAT (Швейцария). Клапан монтируется на патрубке высоковакуумной откачки (см. рис. 7.26) и позволяет дросселировать поток газа, выходящего из вакуумной камеры. Он выполнен как блок, в котором объединены привод заслонки и система управления.



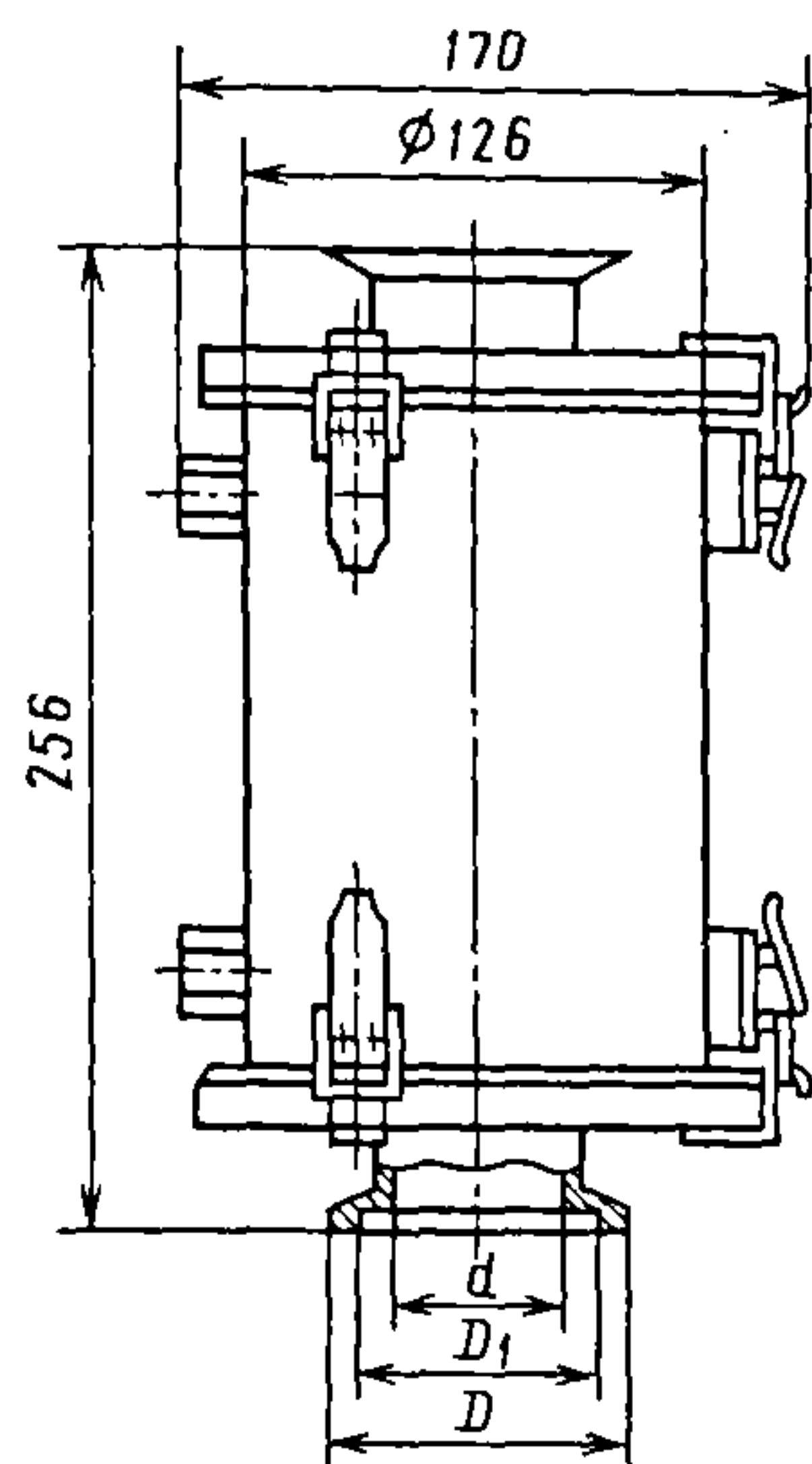


Рис. 7.43. Фильтр микроочистки и охлаждения

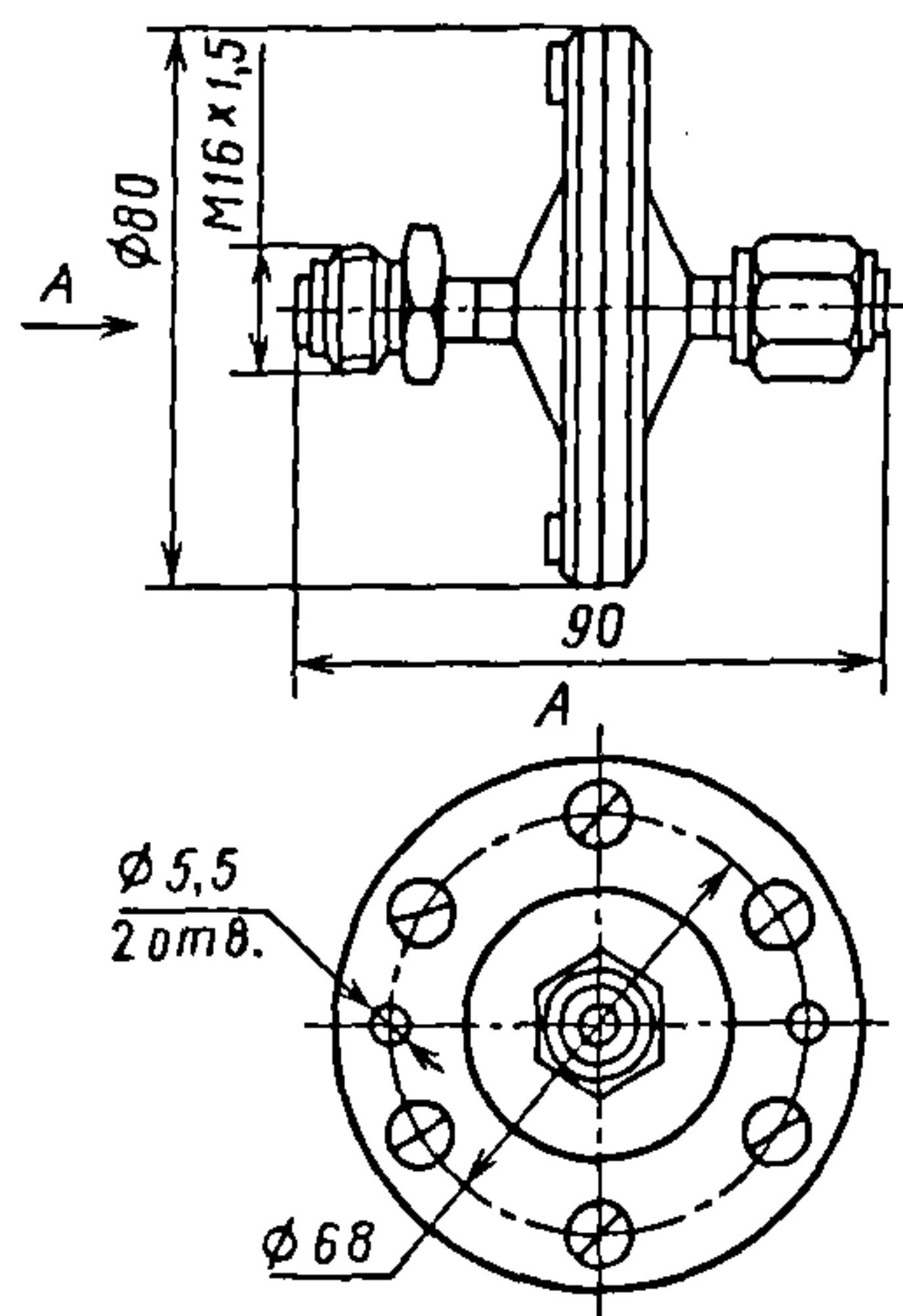


Рис. 7.44. Фильтродержатель

## 7.31. Технические характеристик фильтродержателей (рис. 7.44)

Характеристика	Фильтродержатель исполнения				
	I	II	III	IV	V
Диаметр условного прохода, мм	4		8	2; 4	
Диаметр фильтрующего элемента, мм	25	47	142	25	47
Число фильтрующих элементов, шт	1		2		
Поток натекания, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ :	$1,3 \cdot 10^{-9}$		$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	
в окружающую среду				$1,3 \cdot 10^{-11}$	
из окружающей среды во внутреннюю полость при ее вакуумировании	$1,3 \cdot 10^{-11}$			$1,3 \cdot 10^{-11}$	
Материал, контактирующий с рабочей средой	Сталь 12X18H10T, фторопласт-26 и -40	Сталь 12X18H10T, резина 51-1481	Сталь 03X17H14M3, фторопласт-26	Сталь 03X17H14M3, никель, фторопласт-40	
Наработка на отказ, ч	300 000		—	300 000	
Масса, кг	0,55		8,6	0,6	1,2

Примечание. Рабочее давление 0,6 МПа.

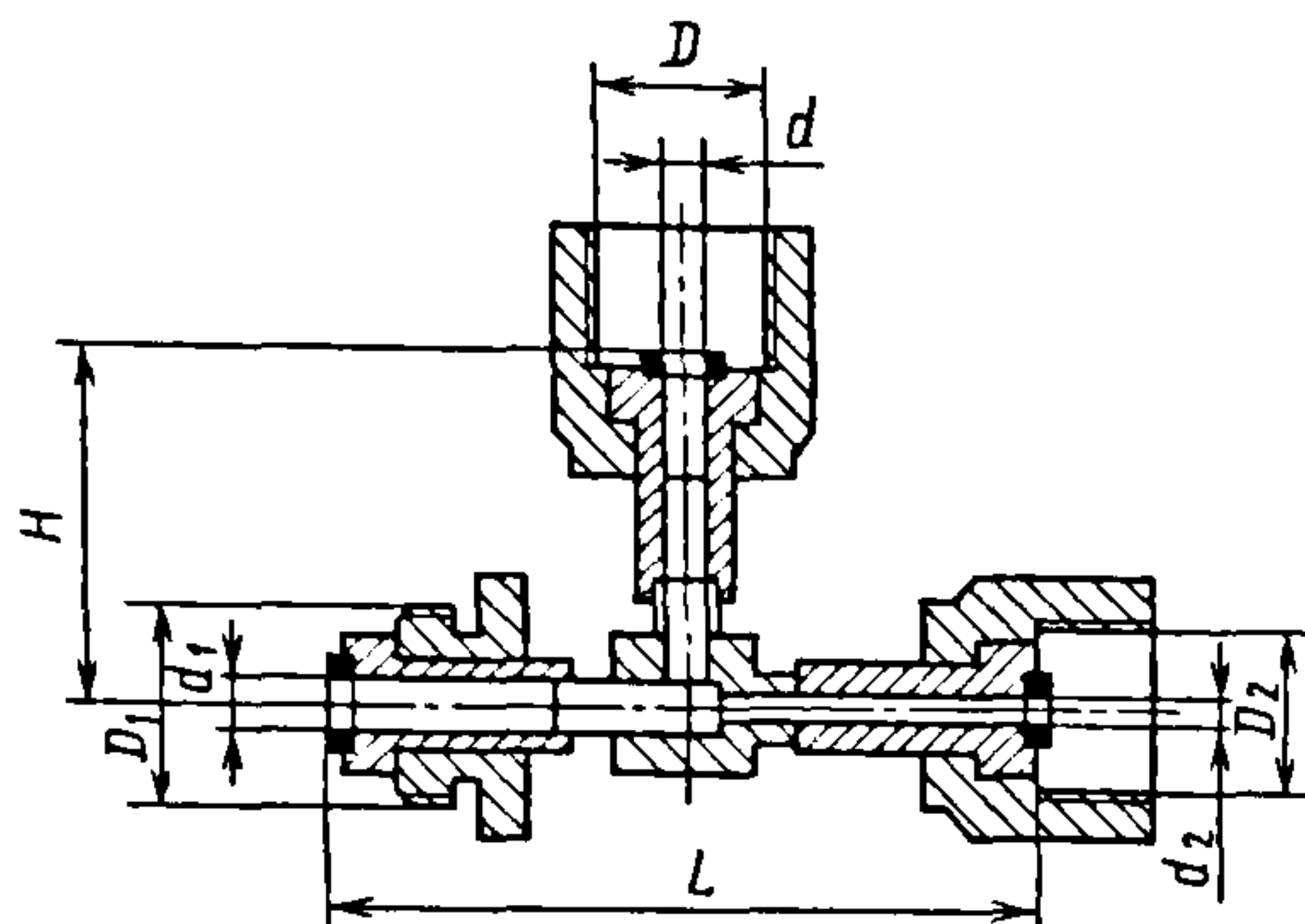


Рис. 7.45. Тройники

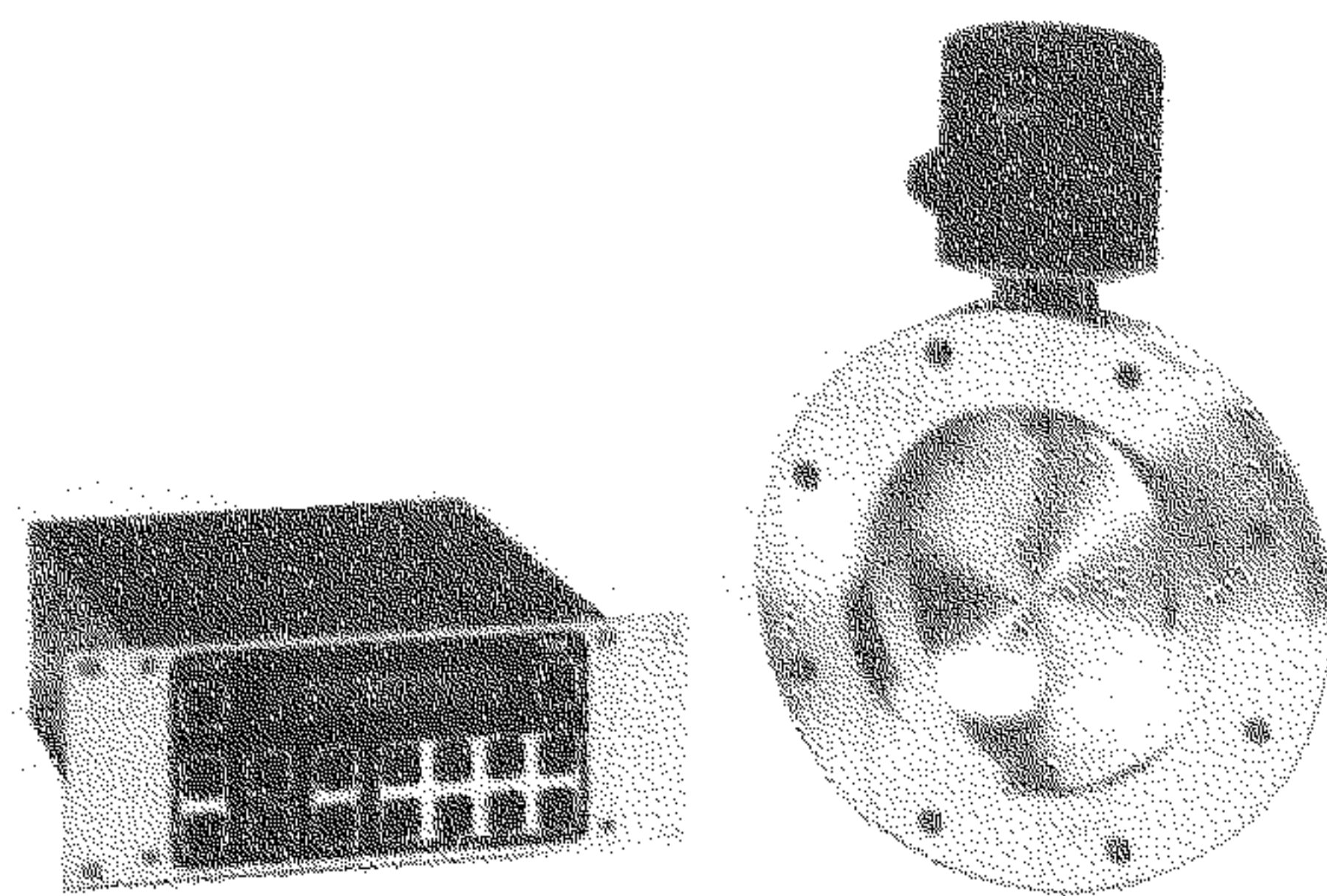


Рис. 7.46. Внешний вид цифрового дроселирующего клапана серни 61 фирмы VAT (Швейцария)

## 7.32. Размеры тройников, мм (рис. 7.45)

Исполнение тройника	$d$	$d_1$	$d_2$	$D$	$D_1$	$D_2$	$L$	$H$
I	4	8	4	M16×1,5	M20×1,5	M16×1,5	72	36
II	8	4		M20×1,5	M16×1,5			

ГС выпускаются и в виде стандартных газовых линеек (рис. 7.47, а), включающих в себя входной кран, фильтр, регулятор давления, манометр, регулятор расхода газа и выходной пневмоклапан, и в произвольной конфигурации с любым числом газовых каналов под конкретные требования заказчика. Элементы ГС располагаются на металлической панели и соединяются трубопроводами из коррозионно-стойкой стали с внутренней электрополировкой. Панель может помещаться в металлический шкаф, образуя законченный газовый блок (рис. 7.47, б), либо непосредственно встраиваться в технологическое оборудование.

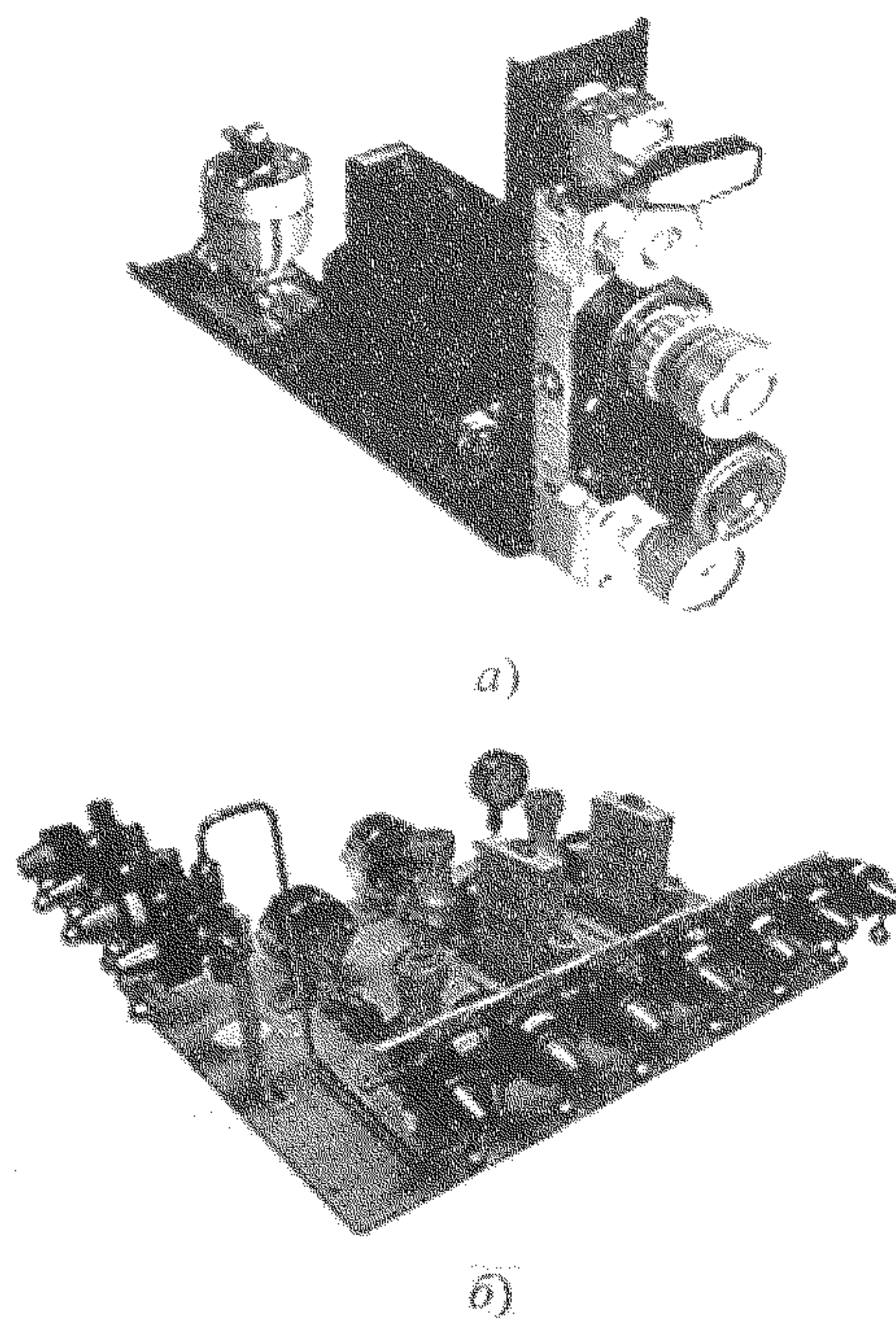


Рис. 7.47. Стандартная газовая линейка (а) и законченный газовый блок (б)



---

## Глава 8

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ УСТАНОВОК

---

### 8.1. ВВОДЫ ДВИЖЕНИЙ В ВАКУУМ

Для передачи движения механизмам и узлам, находящимся в вакуумных камерах технологических установок, используют вакуумные вводы. Движение в вакуумную камеру можно передавать через отверстие в стенке или через сплошную стенку вакуумной камеры. Принципиальные схемы вакуумных вводов приведены в табл. 8.1.

Основные элементы механизма передачи движения через отверстие – сплош-

ной вал или шток, проходящий из окружающей среды с атмосферным давлением и передающий требуемую силу или крутящий момент и уплотнение, герметизирующее зазор между отверстием и подвижным валом. Механические вакуумные вводы для передачи движения через отверстие применяют обычно в динамических вакуумных системах, так как они обладают значительным газовыделением. Эти вводы позволяют передавать практически любые силы и крутящие моменты и обеспечивать высокие кинематическую точность и жесткость.

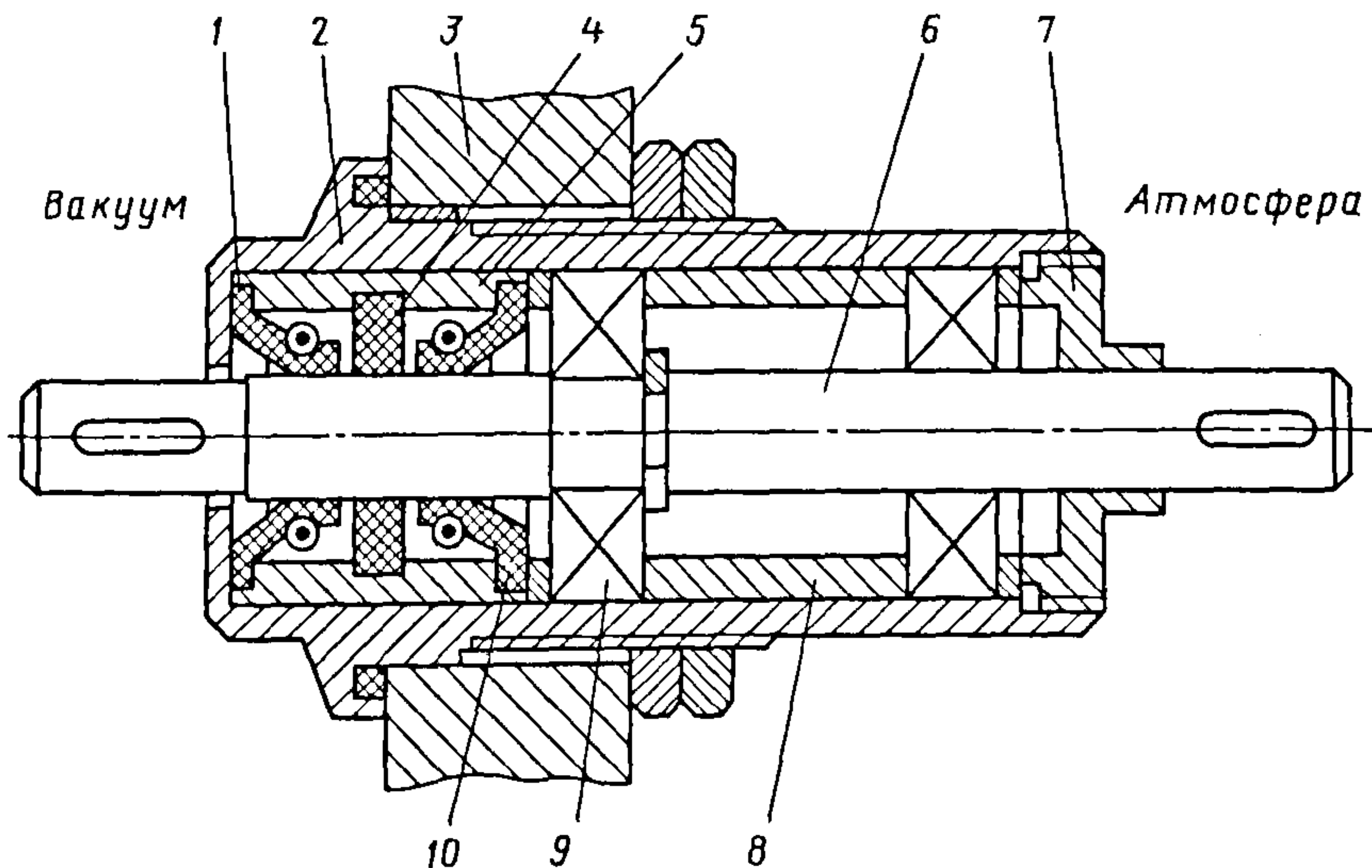
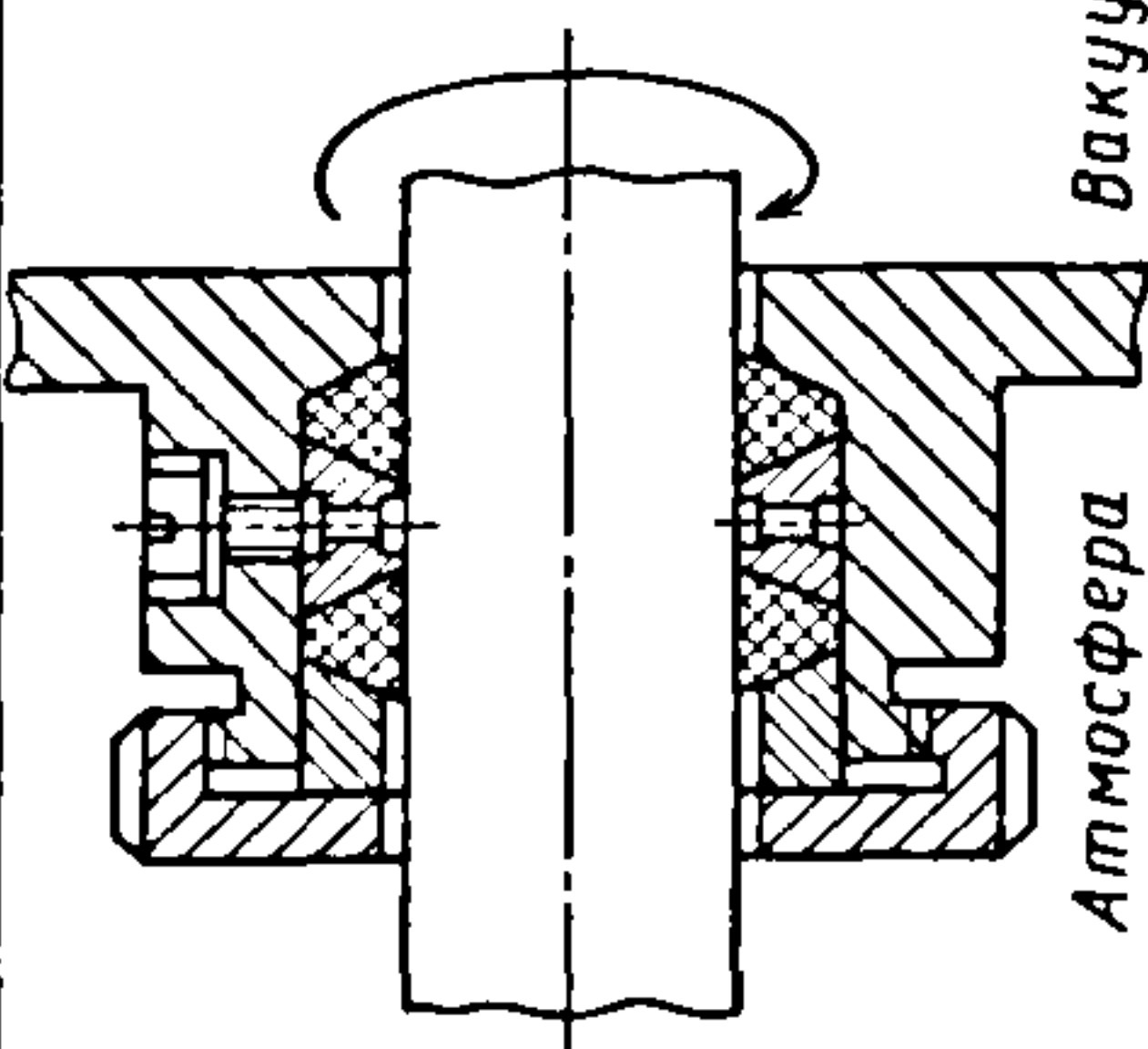
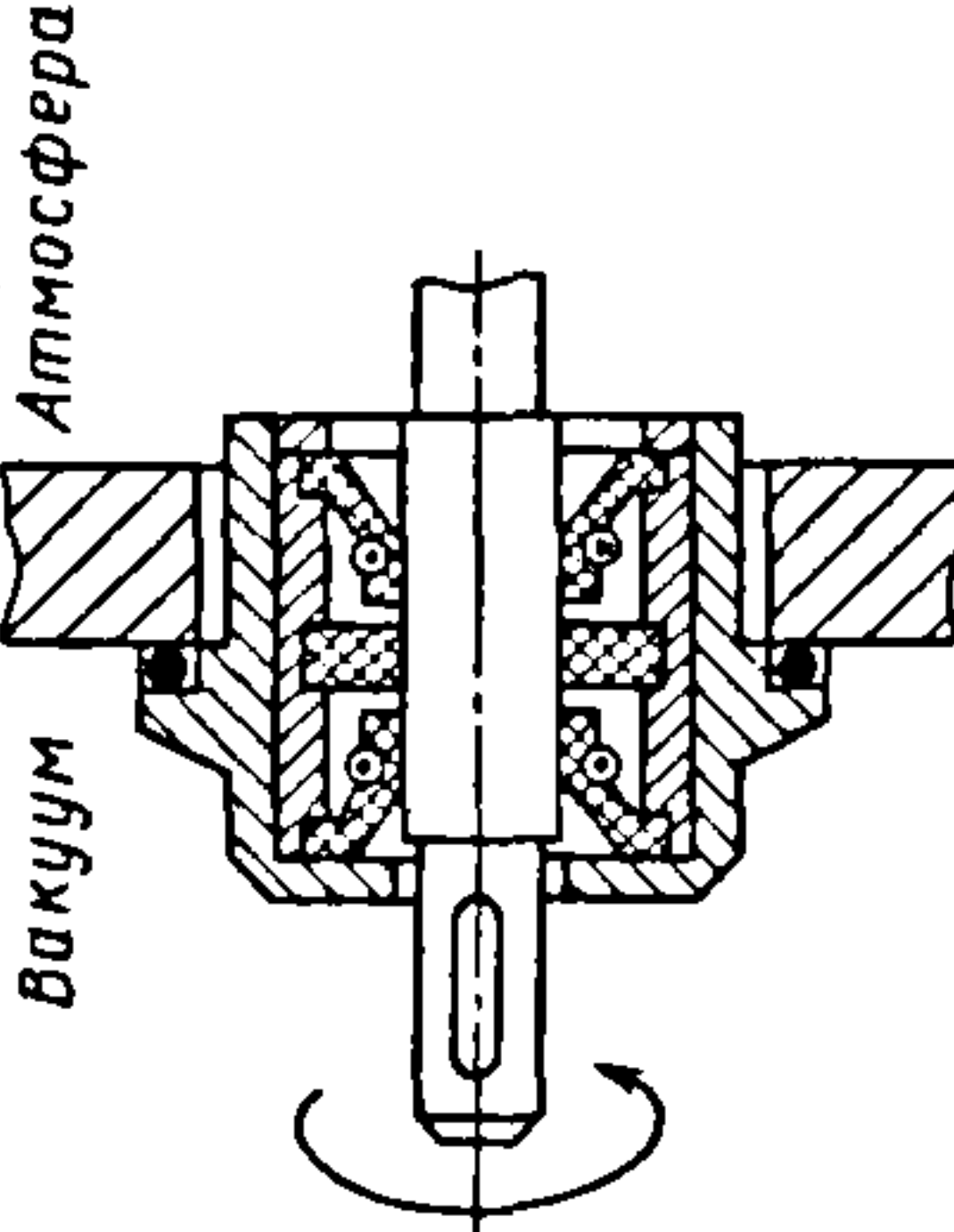
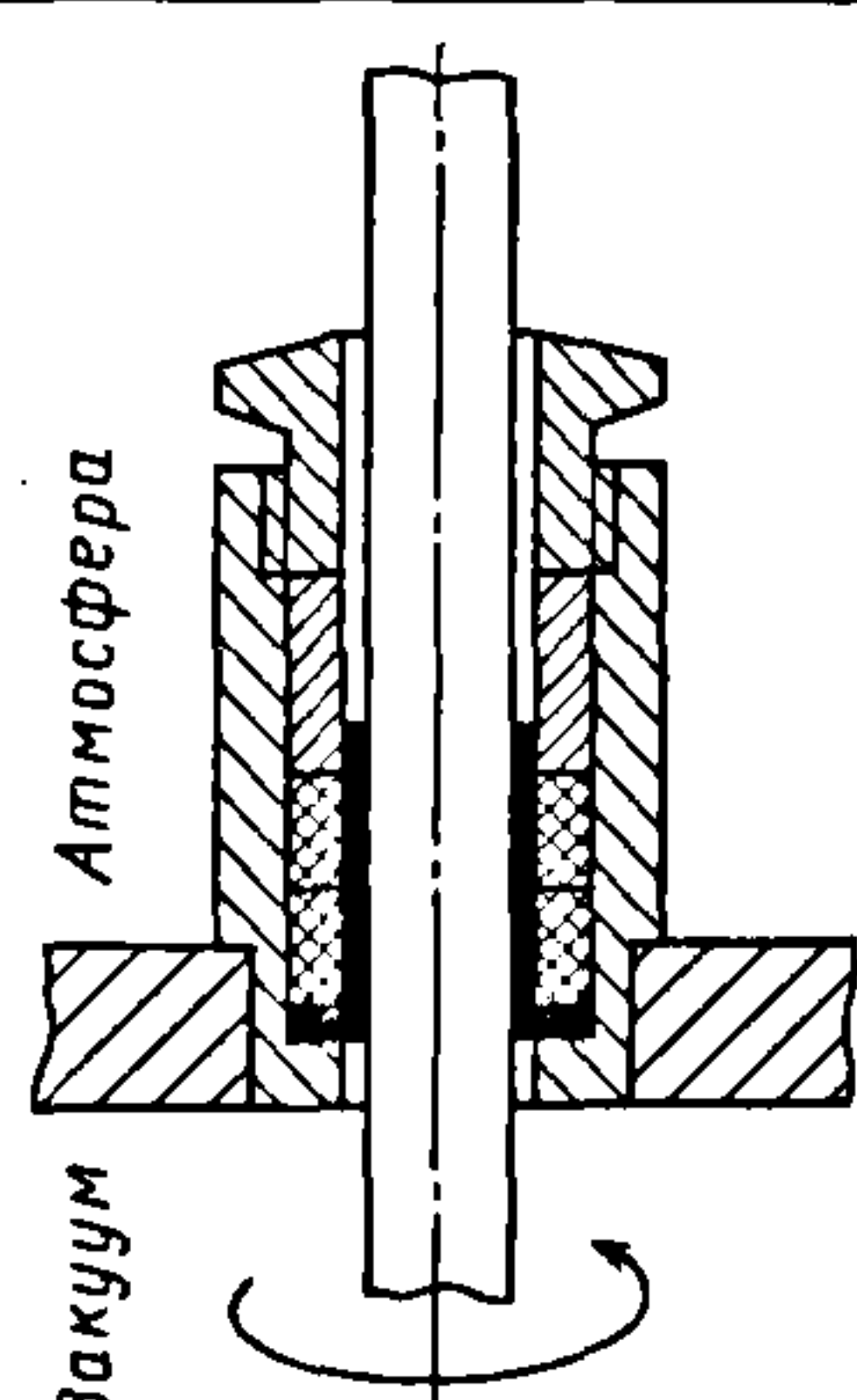
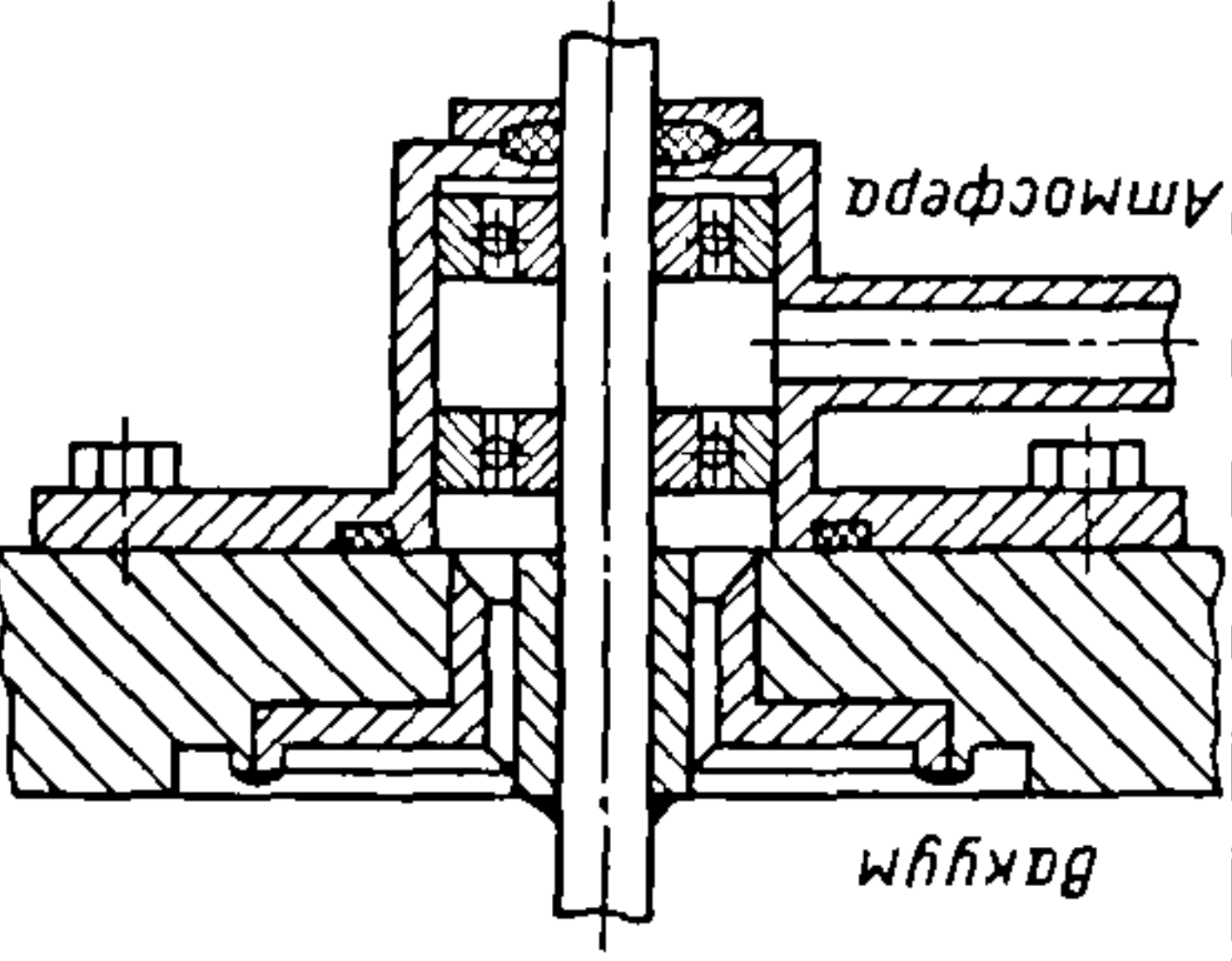
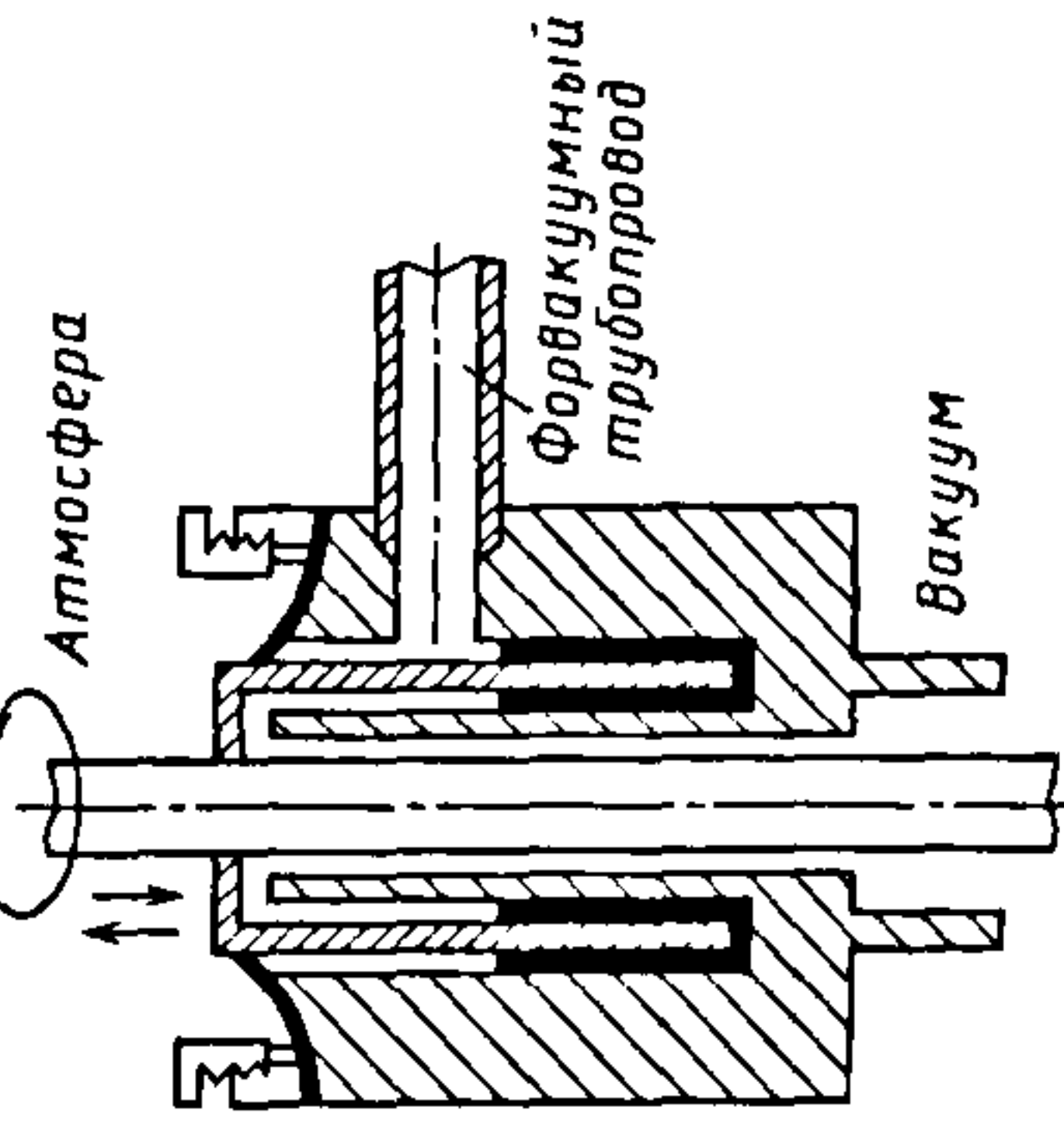
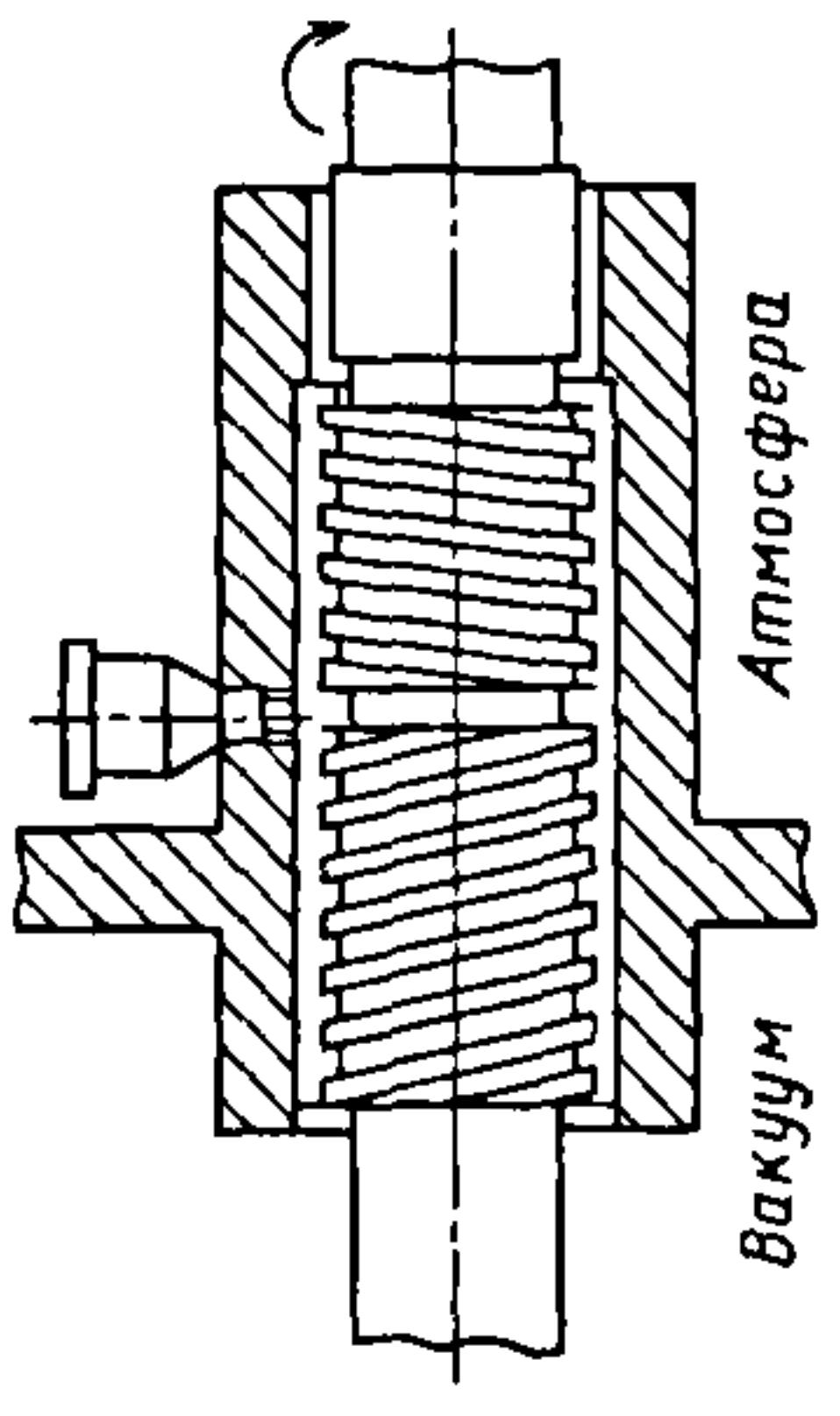


Рис. 8.1. Сальниковый ввод вращения с манжетным уплотнением

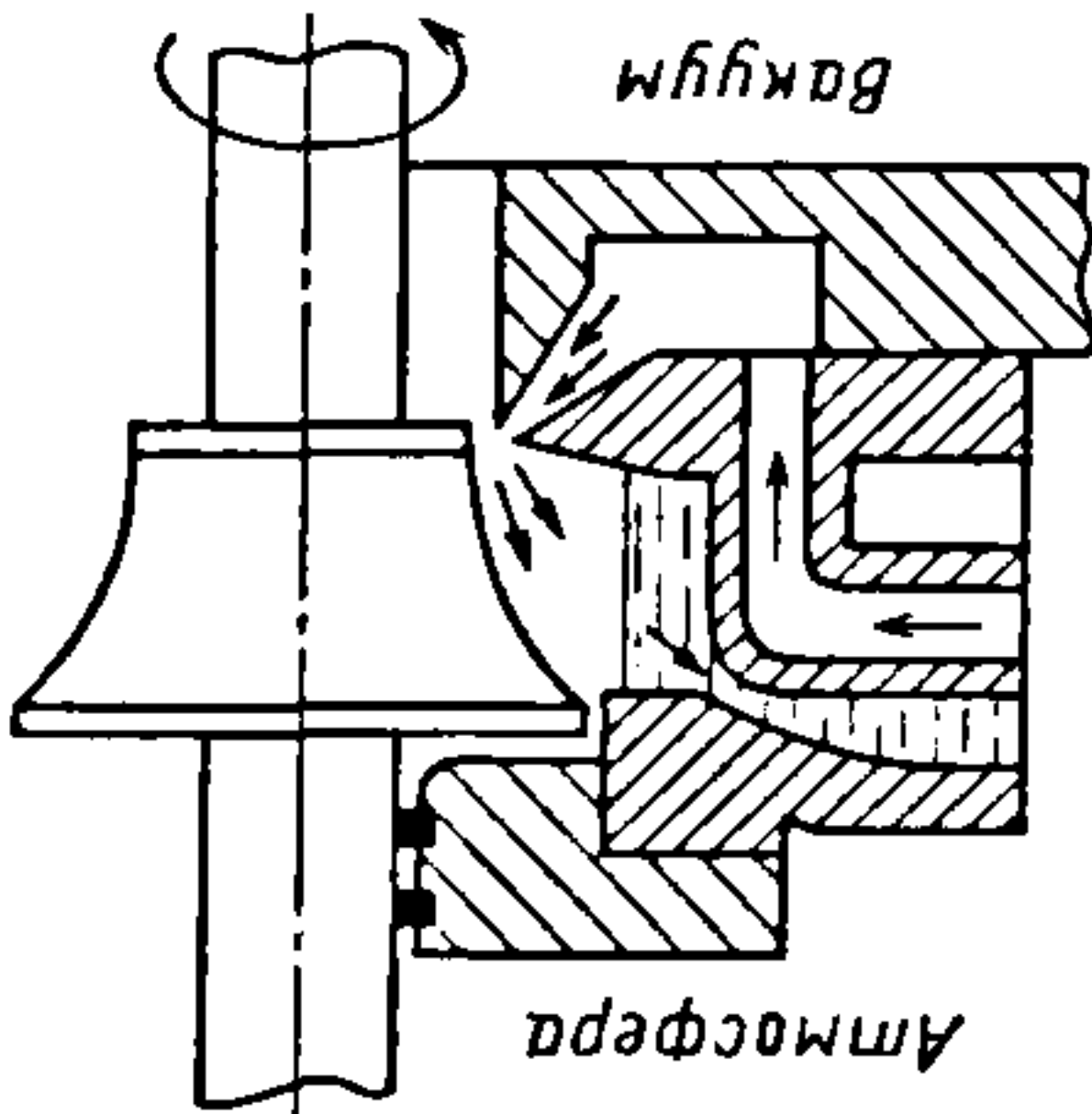
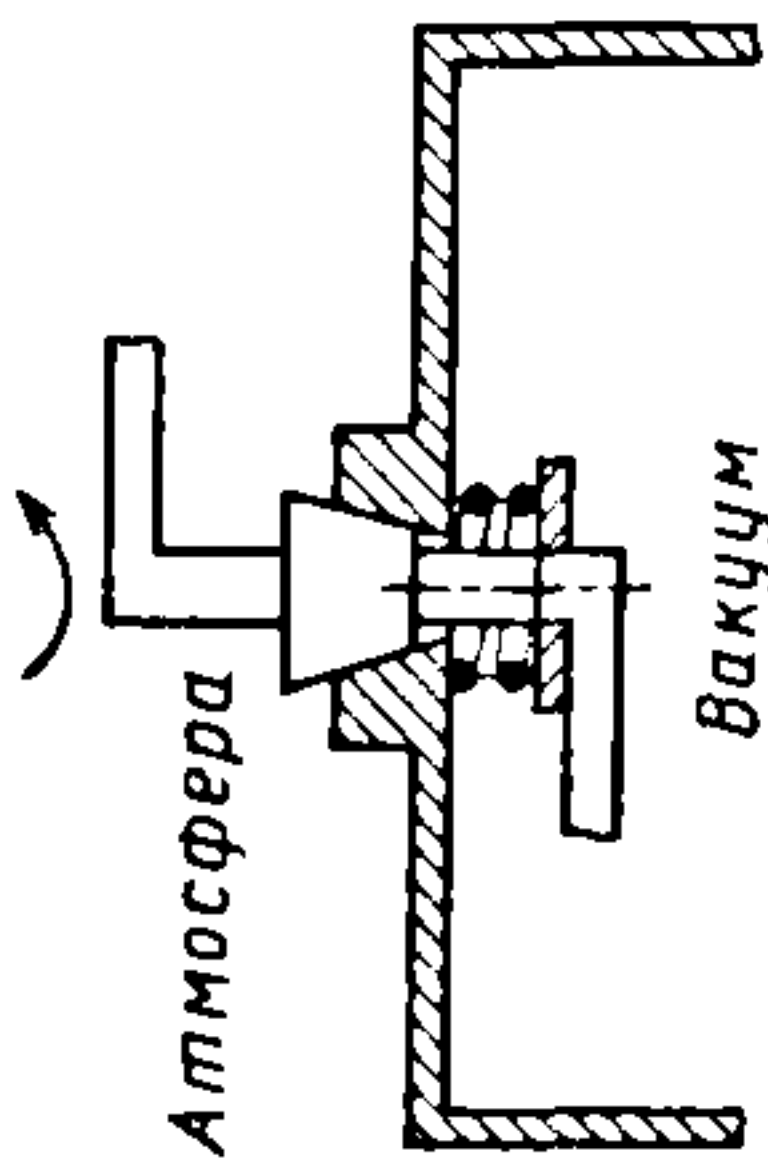
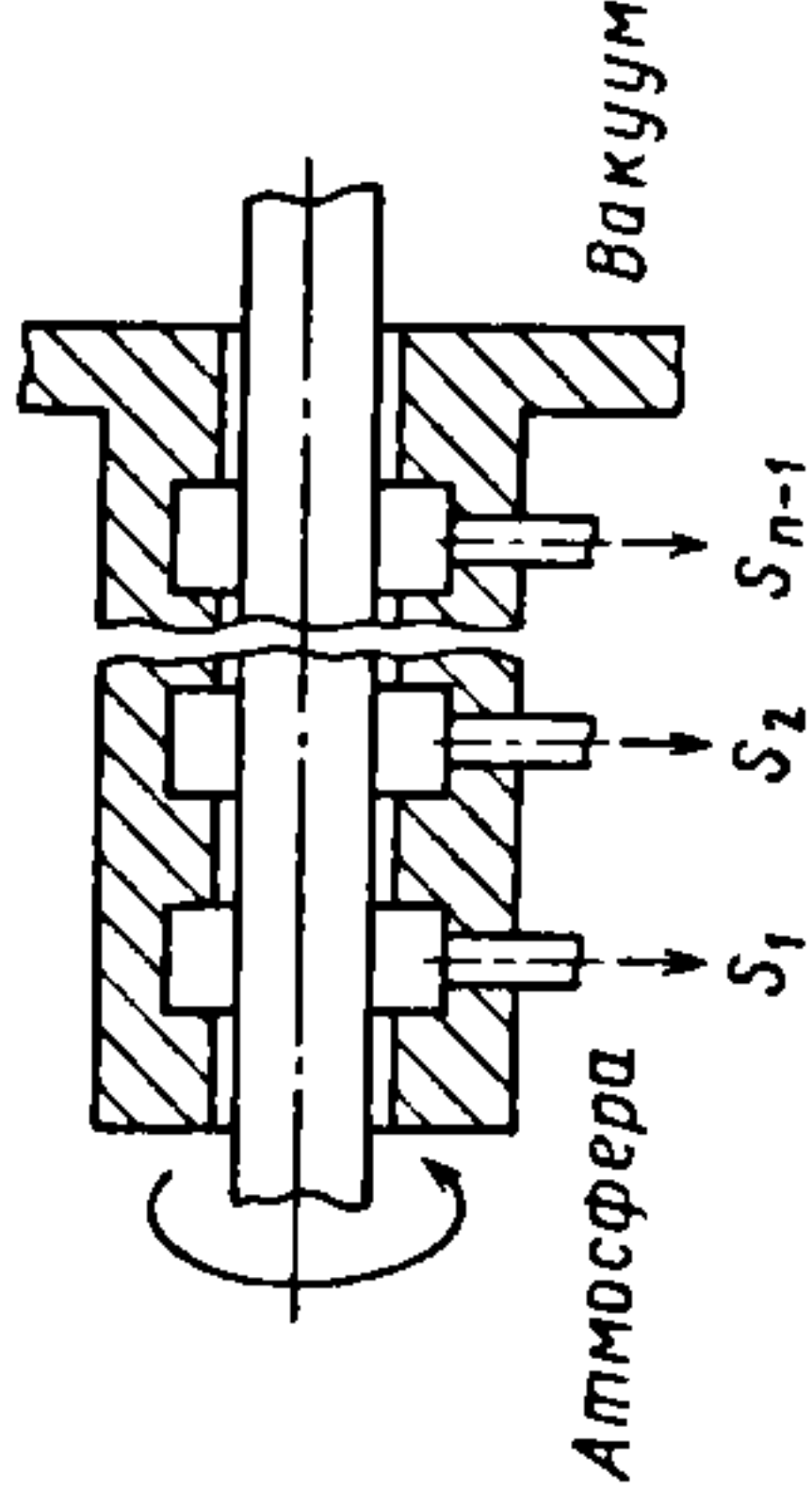
8.1. Принципиальные схемы вакуумных вводов

Способ передачи движения	Уплотнение		Принципиальная схема	Оrientировочные допускаемые значения			Особенности передачи
	Тип	Вид		$p, \text{Па}$	$n, \text{с}^{-1}$	$M_0 \cdot 10^{-2}, \text{Н} \cdot \text{м/м}$	
Через отверстие в стенке	Сальниковое	Пластичное		$10^{-5}$	2	70	Уплотнители – фторопласт, асбест, вакуумные резины. Недостаток – необходимость периодического поджима сальника
		Упругое		$10^{-4}$	50	15	Герметизацию движущегося контакта обеспечивают силы упругости сальника (манжеты с пружинящими кольцами), что позволяет уменьшить площадь движущегося контакта
		Комбинированное		$10^{-5}$	100		Высокие вакуумные свойства эластомеров в сочетании с каким-либо устройством (антимиграционные пояски, кольцевые сорбционные ловушки, поджимы и др.), позволяющим уменьшить поток выделяющихся или протекающих газов

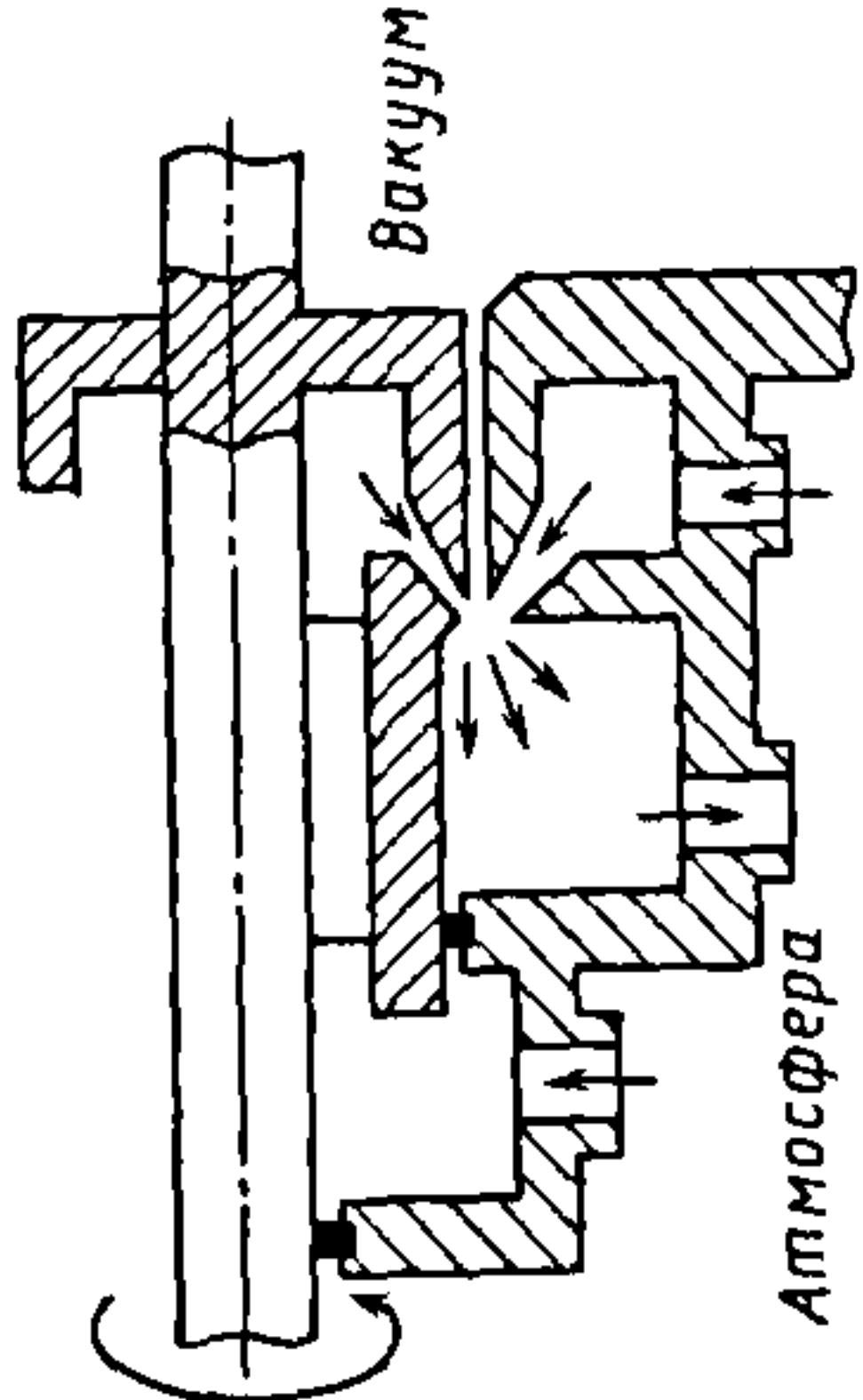
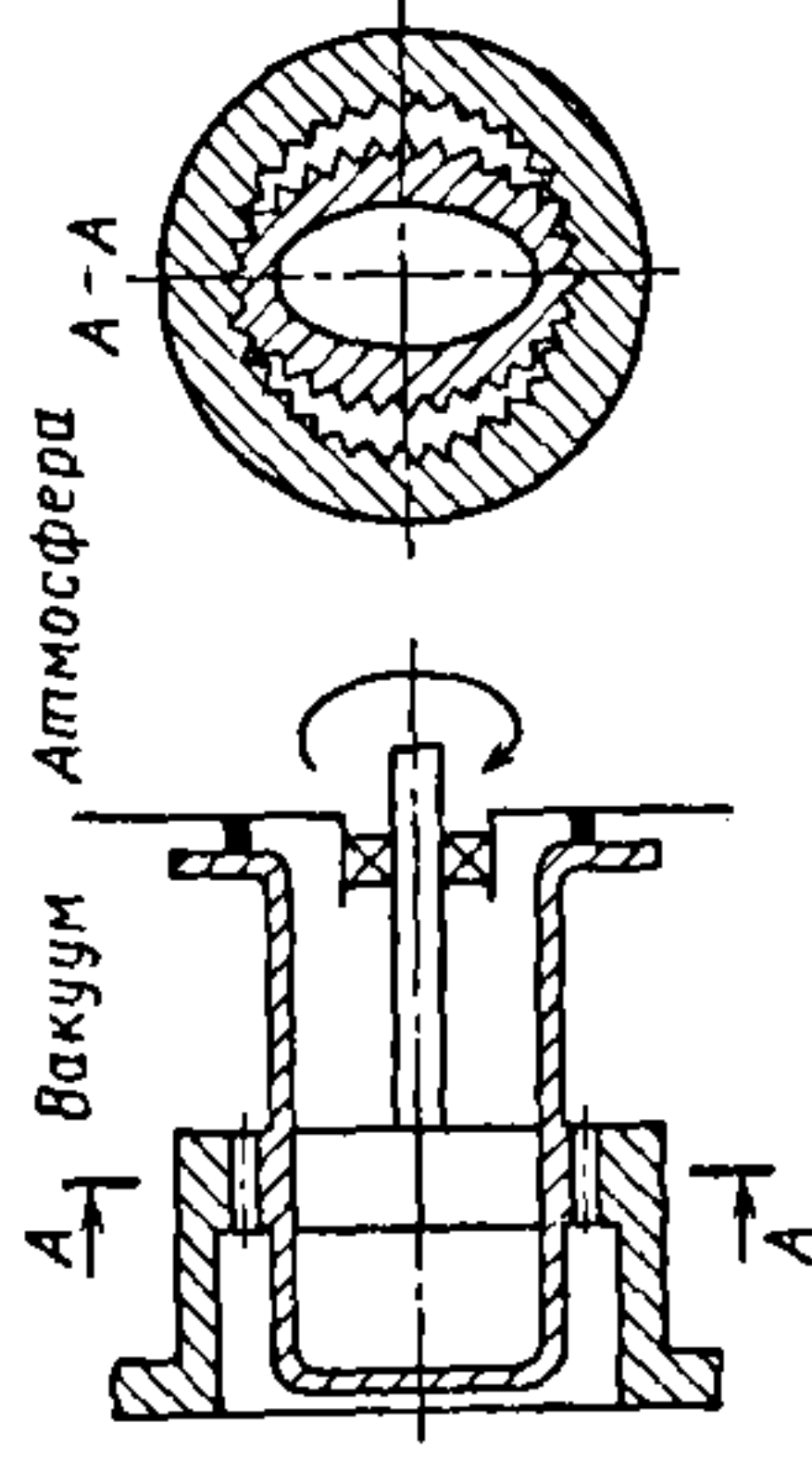
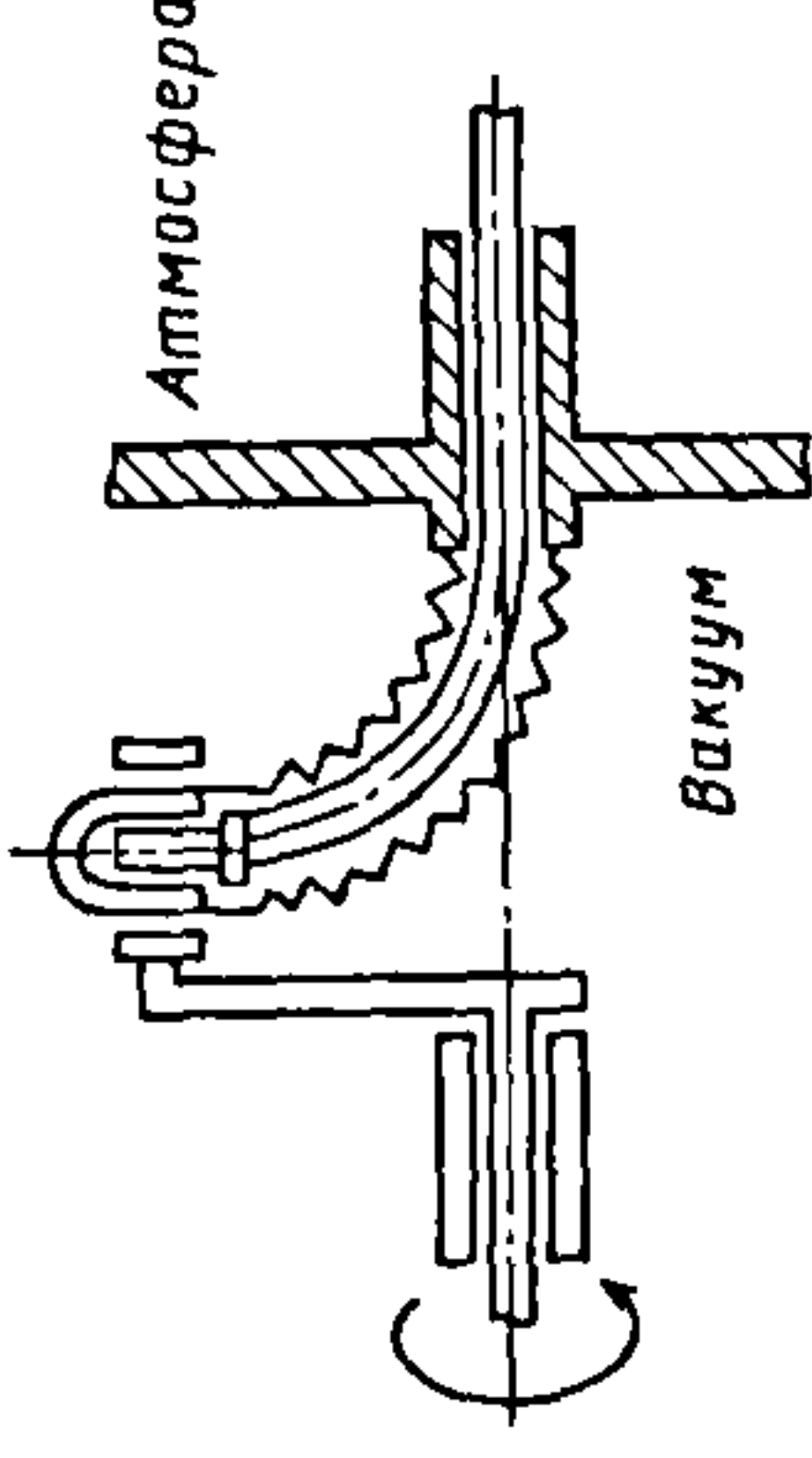


Через отверстие в стенке	Жидкостное	Капиллярное		$10^{-6}$	0,2	10	Явление капиллярности позволяет уплотняющей жидкости удерживать атмосферное давление. Применяют хорошо смачивающие жидкости, в частности, легкоплавкие металлы и сплавы (ртуть, галлий, индий, олово, сплав, содержащий 62,5 % Ga, 21,5 % In, 16 % Sn и др.)
		Сифонное		$10^{-6}$	50	2	Гидростатическое давление столба жидкости компенсирует разность давлений в сообщающихся сосудах. Для уменьшения размеров предусмотрена форвакуумная полость. Работает только в вертикальном положении
		Импеллерное		$10^{-4}$	100	70	Включает в себя устройства для принудительной подачи жидкости к краю или середине зазора, где находится резервуар с этой жидкостью. Необходимы дополнительные уплотнения для обеспечения герметичности в статических условиях

Продолжение табл. 8.1

Способ передачи движения	Уплотнение		Принципиальная схема	Ориентировочные допускаемые значения			Особенности передачи
	Тип	Вид		$p$ , Па	$n$ , $c^{-1}$	$M_o \cdot 10^{-2}$ , Н·м/м	
Через отверстие в стенке	Жидкостное	Гидро-струйное		$10^{-3}$	30	5	Струя уплотняющей жидкости вытекает из кольцевого сопла, перекрывает зазор и исключает проникновение воздуха в вакуумную камеру. Вал имеет специальное профилированное утолщение, обеспечивающее непрерывность струи у края зазора
		Коническое смазываемое		$10^{-2}$	1	2	Притертое коническое соединение с использованием вакуумного масла
	Газообразное	Диффузионно-щелевое		$10^{-5}$	10	30	Ограничение газового потока (дифференциальная откачка при быстрой откачке $S_1, S_2, \dots, S_{n-1}$ ), проходящего через зазор между отверстием и валом

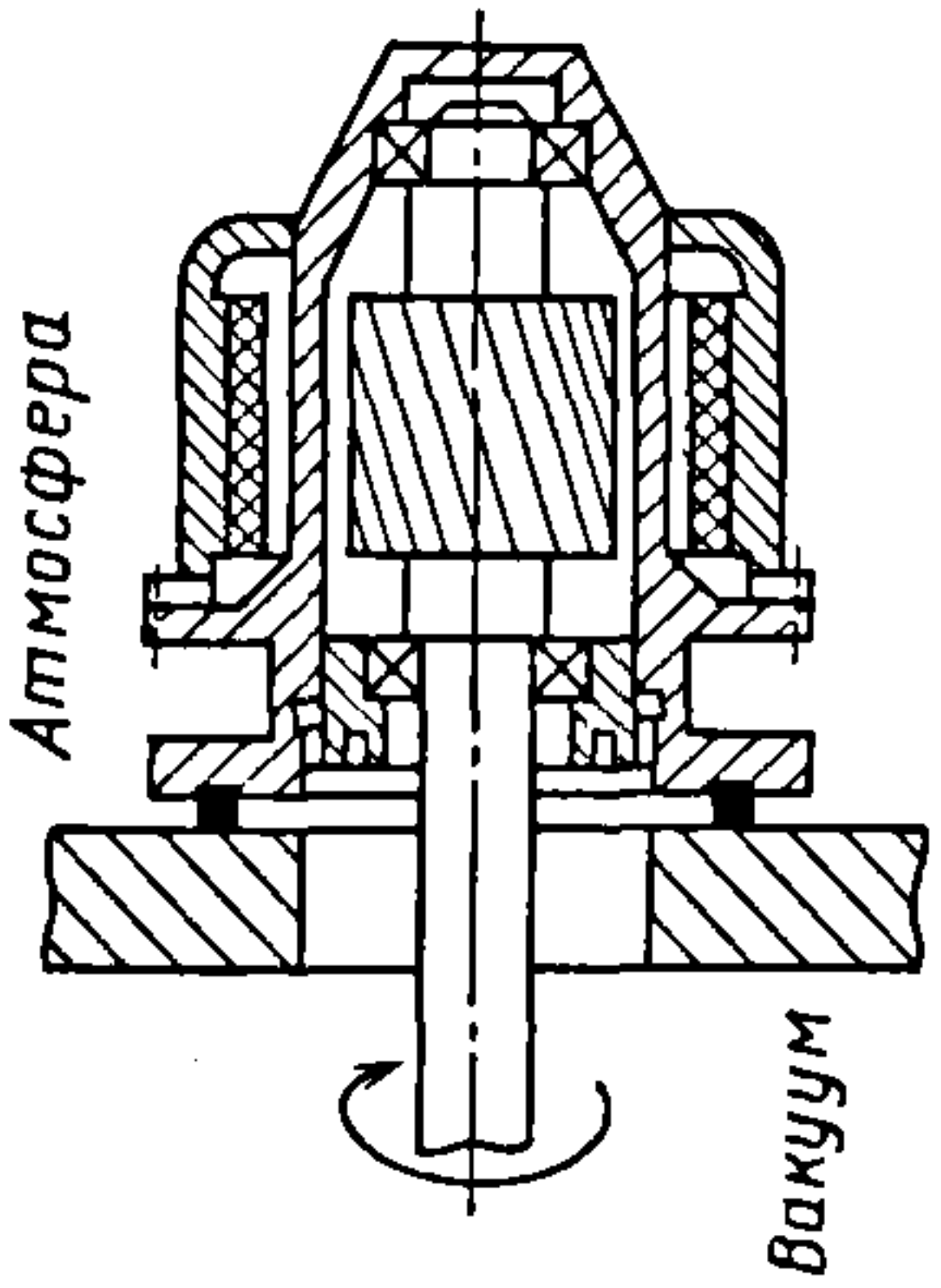
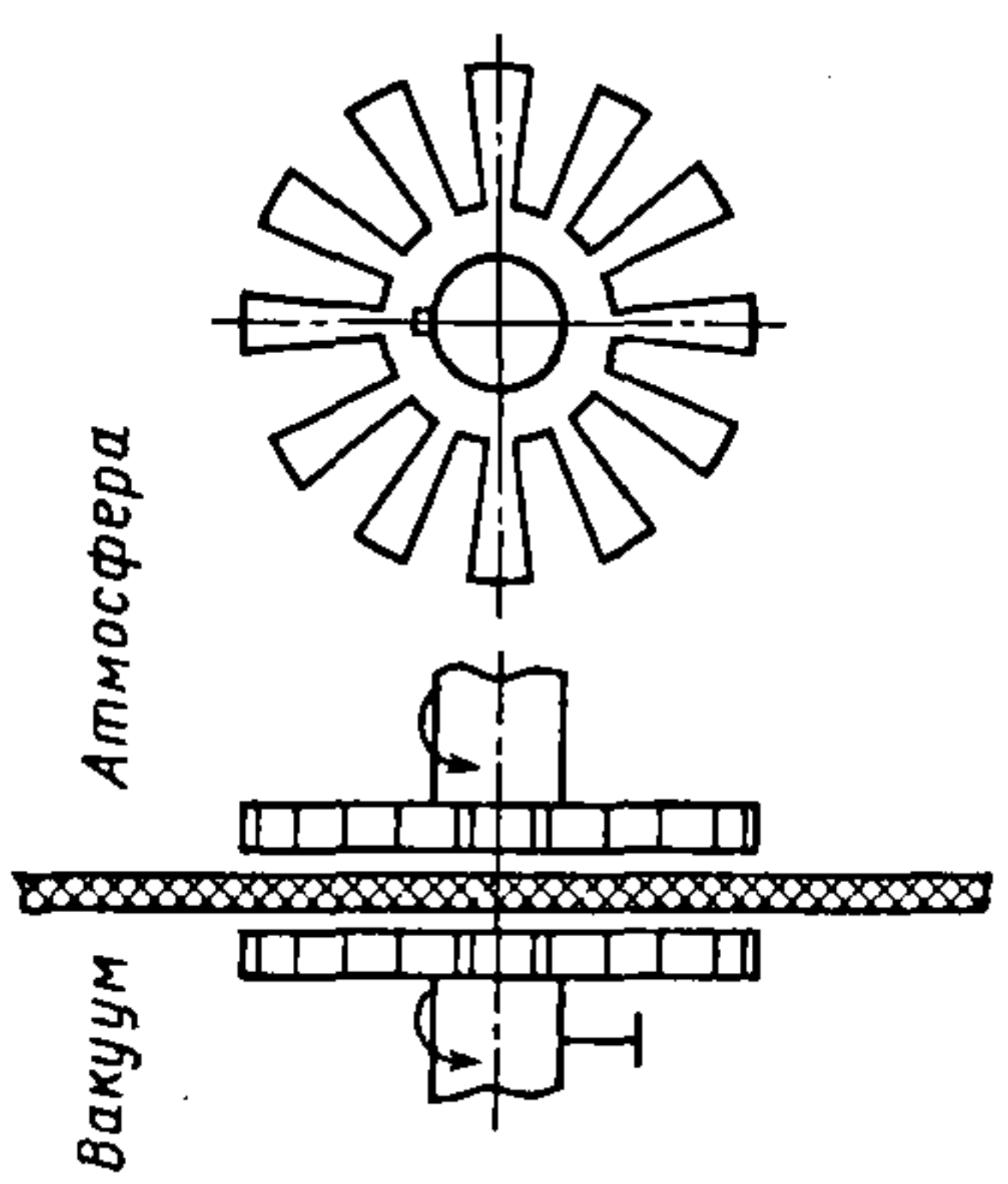


Через отверстие в стенке	Газообразное	Газоструйное		$10^{-4}$	200	—	Струйные уплотнения с циркуляцией уплотнителя (струя газа или пара) вне зазора, подобные эжекторному или диффузионному насосу с подвижными относительно корпуса соплами. Для высокоскоростных и мощных приводов
Через сплошную стенку	С эластичной стенкой	Волиновое		$10^{-8}$	4	3	Передача движения от ведущего звена к ведомому волнообразными упругими деформациями, генерируемыми в герметизирующем звене передачи
		Сильфонное			20	2	Стандартные эластичные герметизирующие элементы (сильфоны) в процессе работы совершают колебательные движения при передаче вращения или растягиваются и сжимаются при передаче возвратно-поступательного движения

Продолжение табл. 8.1

Способ передачи движения	Уплотнение		Принципиальная схема	Ориентировочные допускаемые значения			Особенности передачи
	Тип	Вид		$p, \text{Па}$	$n, \text{с}^{-1}$	$M_0 \cdot 10^{-2}, \text{Н} \cdot \text{м/м}$	
Через сплошную стенку		Трубчатое упругодеформируемое		$10^{-8}$	2	0,5	Принцип пневматических пружин (трубок Бурдона). При подаче энергоносителя (воздуха или жидкости) с повышенным давлением во внутреннюю полость трубки она стремится выпрямиться, и конец трубки, являющийся ведомым звеном механизма, совершает движение по определенной траектории
	С эластичной стенкой	Мембранное		$10^{-5}$	50	5	Мембраны из эластомерных материалов (часто из вакуумной резины)
		Магнитное		$10^{-8}$		0,05	Принцип магнитного притяжения разноименных полюсов постоянных магнитов, разделенных немагнитной герметизирующей стенкой, один из которых закреплен на вращаемом валу в атмосфере, а другой — на ведомом в вакууме



Через сплошную стенку	С жесткой стенкой	Электромагнитное		$10^{-8}$	100	0,05	Принцип короткозамкнутого асинхронного двигателя, у которого ротор с валом отделен от статора и атмосферы герметичной стенкой из материала с низкими электрической проводимостью и магнитной проницаемостью
		Электростатическое		$10^{-8}$	—	0,03	Электростатическое взаимодействие во вращающемся электростатическом поле в статоре или при подведении постоянного потенциала к вращающемуся многосегментному вращающему валу при наличии ведомого вала подобной формы

Условные обозначения:  $n$  — частота вращения или число возвратно-поступательных движений в единицу времени;  
 $M_o$  — относительный крутящий момент, Н·м/м (отношение передаваемого момента к диаметру наиболее удаленной вращающейся или колеблющейся точки).

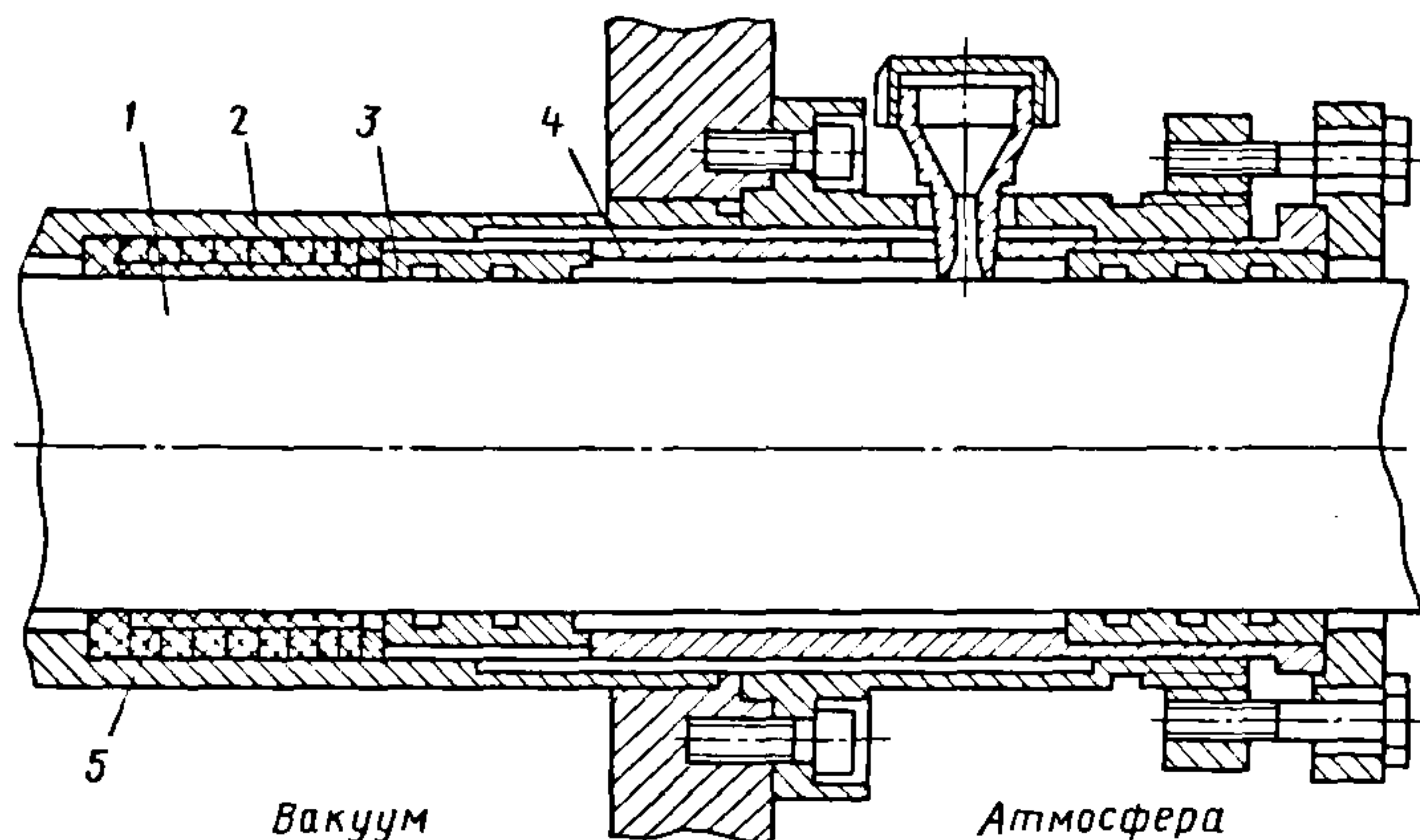


Рис. 8.2. Сальниковый ввод с комбинированным фторопластовым уплотнением

Механические вакуумные вводы для передачи движения через сплошную стенку имеют разделяющий герметичный элемент (обычно тонкостенный), являющийся продолжением стенки вакуумной камеры. Эти вводы характеризуются низким газовыделением, поэтому их применяют в статических (иногда прогреваемых) высоко- и сверхвысоковакуумных системах. Из-за разомкнутости вала через эти вводы нельзя передавать большие крутящие моменты. Наиболее распространены вводы через сплошную стенку с сальниковыми и магнитными уплотнениями.

Расчет механических вводов сводится к расчету суммарного потока газовыделения и механических параметров (расчет на прочность и долговечность).

Ниже приведены конструкции наиболее часто применяемых вакуумных вводов.

На рис. 8.1 показан ввод вращения, в котором в качестве упругих уплотнений использованы резиновые манжеты 1 и 10 со спиральными кольцами для прижима манжет к валу 6. Манжета 1, обращенная в вакуумную камеру, является рабочей, манжета 10 – защитной; последняя предохраняет движущийся контакт рабочей манжеты с валом от загрязнения. Фетровое кольцо 4, пропитанное вакуумным

маслом, обеспечивает постоянное смазывание движущегося контакта.

Наружный бортик манжеты 1 должен быть вакуумно-плотно прижат к корпусу 2. Сила прижима, создаваемая гайкой 7, передается через наружные кольца подшипников 9 и втулку 8 нажимной втулке 5. Компактная конструкция унифицированного ввода упрощает крепление корпуса 2 в расточке стенки вакуумной камеры 3. При использовании подшипников качения и постоянной циркуляции смазочного материала допускаемая частота вращения вала может достигать  $1300 \text{ с}^{-1}$ .

Уплотнения такого типа могут компенсировать некоторые погрешности изготовления и сборки узла. Их применяют в механических вакуумных насосах, коммутирующей вакуумной аппаратуре, технологических вакуумных установках и других устройствах при давлении до  $10^{-5} \text{ Па}$ .

Уплотняющий элемент ввода с комбинированным уплотнением (рис. 8.2) выполнен из фторопласта в виде тонкостенной втулки 5 толщиной  $0,5 \dots 1,0 \text{ мм}$  с утолщением со стороны, обращенной в вакуумную камеру. Для обеспечения надежной герметизации контакта с поверхностью вращающегося вала 1 служит набор резиновых колец 2, поджимаемых в осевом направлении втулкой 3 через упорный стакан 4 и фланец.



Таким образом, в вакуумную камеру обращена лишь часть торца фторопластовой втулки, обладающей малым газовыделением, что допускает применение такого уплотнения до давления  $10^{-6}$  Па.

Ввод движения в вакуум с уплотнением Вильсона (рис. 8.3) представляет собой конструкцию, в которой вал герметично обжимается резиновой прокладкой с диаметром отверстия меньшим, чем диаметр вала. Резиновая прокладка 3 толщиной  $h$  герметично прижата по периферии к основанию 2 прижимной гайкой 5 через кольцо 4. Центральная часть прокладки 3, обжимающая вал 1, выгибается под углом  $30^\circ$  и обеспечивает герметичность подвижного контакта при вращении или поступательном движении вала. Рекомендуемые характеристики уплотнения Вильсона приведены в табл. 8.2.

Для уменьшения потока натекания газа уплотнение Вильсона выполняется с двумя резиновыми прокладками и промежуточной откачкой (рис. 8.4).

Поток натекания газа (атмосферного воздуха)  $Q_n$ ,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , через подвижный контакт уплотнительного элемента с уплотняемой поверхностью вала диаметром  $d_v$  с параметром шероховатости  $Ra$  равен

## 8.2. Размеры уплотнения Вильсона (см. рис. 8.3)

$D$ , мм	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$h$ , мм
4	2,5...3,0	14	18	1,4...1,6
6	4,0...4,5	16	20	
10	6,5...8,0	20	24	
15	10...12	25	30	
20	13...16	30	34	
30	20...24	40	50	
40	26...32	50	65	
50	33...40	60	82	
60	40...48	70	96	
70	45...56	80	110	

$$Q_n = 450 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{\pi d_v}{a} R a^2 \Delta p \left( e^{-3 \frac{p_d}{R}} + e^{-k_v \frac{v_{\text{св}}}{v_{\text{ск}}}} \right),$$

где  $T$  и  $M$  – температура, К, и молекулярная масса, кг/кмоль, натекающего газа соответственно;  $a$  – ширина контакта уплотнительного элемента с уплотняемой поверхностью, м;  $\Delta p$  – перепад давления газа на уплотнении, Па;  $p_d$  – контактное давление уплотнительного элемента на вал, Па;  $R$  – коэффициент уплотнения, Па;

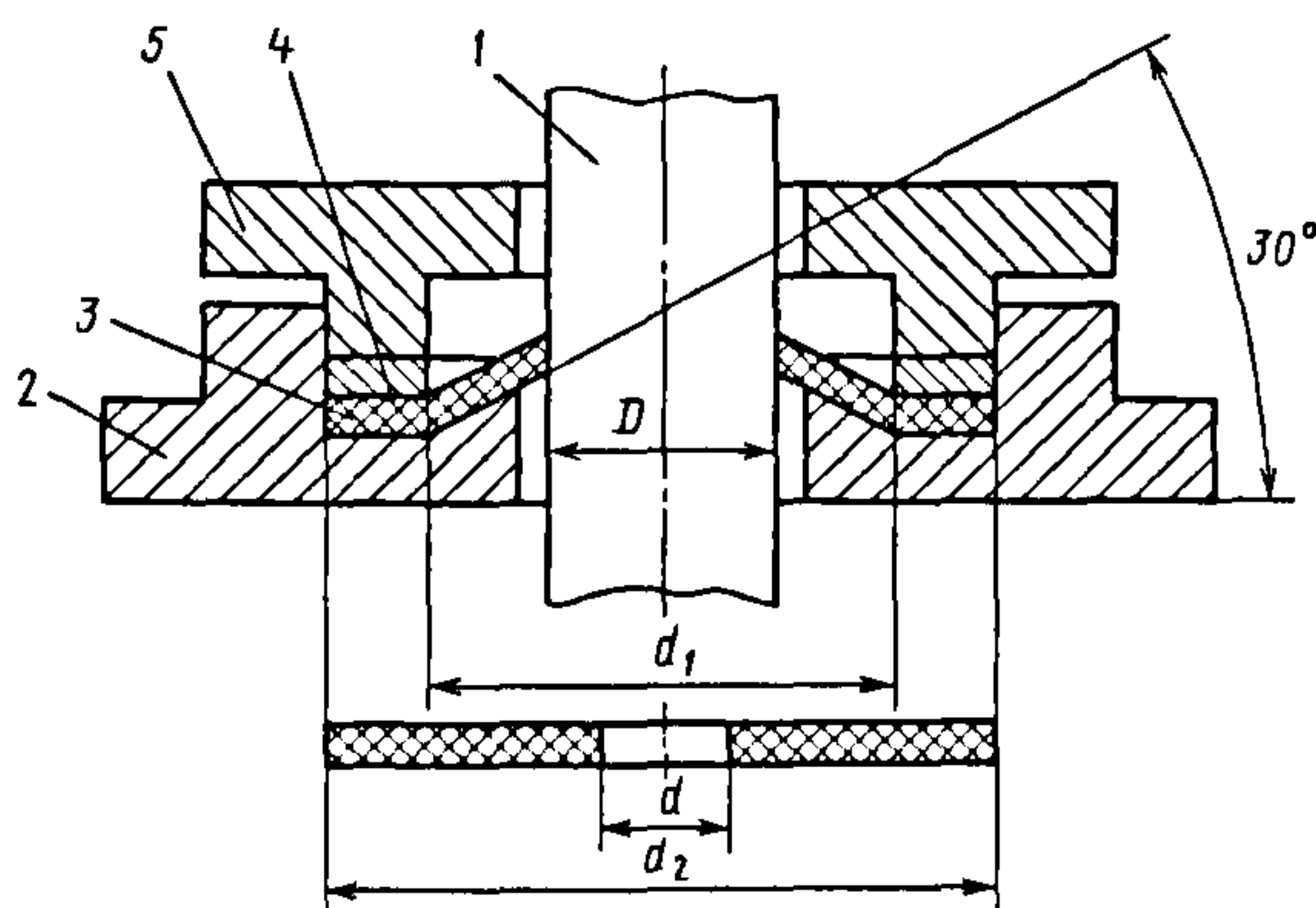


Рис. 8.3. Уплотнение Вильсона:

1 – вал; 2 – основание; 3 – резиновая прокладка; 4 – металлическое кольцо; 5 – прижимная гайка

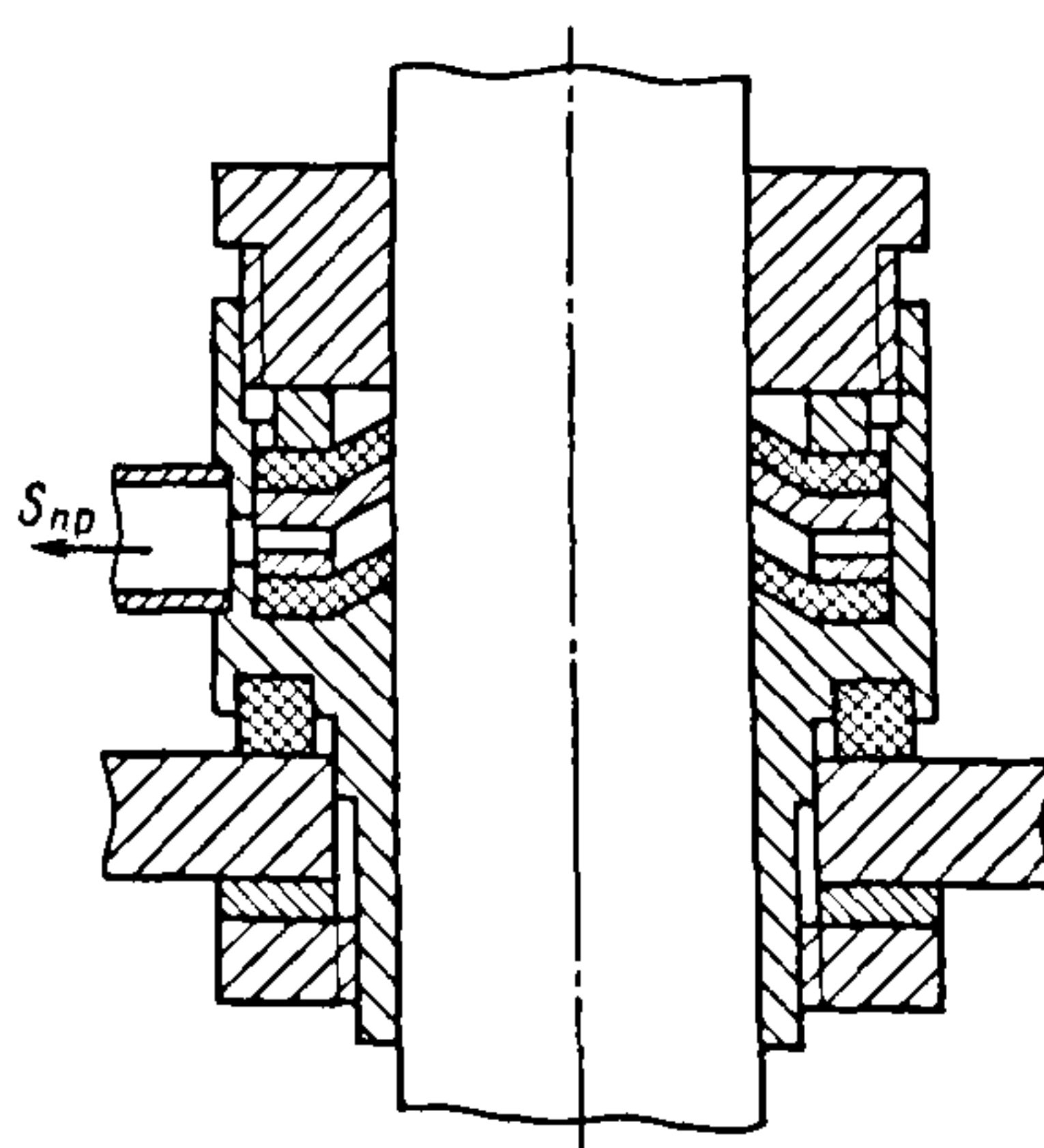


Рис. 8.4. Уплотнение Вильсона с промежуточной откачкой  $S_{np}$

$k_v$  — коэффициент, зависящий от состояния уплотняемой поверхности ( $k_v = 16$  — без смазки,  $k_v = 4,2$  — с полимерной пленкой,  $k_v = 1,4$  — с жидкой смазкой);  $v_\epsilon$  — скорость восстановления упругих деформаций материала уплотнительного элемента, м/с;  $v_{ск}$  — скорость скольжения уплотнительного элемента относительно уплотняемой поверхности, м/с.

Ширина контакта  $a$  уплотнительного элемента с уплотняемой поверхностью вала зависит от величины контактного давления  $p_d$ , на которой, в свою очередь, сказываются степень деформации и модуль упругости  $E$  уплотнительного элемента. Коэффициент уплотнения  $R$  для резин марок ИРП-1345, ИРП-2043, 51-1578, 51-1735 и т.п. приблизительно равен  $R \approx 0,05E$ . Для резин этих же марок скорость восстановления упругих деформаций составляет приблизительно  $v_\epsilon \approx 0,5$  м/с.

Для передачи движения в вакуумированный объем с масляными средствами откачки используются вводы вращения с магнитожидкостным уплотнением. По многим параметрам они превосходят другие вводы движения, так как в них отсутствует непосредственный контакт между движущимися и неподвижными уплотняемыми деталями при достаточно высокой герметичности.

Кроме того, вводы с использованием магнитной композиции, состоящей из жидкости-носителя и магнитных частиц, могут применяться в установках с избыточным давлением газа или жидкости.

Конструкция типового ввода вращения на основе магнитной композиции показана на рис. 8.5. Ввод состоит из корпу-

са 1 с расположенным в нем на опорах валом 2, передающим крутящий момент. Герметизация вращающегося вала осуществляется магнитной композицией 3, удерживаемой в зазоре между валом и неподвижными полюсными наконечниками 4 магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом 5. Неподвижные стыки герметизируются прокладками 6 из вакуумной резины.

В качестве жидкости-носителя служит вакуумное масло ВМ-1, ВМ-5, ПФМС-2/5л, ПФМС-13, ФМ-1, 5Ф4Э или М-5Ф4М, а магнитные частицы игольчатой формы вводятся в жидкость в виде порошка из  $Fe_2O_3$  или  $CrO_2$ . Поток газа через ввод вращения состоит из паров жидкости-носителя и потока газопроницаемости через магнитную композицию. Давление пара, например масла ФМ-1, при температуре 293 К составляет  $1,3 \cdot 10^{-8}$  Па, а масла 5Ф4Э —  $1,3 \cdot 10^{-9}$  Па. Поток газонатекания через подвижный контакт практически отсутствует.

Вводы могут работать при скоростях скольжения вала до 15 м/с. При этом практически отсутствует износ уплотняемых поверхностей, а момент сопротивления вращению в 7–10 раз меньше по сравнению с вводами вращения, имеющими контактное уплотнение. В табл. 8.3 приведены основные характеристики вводов трех типоразмеров с магнитной композицией на основе масла 5Ф4Э и с намагниченностью насыщения 25 кА/м. За среднюю долговечность вводов принята длительность работы, при которой средний поток газопроницаемости не превышает величины, указанной в табл. 8.3.

### 8.3. Основные характеристики вводов, типовая конструкция которых представлена на рис. 8.5

$d_v$ , мм	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$L_{max}$ , мм	$M_n$ , Н·м	$M_c$ , Н·м	$Q_n$ , м <sup>3</sup> ·Па/с	$N_{cp}$ , мин	Масса, кг
6,3	55	40	100	0,98	0,03	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^5$	1,0
16	70	55	130	15,3	0,04			1,6
45	145	120	190	240	0,08		$1,1 \cdot 10^5$	7,0

Условные обозначения:  $M_n$  — номинальный передаваемый момент;  $M_c$  — момент сопротивления вращению;  $Q_n$  — поток газопроницаемости;  $N_{cp}$  — средняя наработка на отказ.



Ввод вращения с сильфонным уплотнением (рис. 8.6) представляет собой муфту, состоящую из вращающихся в неподвижных опорах ведущего 1 и ведомого 2 эксцентриковых (или кривошипных) валов. Рабочий момент передается от ведущего вала, находящегося в атмосфере, ведомому, находящемуся в вакууме, через промежуточную втулку 5. Последняя имеет перегородку, отделяющую ведомый вал от ведущего, и герметично соединена с неподвижным корпусом ввода 4 сильфоном 5. При вращении ведущего вала втулка 3 совершает круговое движение и передает вращение ведомому валу. Корпус 4 соединен с вакуумной камерой.

Из волновых передач наиболее распространены зубчатые передачи (рис. 8.7), которые состоят из генератора волн (вал 1, корпус 2 подшипника), гибкого 3 и жесткого 4 зубчатых колес, выходного вала 5. В герметичных (вакуумных) зубчатых волновых передачах гибкое колесо 2 вы-

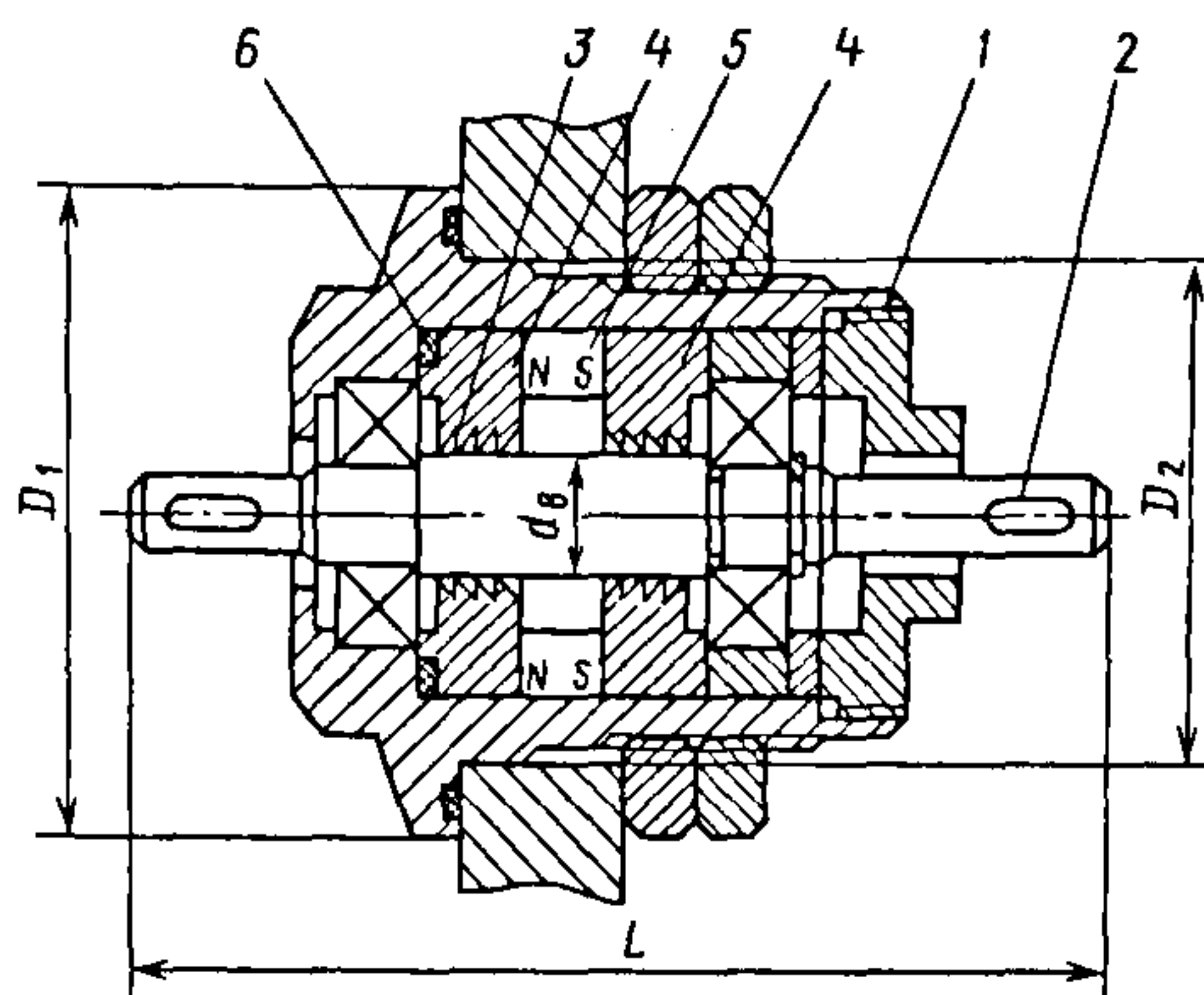


Рис. 8.5. Ввод вращения на основе магнитной композиции

полнено за одно целое с гибким стаканом. Стенки последнего представляют собой продолжение стенок вакуумной камеры, так как герметично соединены с ними переходными фланцами с вакуумным уплотнением. В большинстве конструкций гибкое колесо имеет меньше зубьев, чем жесткое.

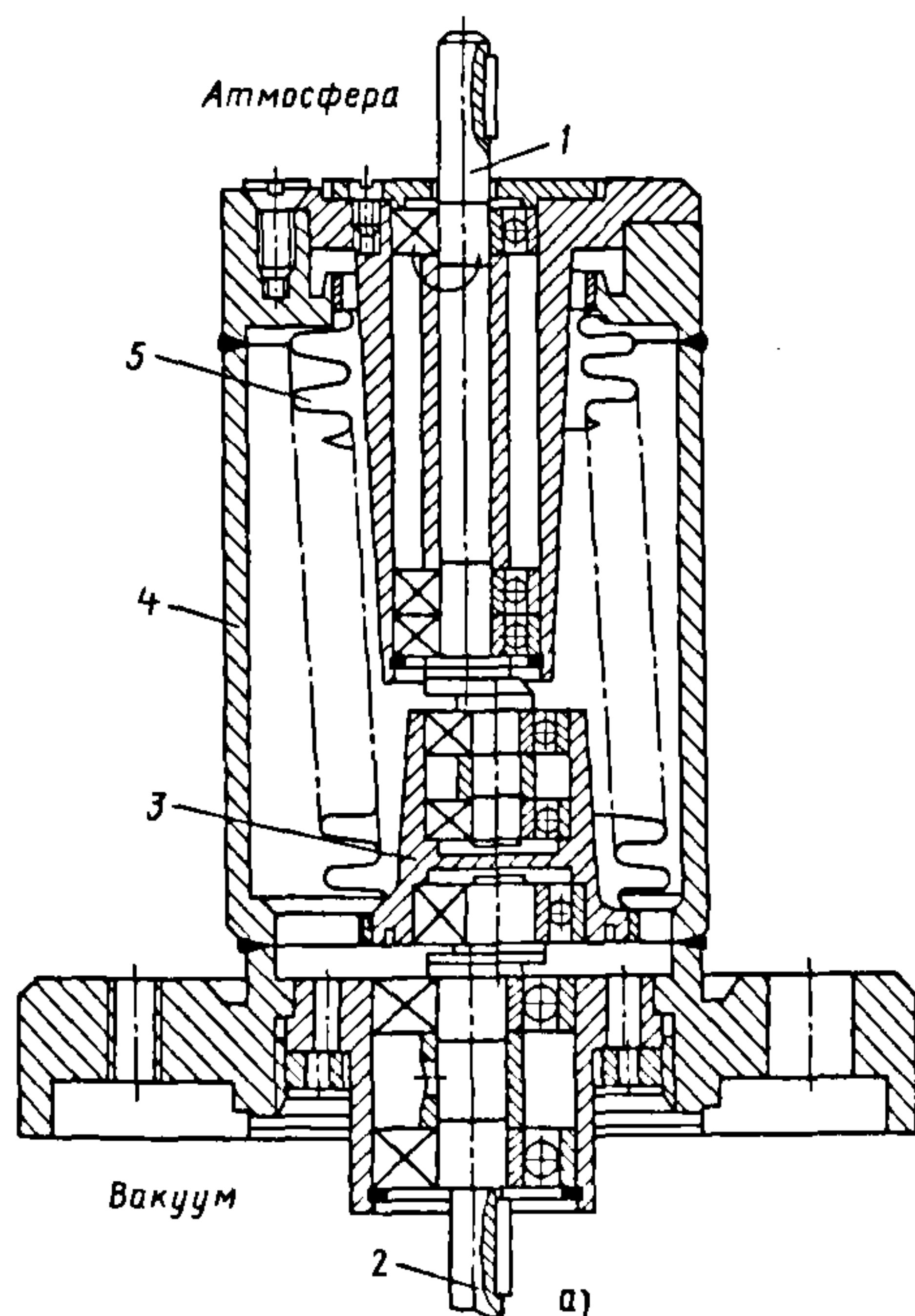
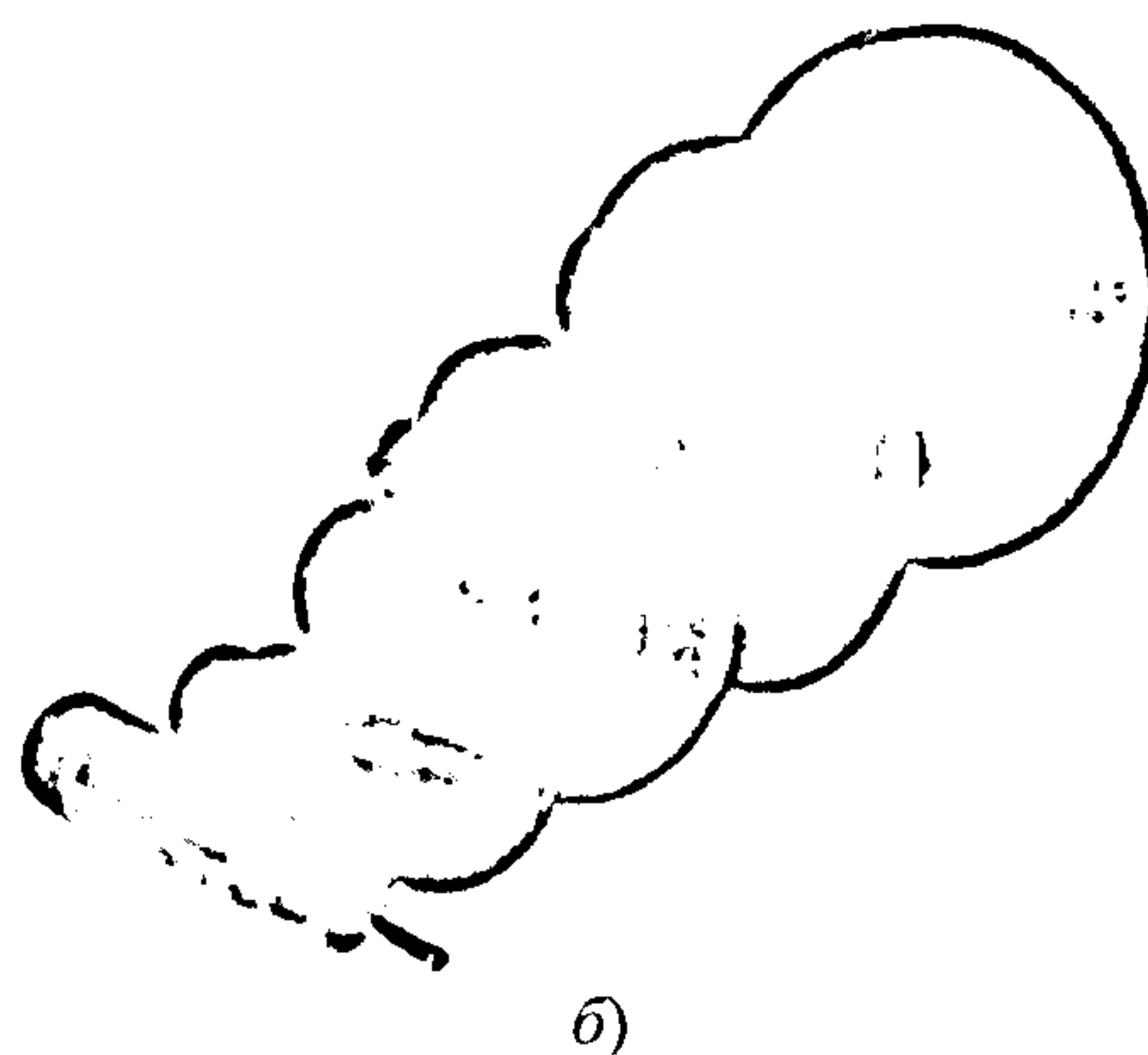


Рис. 8.6. Эксцентриковый сильфонный ввод вращения (а) и ряд унифицированных конструкций вводов (б)



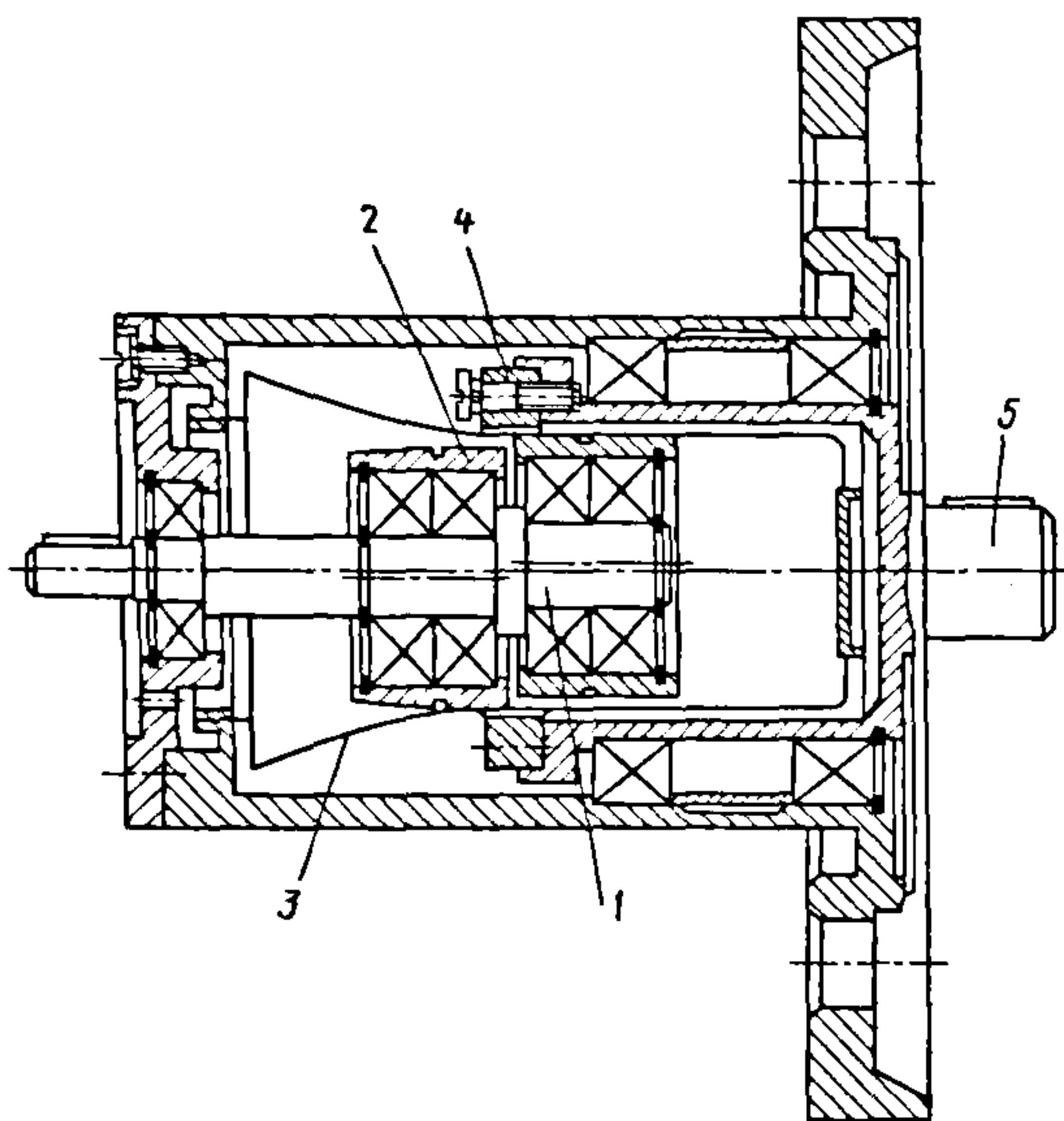


Рис. 8.7. Воливая зубчатая передача

Генератор, установленный внутри гибкого колеса, упруго деформирует его так, что в зоне большой оси генератора зубья гибкого и жесткого колес находятся в зацеплении, а в зоне малой оси зацепление отсутствует (между вершинами зубьев имеется зазор).

При вращении генератора зона зацепления зубьев перемещается в соответствии с волновой деформацией гибкого колеса. Перспективны механизмы на основе трубчатых упругодеформируемых вводов. Их выполняют одно- и многоцелевыми. Так, конечное звено манипулятора с тремя степенями свободы (рис. 8.8) совершает перемещение по круговой траектории в горизонтальной плоскости, по осям  $x$  и  $z$  и по прямолинейной траектории  $H$  в вертикальной плоскости по осям  $x$  и  $y$ .

Горизонтальное перемещение по круговой траектории, т.е. по осям  $x$  и  $z$ , формируется элементом 1 и рычагом 3

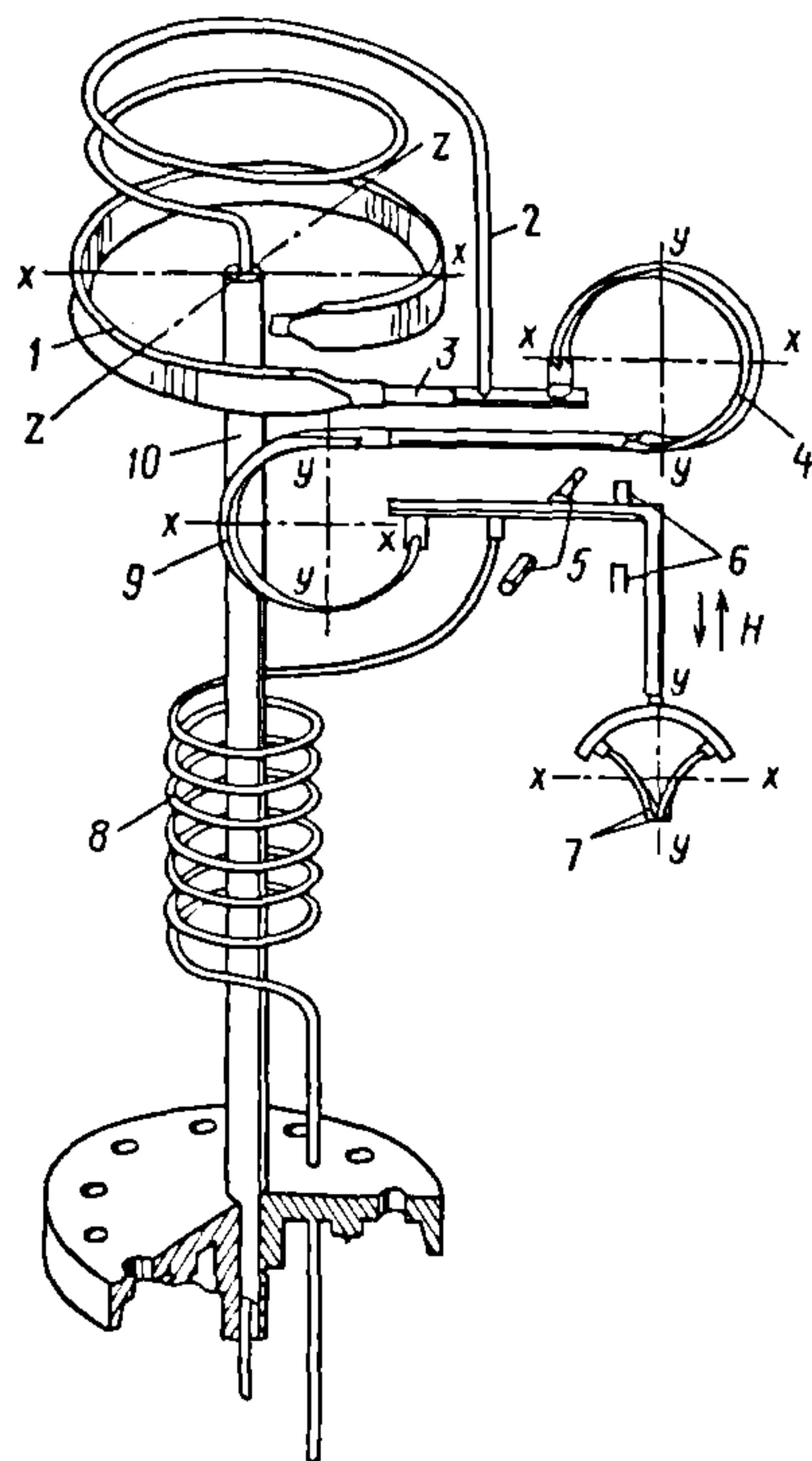


Рис. 8.8. Конструктивная схема манипулятора с тремя степенями подвижности

(соединительной трубкой) при подаче во внутреннюю полость элемента сжатого воздуха по несущей трубке 10, герметично введенной в вакуумную камеру. Перемещение в вертикальной плоскости по оси  $y$  формируется элементами 4 и 9, имеющими автономную систему подачи сжатого воздуха по трубке 2 с компенсационными витками, а по оси  $x$  — двумя упругодеформируемыми пневматическими пружинами-захватами 7, в которые сжатый воздух поступает по трубке 8.

Последовательность движений манипулятора, предназначенного для захвата изделия, переноса его в горизонтальной плоскости на заданный угол, перемещения в вертикальной плоскости вдоль осей  $x$  и  $y$ , определяется циклограммой работы, которая является основой для программного управления системой питания энергоносителя. Фиксация относительно изделия двух крайних положений главного



исполнительного органа захвата достигается установкой упоров 5 и 6 в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Применяют разные конструктивные схемы вводов движения в вакуум с сильфонным уплотнением, обеспечивающие большие перемещения.

На рис. 8.9, а показан ввод, в котором для увеличения рабочего хода гибкого звена использованы последовательно соединенные сильфоны. Подвижный шток 4 имеет на своем конце утолщение. К этой части штока приварен сильфон 5, другим концом приваренный ко втулке 3. Сильфон 2 одним концом приварен ко втулке 3, а другим — к ограничивающей втулке 1.

При перемещении штока в направлении, указанном стрелкой, сильфоны сжимаются, при этом их деформации (ход ввода) ограничены упорами на втулке 3 и штоке 4.

Телескопическая конструкция (рис. 8.9, б) состоит из двух сильфонов, вставленных один в другой и закрепленных на фигурной втулке. Поскольку здесь применены сильфоны 2 и 5 разных геометрических размеров и различной жесткости, то их рабочий ход ограничивается упорами на втулке 3 и штоке 4.

Конструкция ввода, позволяющая получать однонаправленные шаговые перемещения на расстояние больше хода сильфона, приведена на рис. 8.10.

Рис. 8.9. Сильфонные узлы с увеличенным рабочим ходом

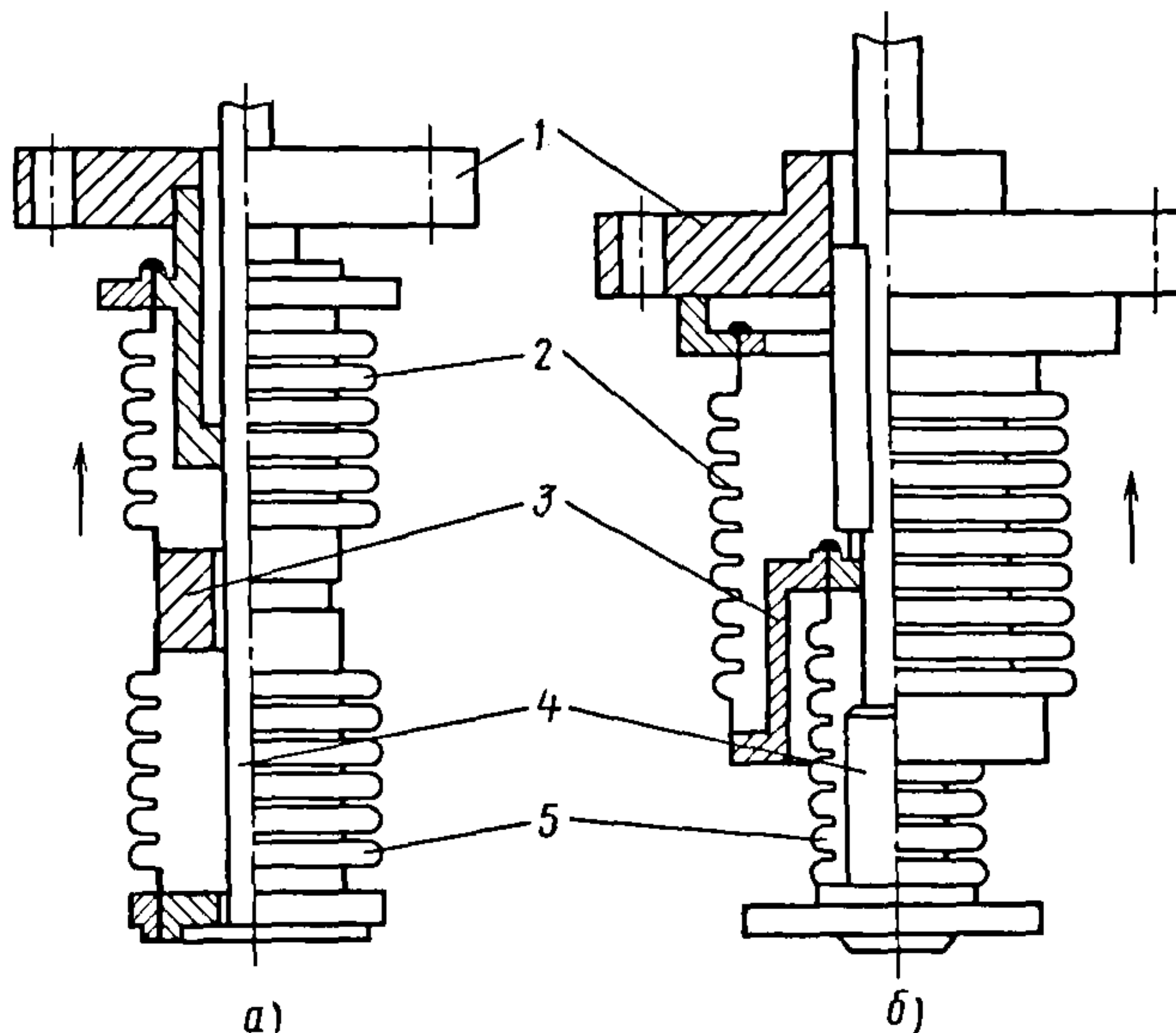
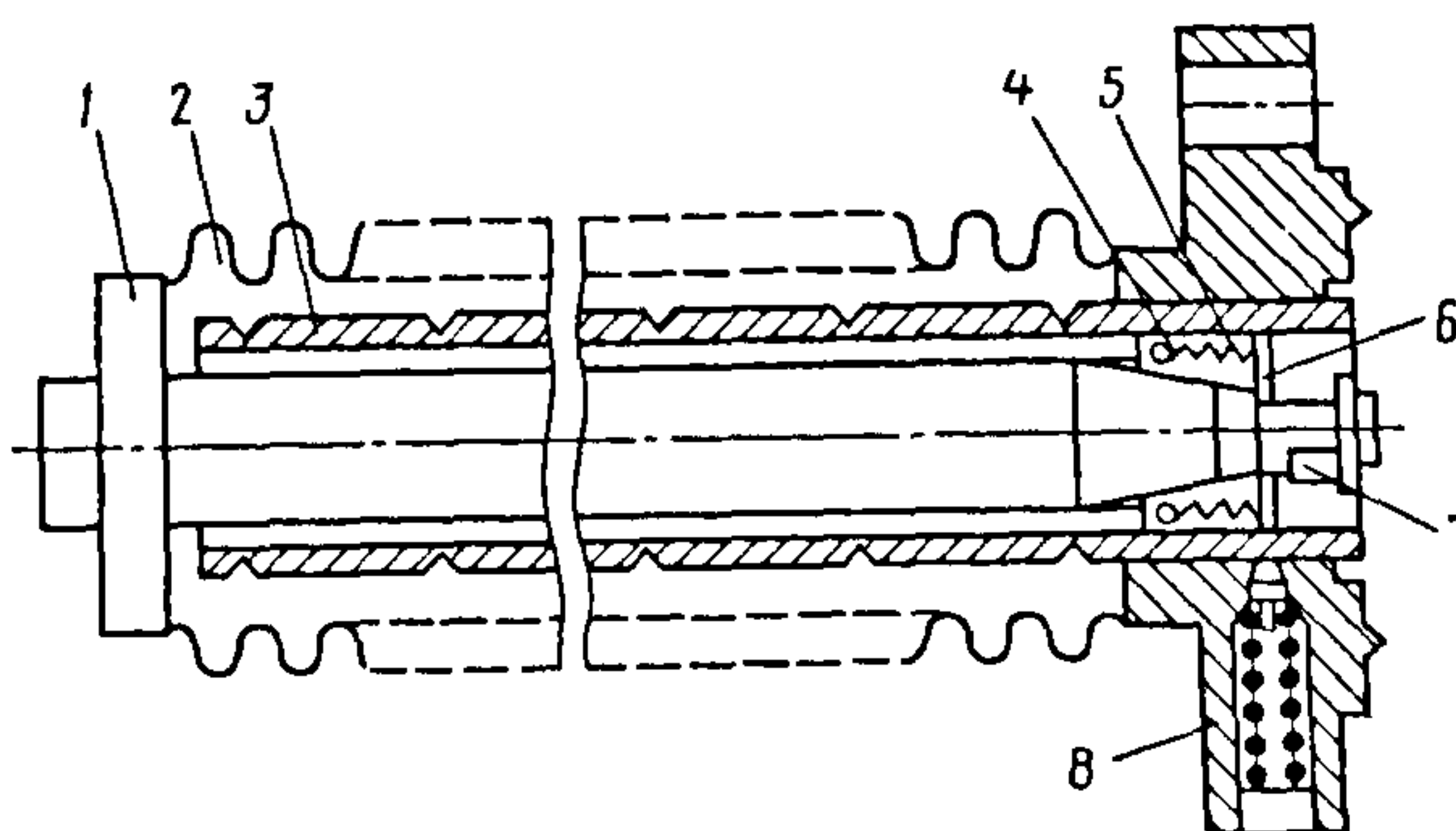


Рис. 8.10. Сильфонный ввод с шаговым перемещением



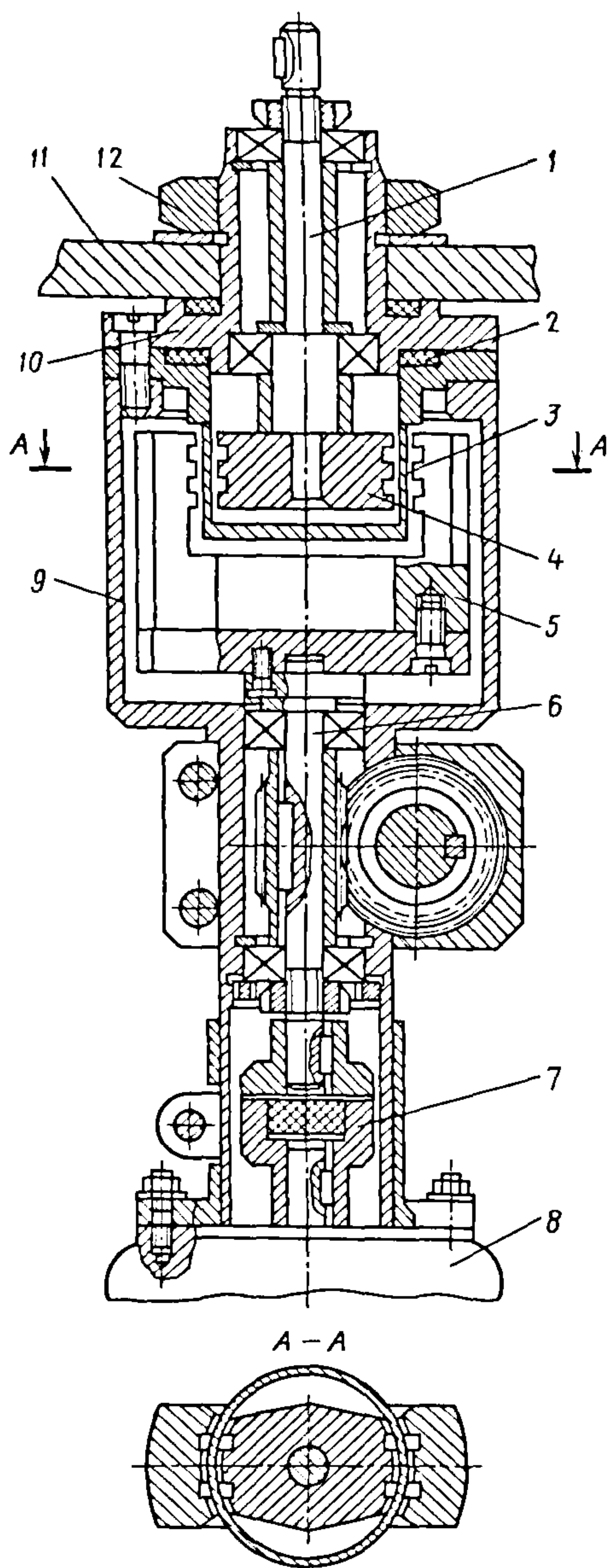


Рис. 8.11. Вакуумный ввод с постоянным магнитом

Устройство работает следующим образом. В первый момент вал 1 перемещается в сторону вакуумного объема на ход сильфона 2 вместе с гильзой 3. В это время втулка 6 находится в верхнем положении на валу и удерживается байонетным

зажимом. При этом шарики 4 под действием пружин 5 заклинены между конической поверхностью вала и внутренней поверхностью гильзы, а пружина фиксатора 8 сжимается под действием приложенной силы.

Затем вал перемещается от вакуумного объема в обратную сторону; при этом гильза, удерживаемая фиксатором, неподвижна; связь с валом через шарики нарушается. Затем все повторяется  $L/h$  раз, где  $L$  — длина рабочей части сильфона;  $h$  — ход сильфона. В результате гильза оказывается выдвинутой в вакуумный объем на расстояние, равное длине  $L$ .

После разгерметизации вакуумного объема втулку специальным ключом поворачивают на валу и опускают на шайбу 7; при этом пружины разжимаются и шарики 4 расклинивают вал и гильзу. Затем гильза занимает первоначальное положение, а втулка устанавливается в верхнем положении.

Вакуумный ввод с постоянным магнитом (рис. 8.11) включает в себя следующие основные части. Во втулке 10 на подшипниках установлен ведомый вал 1 с закрепленным на его конце якорем 4. В качестве герметизирующего элемента использован стакан 3 из коррозионно-стойкой стали. Толщина стенки стакана, расположенного в магнитном промежутке, составляет 0,5 мм. Вакуумная полость стакана герметизирована прокладкой 2. На конце ведущего вала 6 закреплены башмаки постоянного магнита 5.

Через упругую муфту 7 ведомый вал 1 соединен с ротором электродвигателя 8. Корпус 9 ввода прикреплен к стенке 11 вакуумной камеры гайкой 12.

При вращении магнитов 5 (от электродвигателя) под воздействием магнитного потока якорь и, соответственно, ведомый вал следуют за вращением магнита 5, обеспечивая крутящий рабочий момент на ведомом валу 1. Такой ввод может передавать сравнительно небольшой крутящий момент с частотой вращения порядка 3000 об/мин.



## 8.2. ПРЕЦИЗИОННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И ПРИВОДЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При технологических и исследовательских работах возникает необходимость точно устанавливать и перемещать исследуемые образцы в вакуумном пространстве. Для этих целей разработан ряд прецизионных манипуляторов.

Манипулятор, реализующий возвратно-поступательные линейные перемещения, показан на рис. 8.12. На фланце 6 винтами 4 закреплена скоба 2. В скобе имеется отверстие, в которое проходит шток 1 с микрометрической резьбой. Под скобой на подшипнике 5 расположен маховичок 3 с резьбой для штока, рифленной насечкой (в верхней части) и шкалой (в нижней части). Вращением маховичка можно перемещать шток, причем перемещение контролируют по шкале. Для герметизации манипулятора предназначен

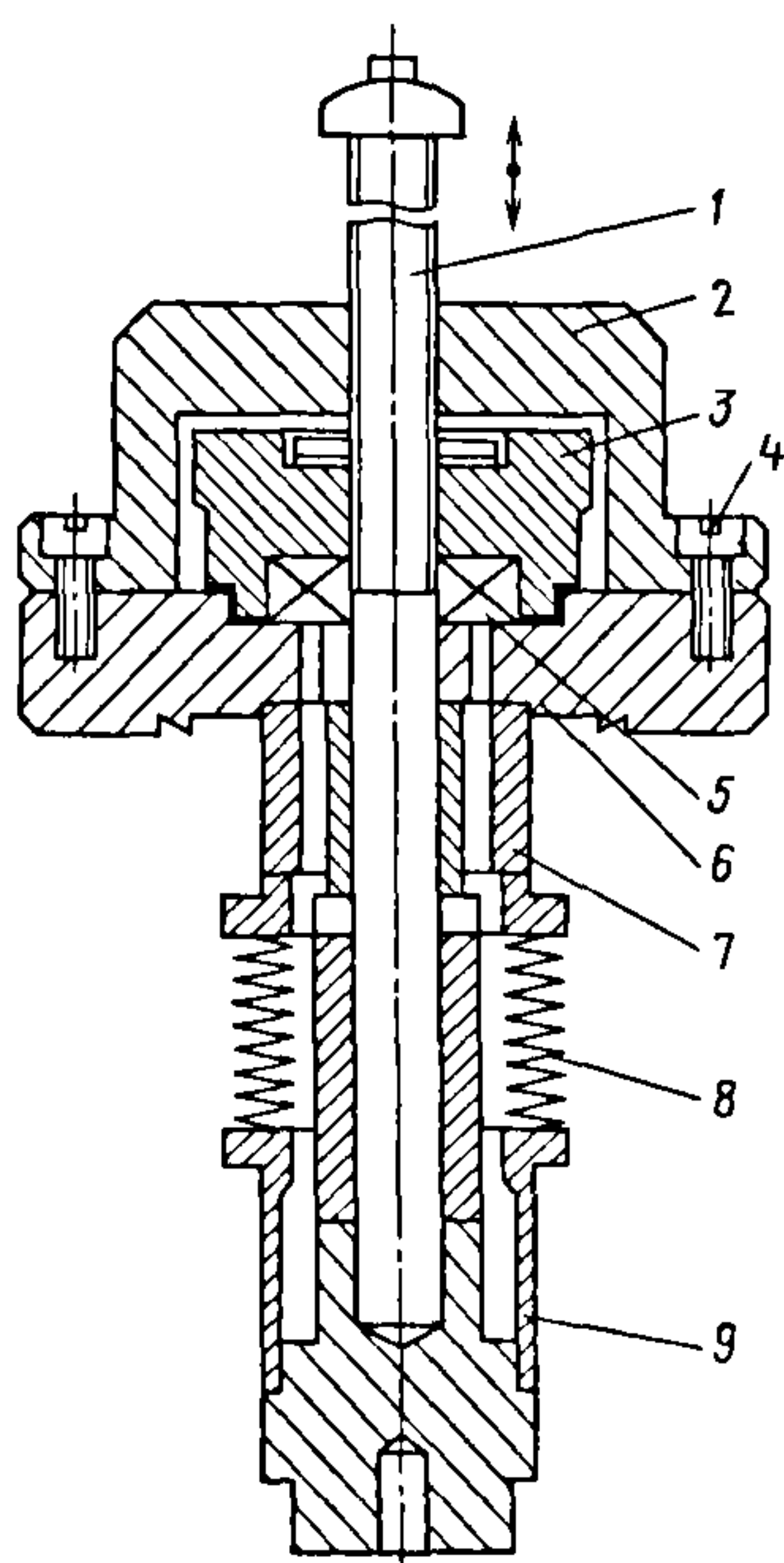


Рис. 8.12. Манипулятор для реализации возвратно-поступательных линейных перемещений

сильфон 8, приваренный одним концом к неподвижной втулке 7, другим — к подвижной втулке 9. Максимальное перемещение определяется допускаемым ходом сильфона.

Манипулятор, позволяющий вращать образец на угол до  $360^\circ$  (рис. 8.13), состоит из маховичка 16 с насечкой и шкалой, соединенного с фигурной шайбой 12 штифтом 14 и винтом 15. Маховичок вращается на подшипнике 10, укрепленном в корпусе 9 манипулятора разжимным кольцом 11.

На фигурной шайбе через подшипник 1 укреплена втулка 2, в которую входит ведущий валик 3 шарнира. Ведомый валик 6 размещен во втулках 7 и 8, жестко соединенных с фланцем 5 манипулятора. Уплотнение обеспечивает сильфон 4. При повороте маховичка движение через ведущий валик передается ведомому валику. Угол поворота отсчитывают по шкале; положение образца может быть зафиксировано винтом 13.

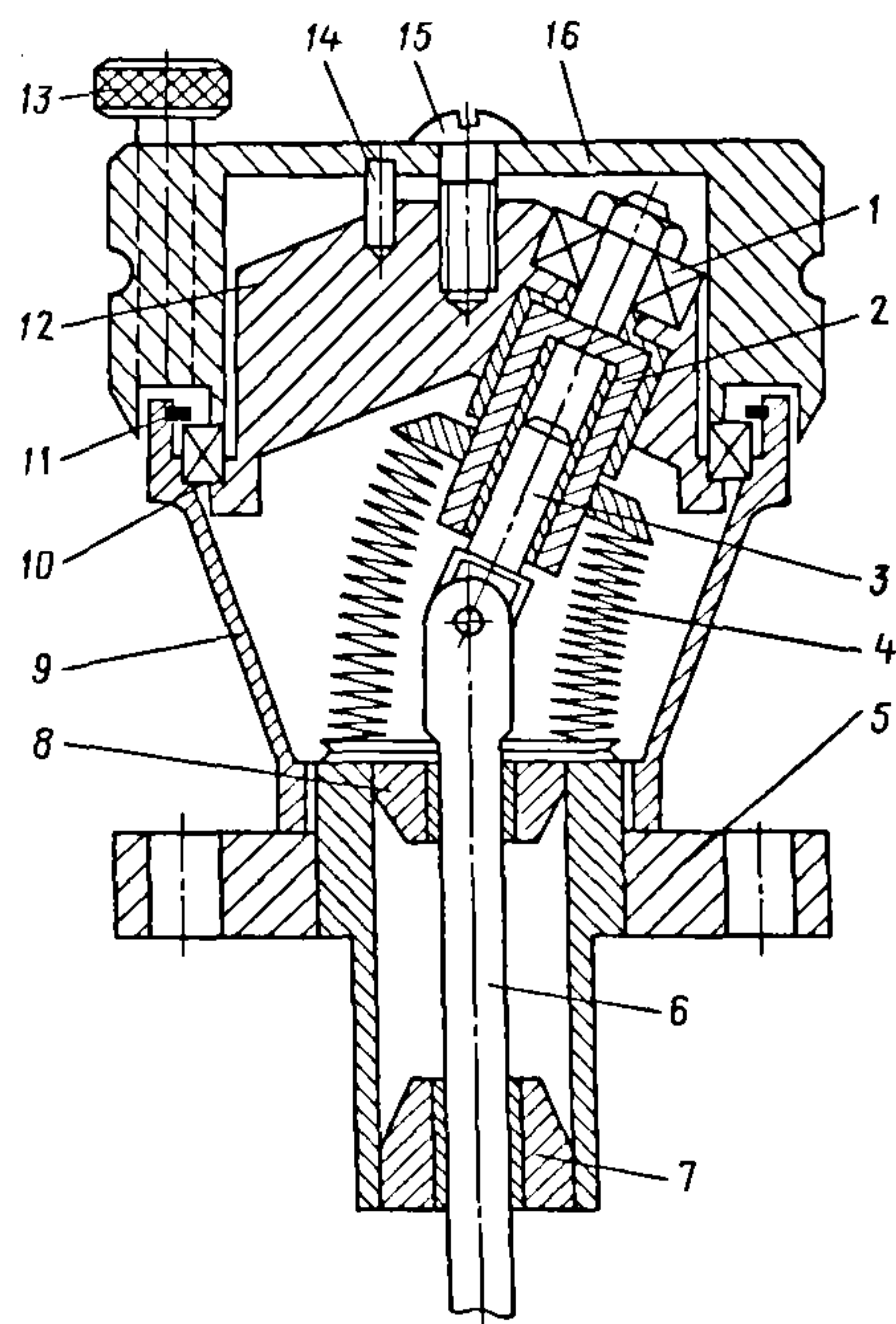


Рис. 8.13. Манипулятор для реализации вращения образца

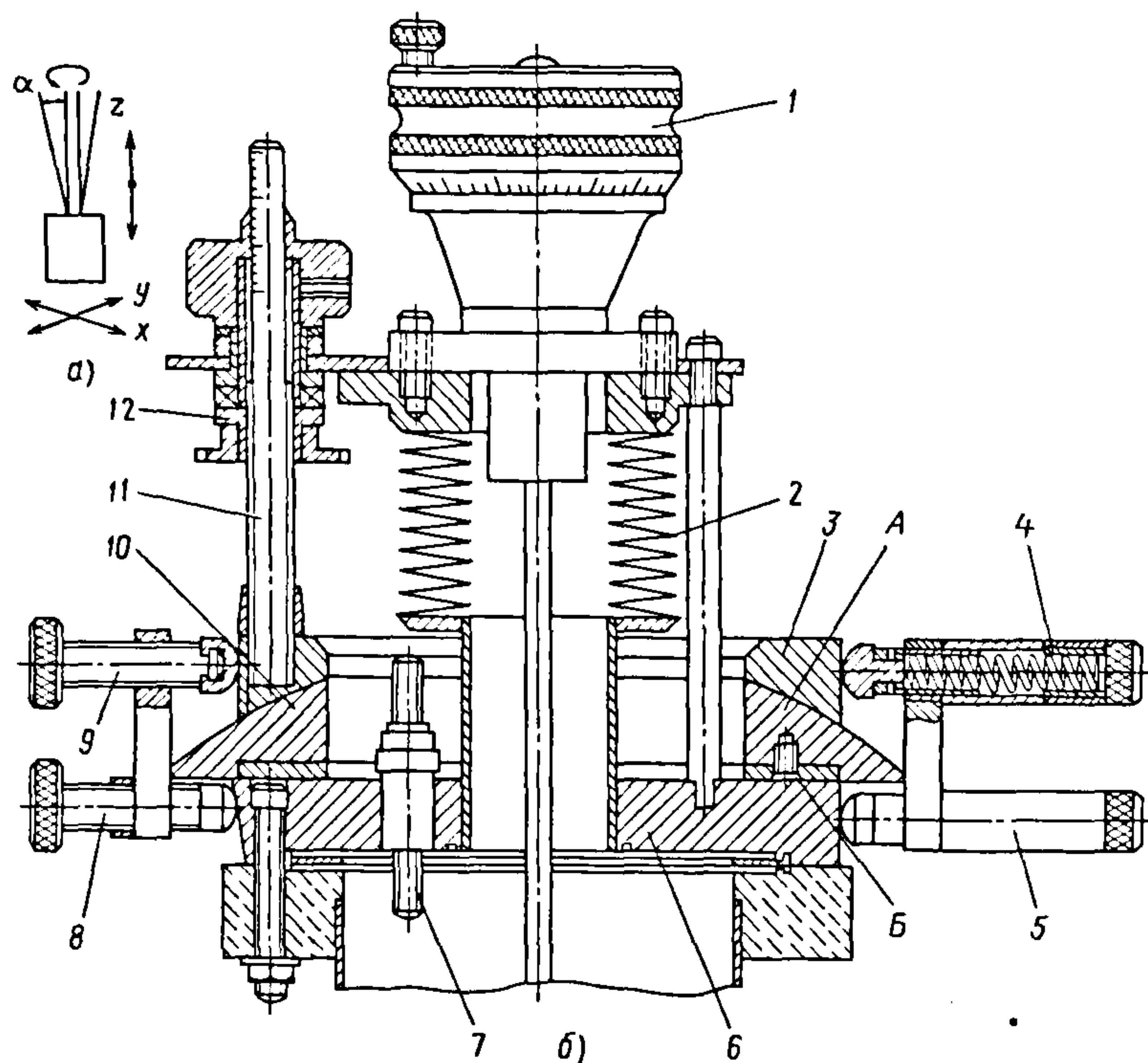


Рис. 8.14. Комбинированный манипулятор

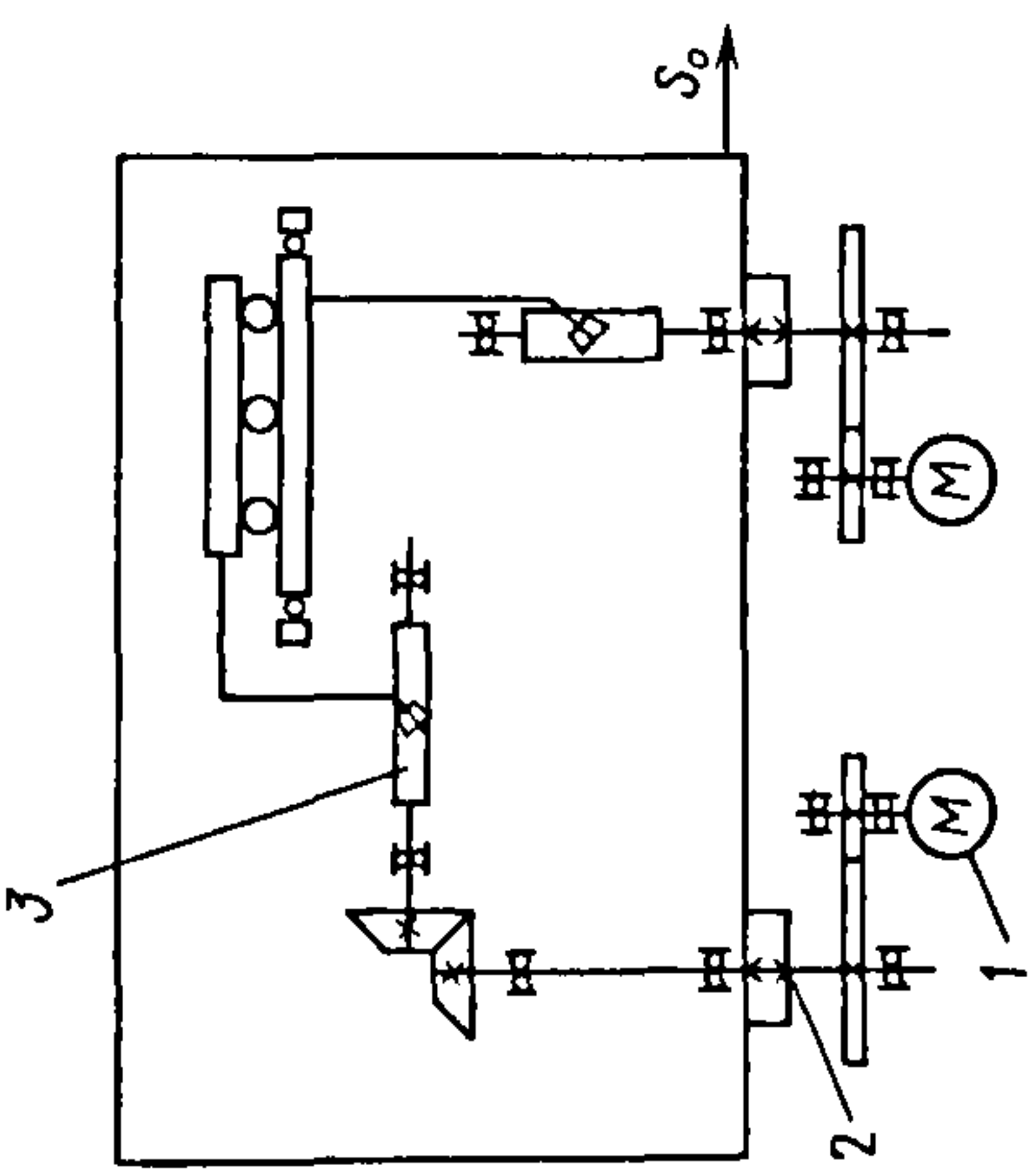
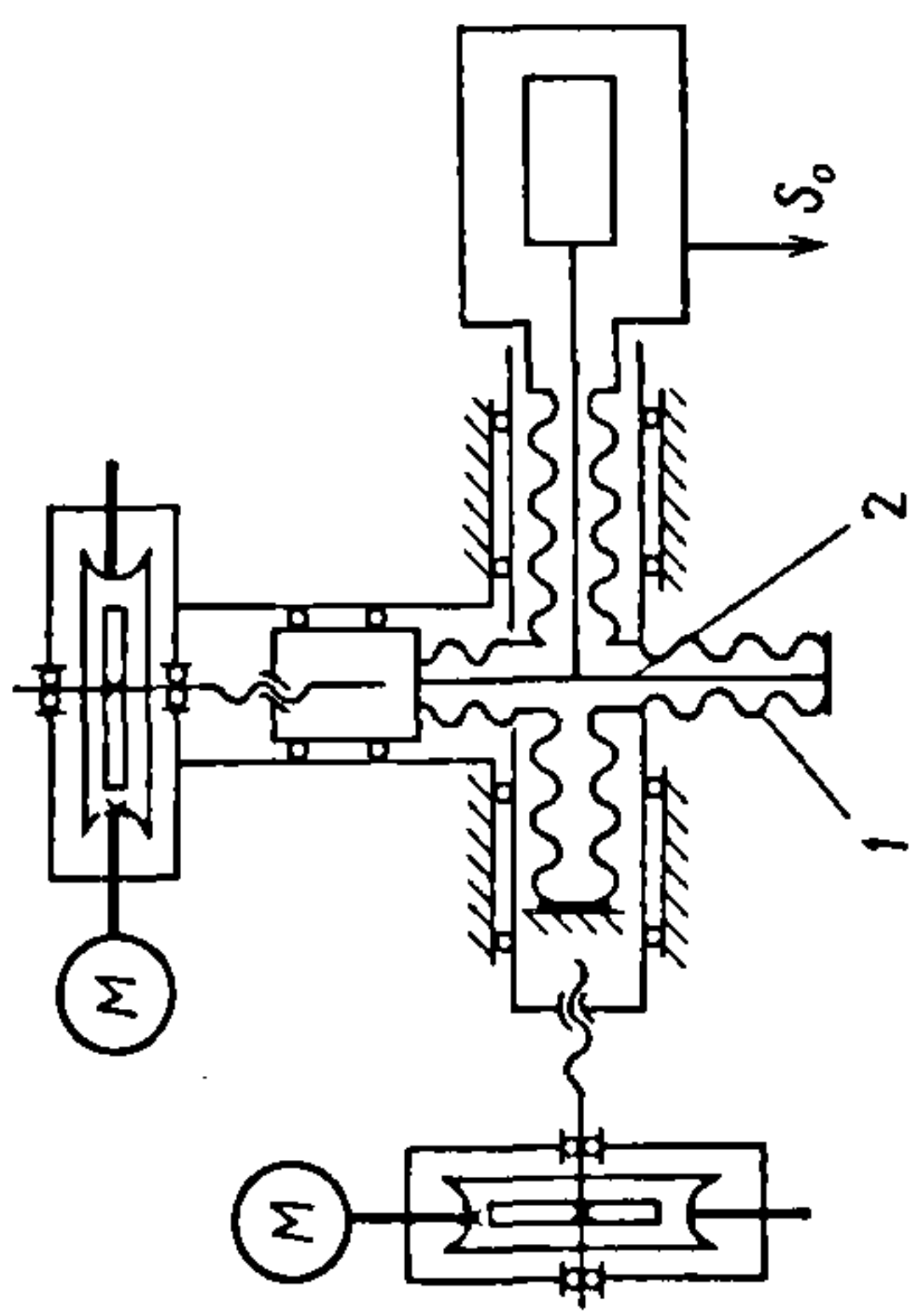
Комбинированный манипулятор обеспечивает перемещение образцов по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (рис. 8.14, а), поворот на угол  $\alpha$ , а также вращение на  $360^\circ$ . Для вращения образцов предназначен манипулятор вращения 1 (по конструкции идентичный показанному на рис. 8.13) – рис. 8.14, б. Манипулятор линейного перемещения 12 с приводным маховичком и шкалой отсчета на штоке 11 позволяет перемещать образец в вертикальном направлении. Движение в направлении осей  $x$  и  $y$  обеспечивает каретка 10, перемещаемая по поверхности Б с помощью винта 8 и пружинного подпора 5. Угловые движения образца определяются движением сферической шайбы 3 по сферической поверхности А каретки с помощью винта 9 и пружинного подпора 4. Для герметизации манипулятора предназначен сильфон 2. На фланце 6 манипулятора возможна установка и других элементов, например электрического ввода 7.

В технологическом и исследовательском оборудовании используются прецизионные вакуумные приводы линейных перемещений, схемы которых представлены в табл. 8.4.

Несмотря на то что наилучшими динамическими характеристиками обладают гидравлические, пневматические, пневмогидравлические, пьезоэлектрические устройства перемещений, наиболее часто в вакуумном оборудовании используются электромеханические системы, что связано с имеющейся элементной базой – отработанными типовыми конструкциями, пригодными для работы в вакууме. Электромеханические устройства перемещений, как правило, имеют длинные многоэлементные кинематические цепи, состоящие из электродвигателя, муфт, редуктора, передаточного механизма, герметизирующих элементов (вводов движения в вакуумную камеру), что приводит к снижению их жесткости, кинематической и динамической точности.



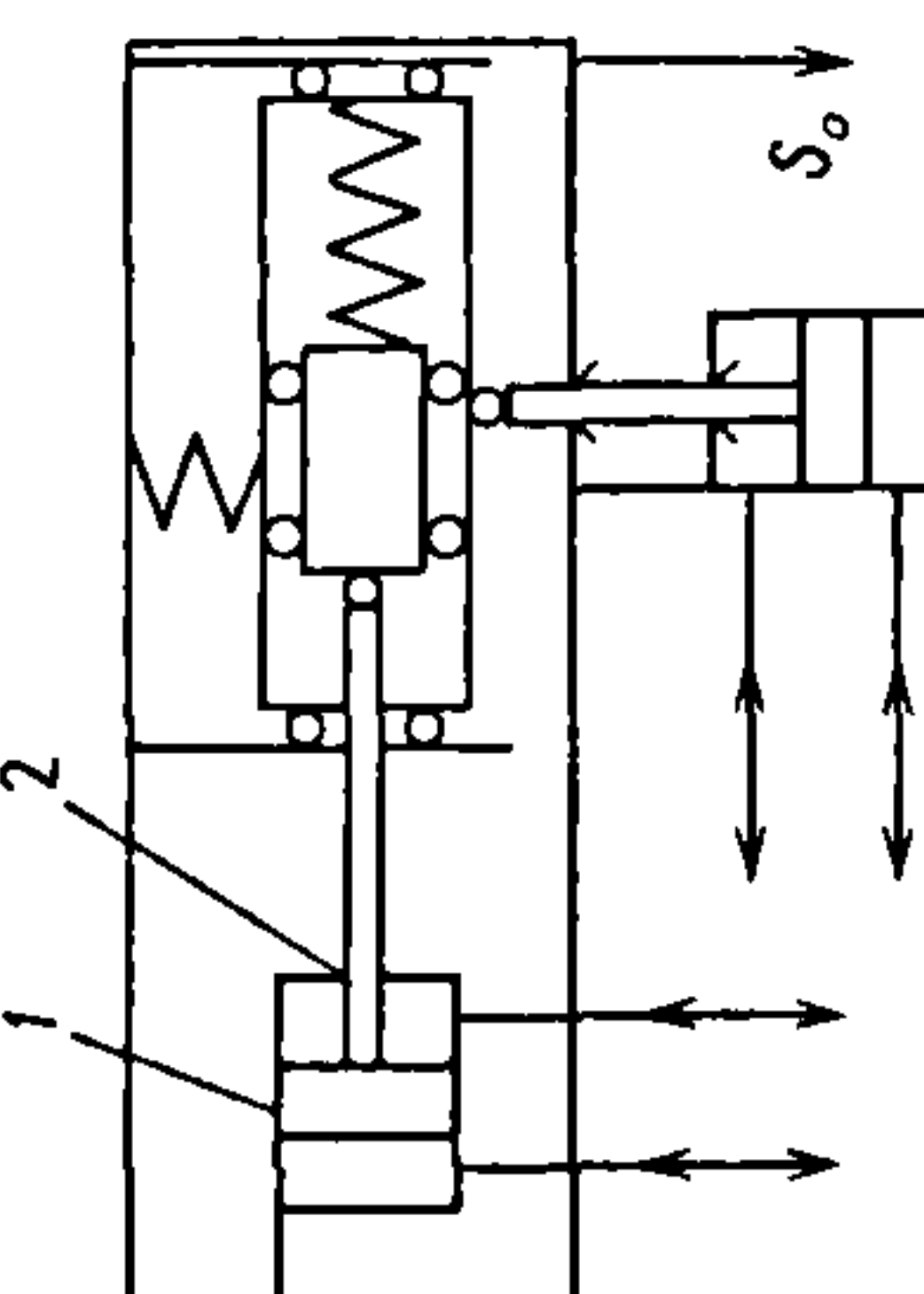
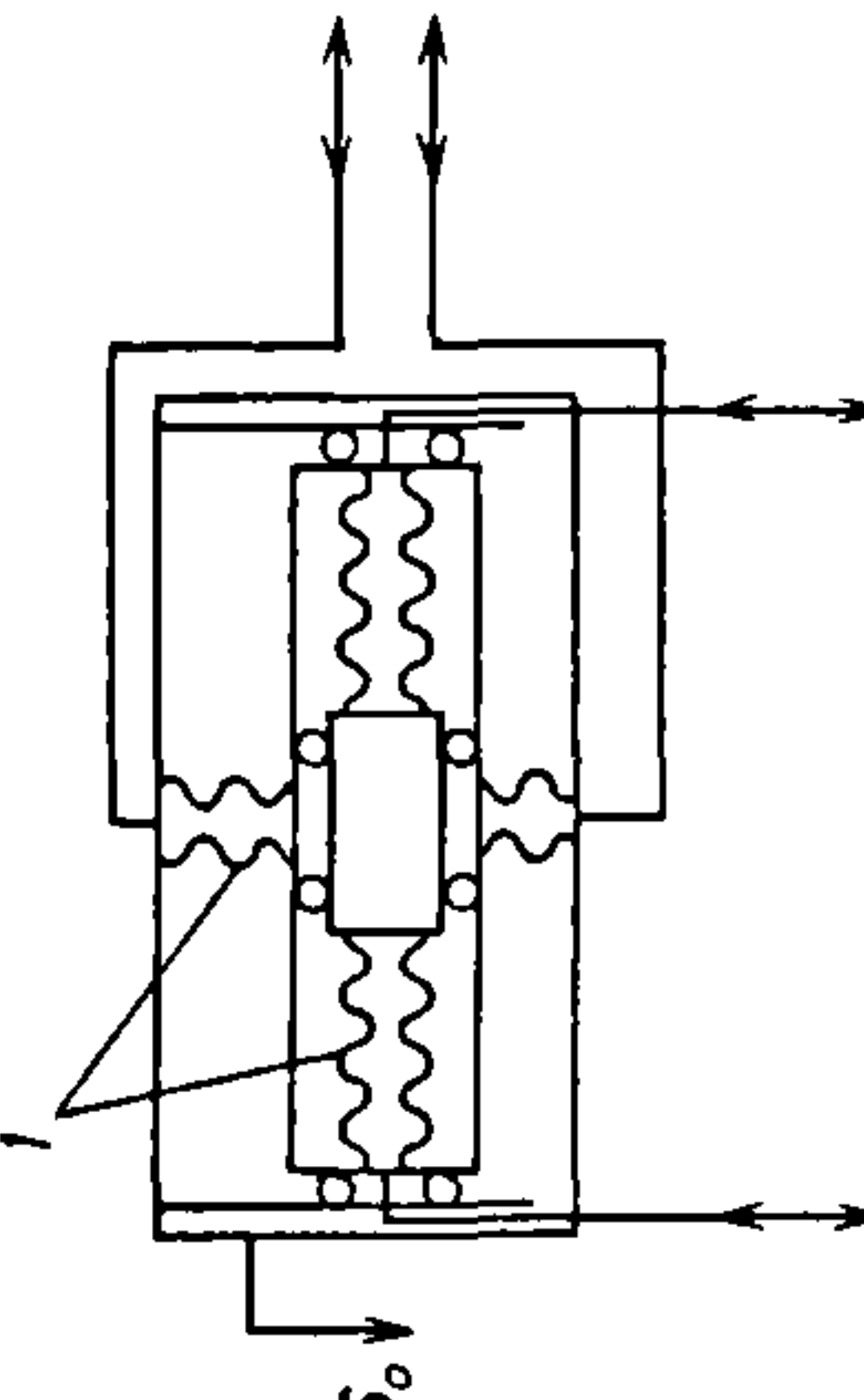
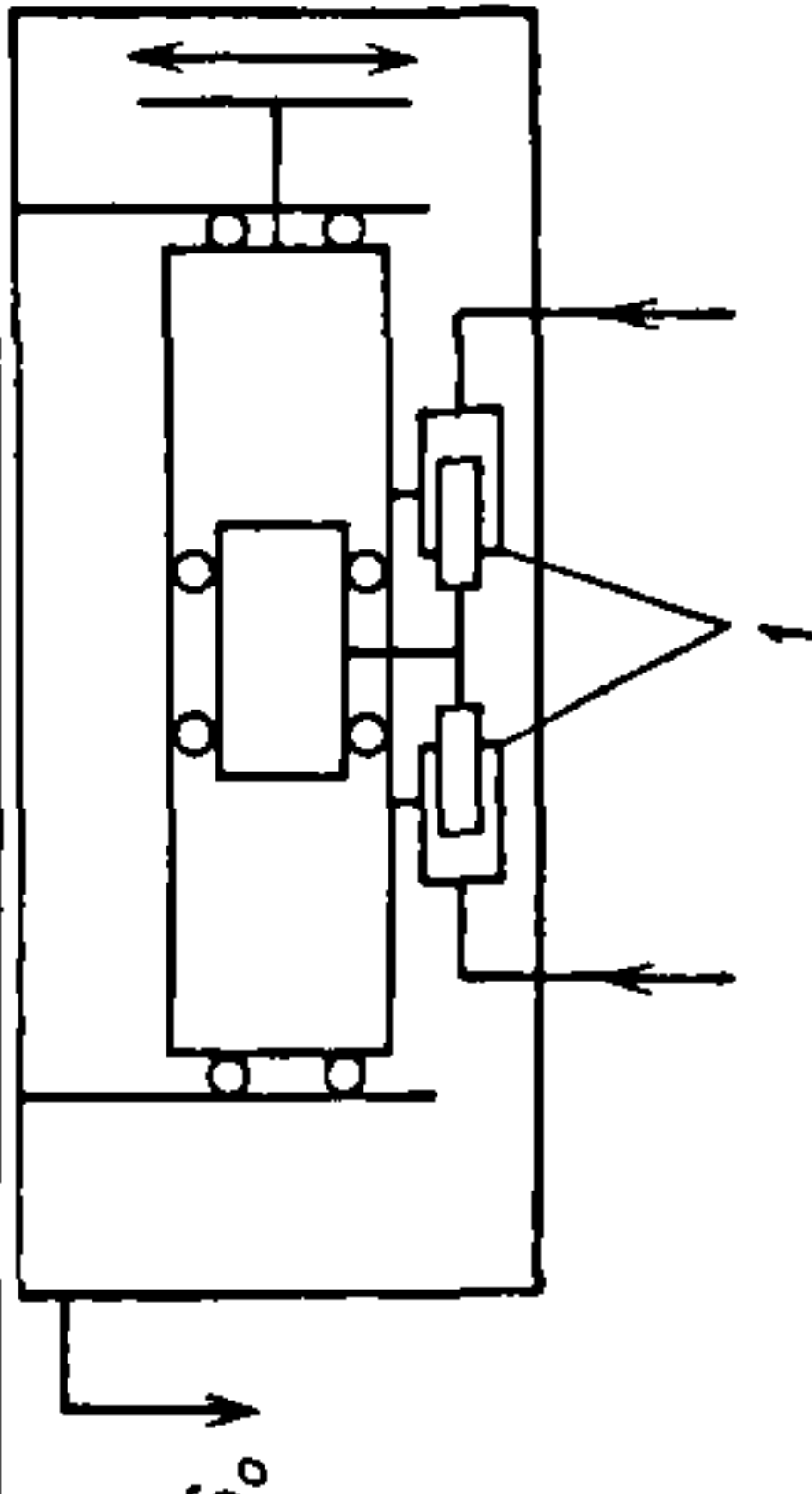
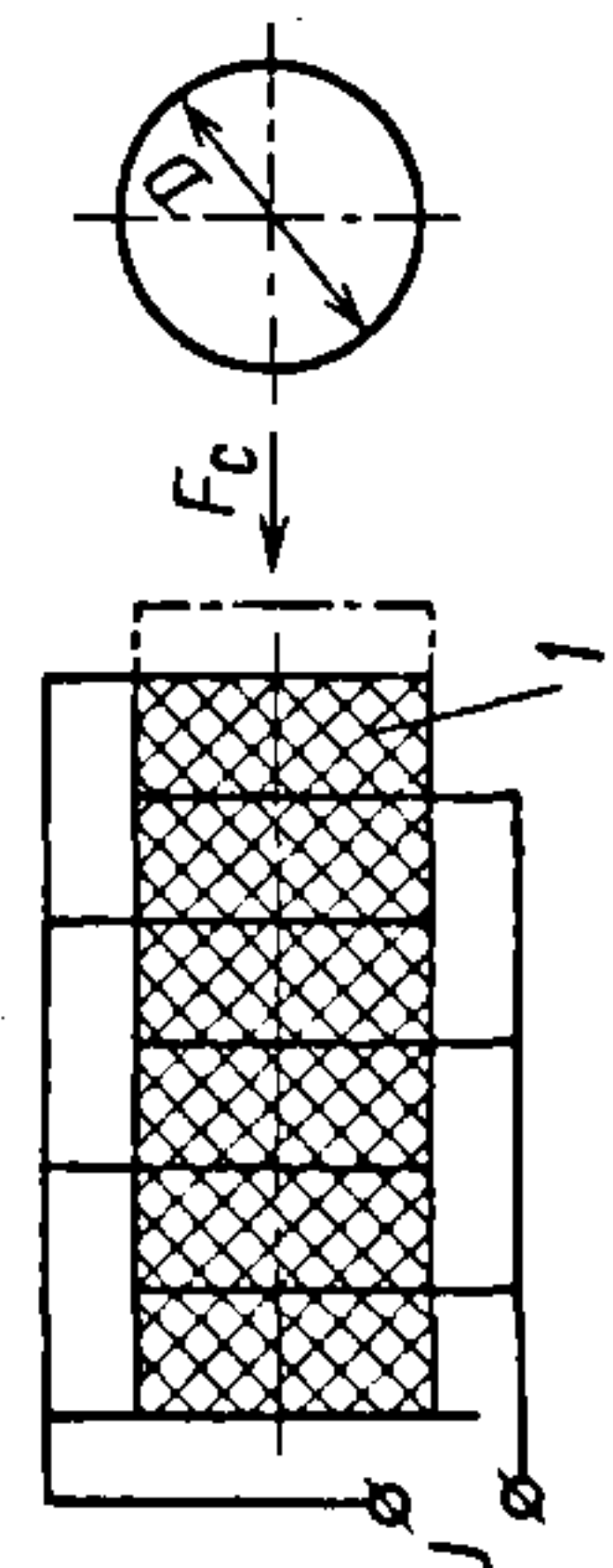
# 8.4 Схемы прецизионных вакуумных приводов

Тип привода	№ схемы и тип уплотнения	Принципиальная схема	Основные параметры			Особенности привода
			$p, \text{Па}$	$T, \text{с}$	$\delta, \text{мкм}$	
Электро-механический	1. Манжета		$10^{-5}$	$10^{-1}$	1	Двухкоординатный привод для микролитографии. Достоинство – большой диапазон перемещений. Недостатки – длинная кинематическая цепь, невысокие точность и быстродействие
	2. Сильфон		$10^{-8}$		1	Двухкоординатный привод для сверхвысоковакуумной (СВВ) оборудования. Достоинство – обеспечение СВВ. Недостатки – длинная кинематическая цепь, невысокие точность и быстродействие

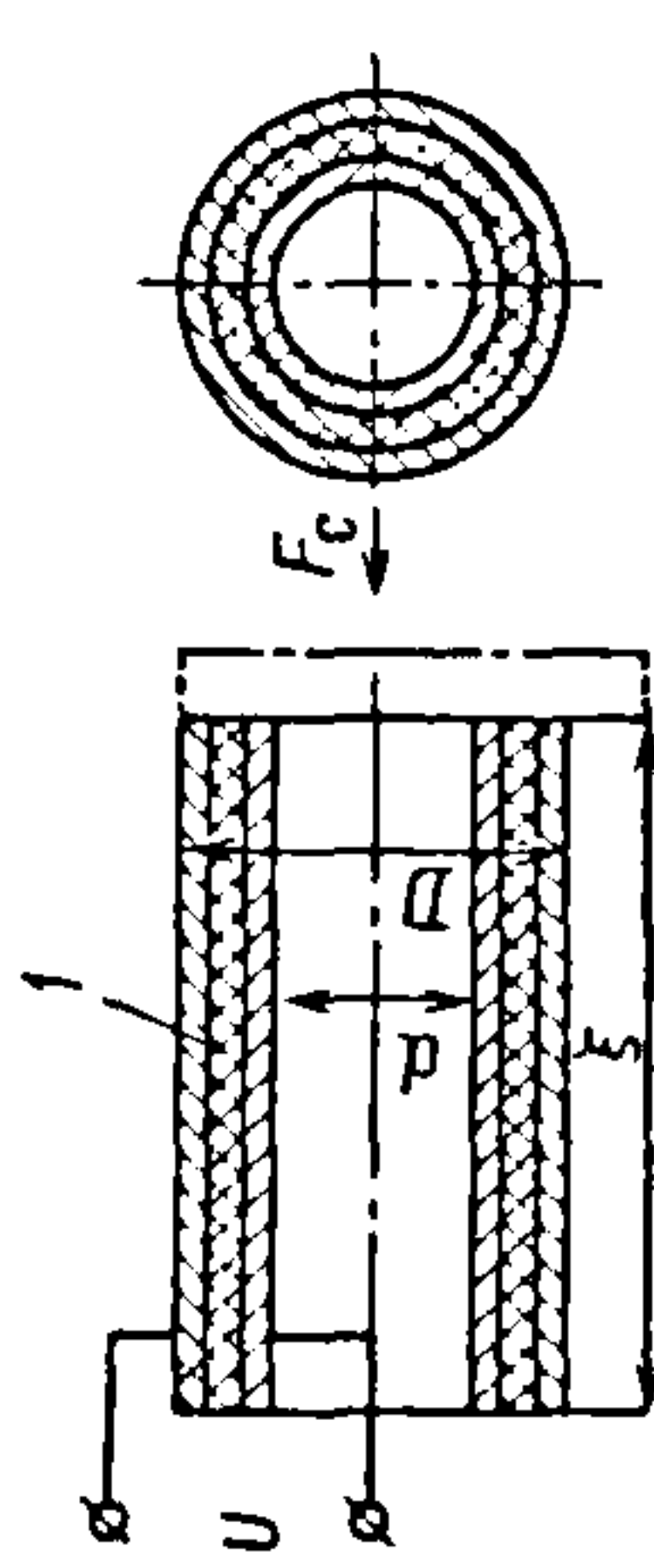
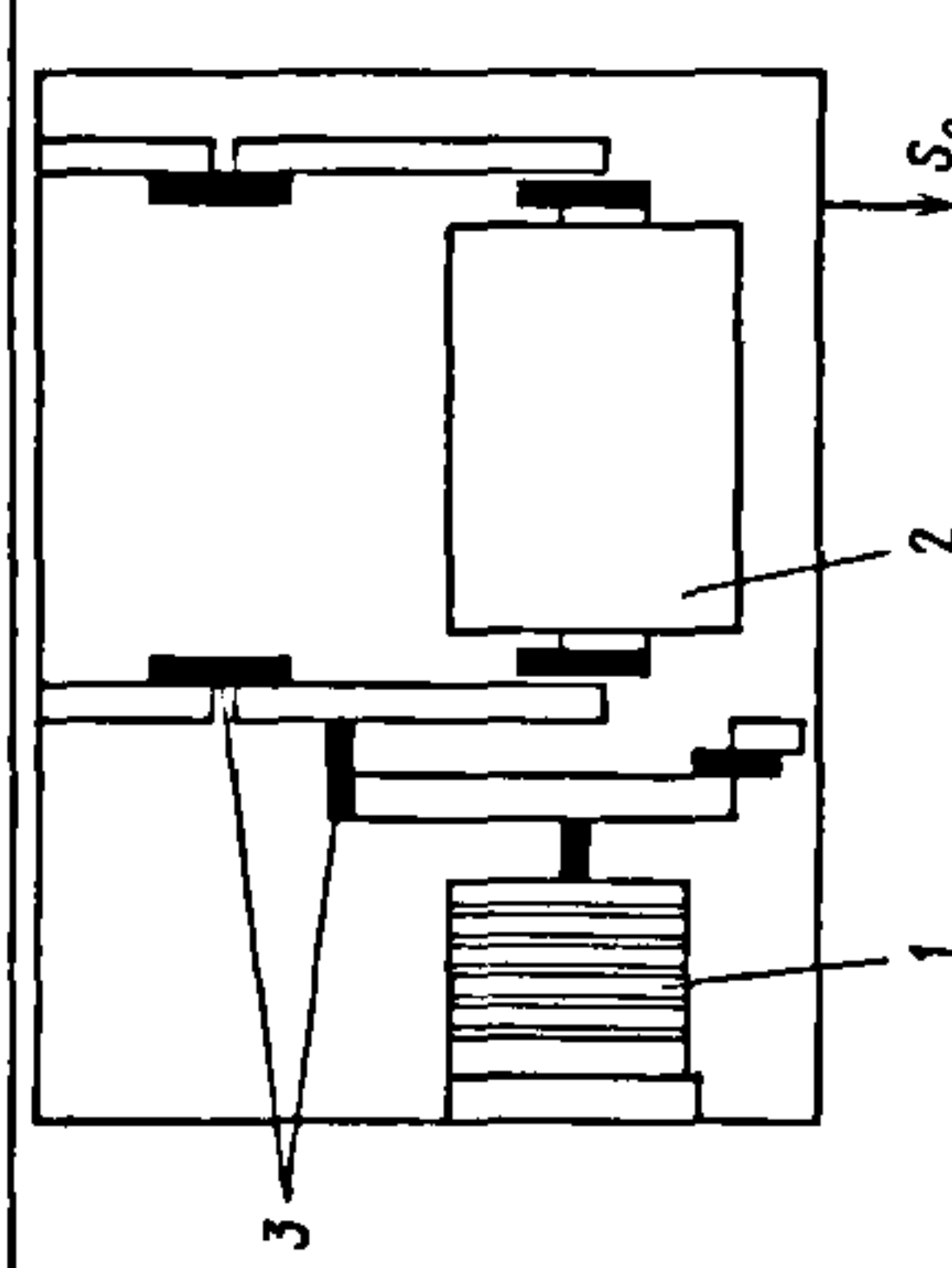
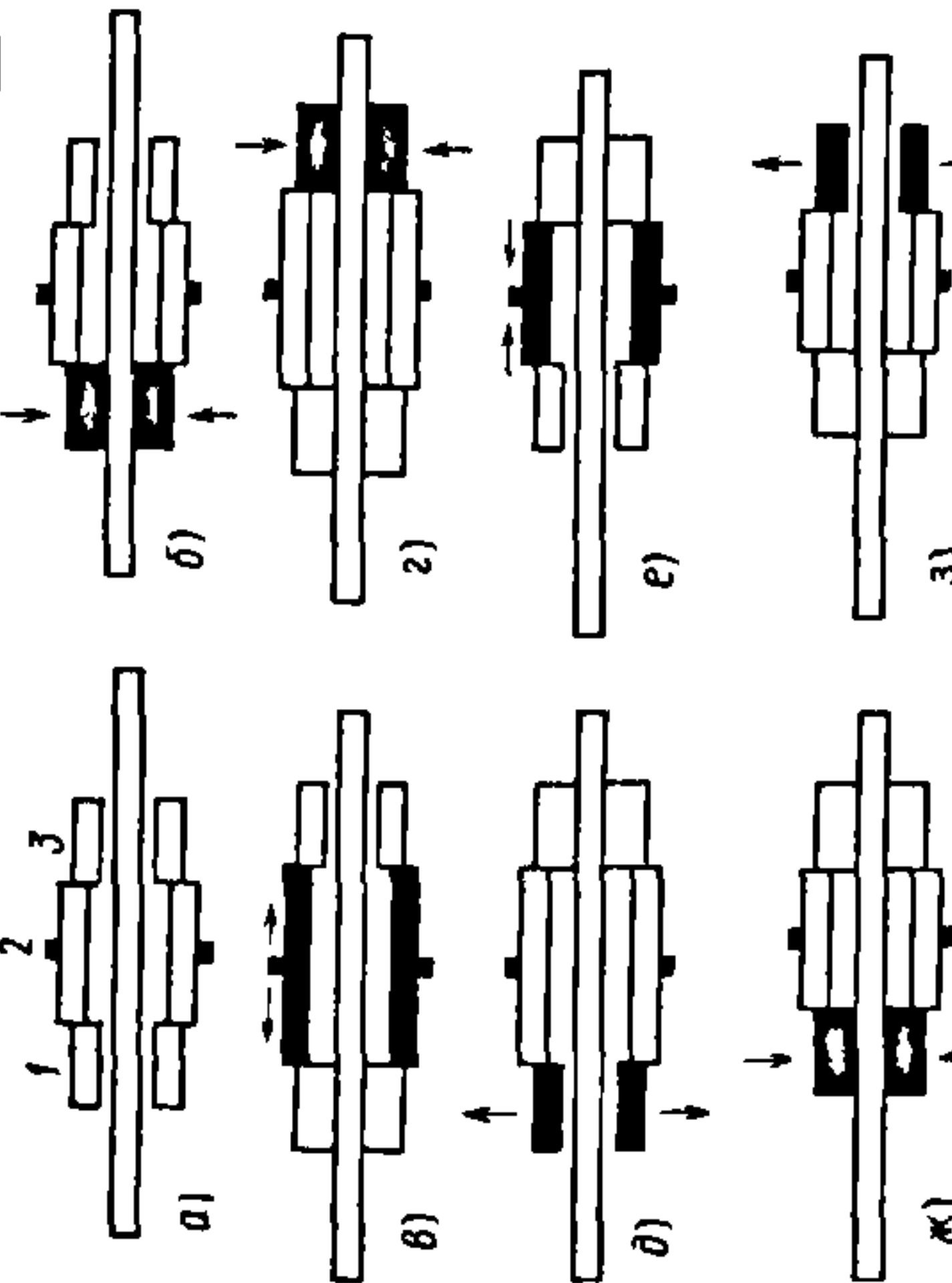
Продолжение табл. 8.4

Тип привода	№ схемы и тип уплотнения	Принципиальная схема	Основные параметры			Особенности привода
			$p$ , Па	$T$ , с	$\delta$ , мкм	
Электро-механический	3. ТРО		$10^{-5}$	$10^{-1}$	0,5	Двухкоординатный привод для микролитографии. Достоинства – обеспечение высокого вакуума (ВВ), более высокая точность. Недостатки – длинная кинематическая цепь, невысокое быстродействие
	4. Сильфон		$10^{-8}$	$10^{-1}$	5	Однокоординатный привод для СВВ-оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, большой диапазон перемещений. Недостатки – длинная кинематическая цепь, невысокая точность, быстродействие
	5. Манжета		$10^{-5}$	$10^{-2}$	1	Двухкоординатный привод для микролитографии. Достоинства – короткая кинематическая цепь, высокое быстродействие, большая передаваемая сила. Недостатки – невысокая точность, низкий вакуум, наличие паров масла
Пневмо-гидравлический						

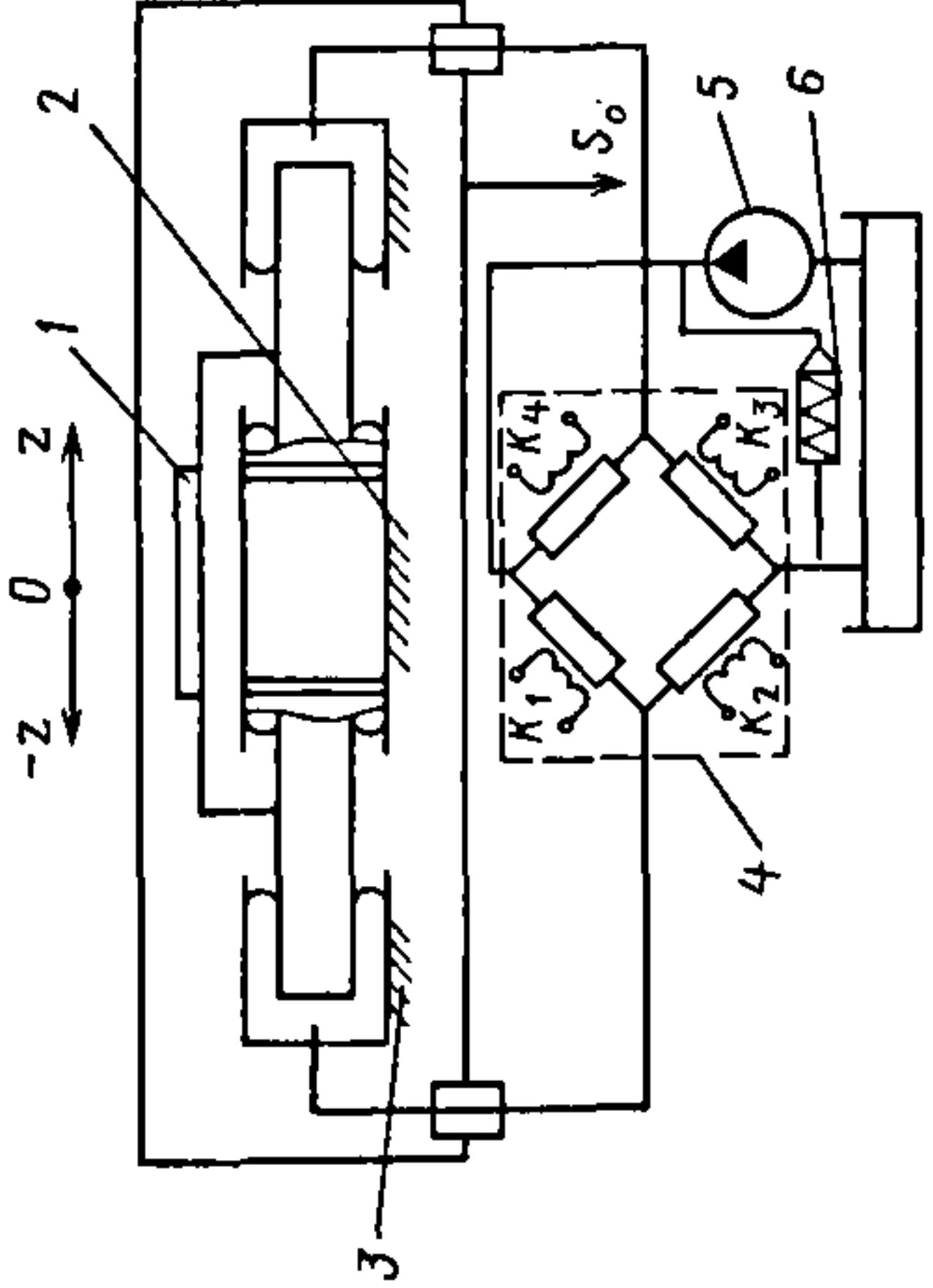
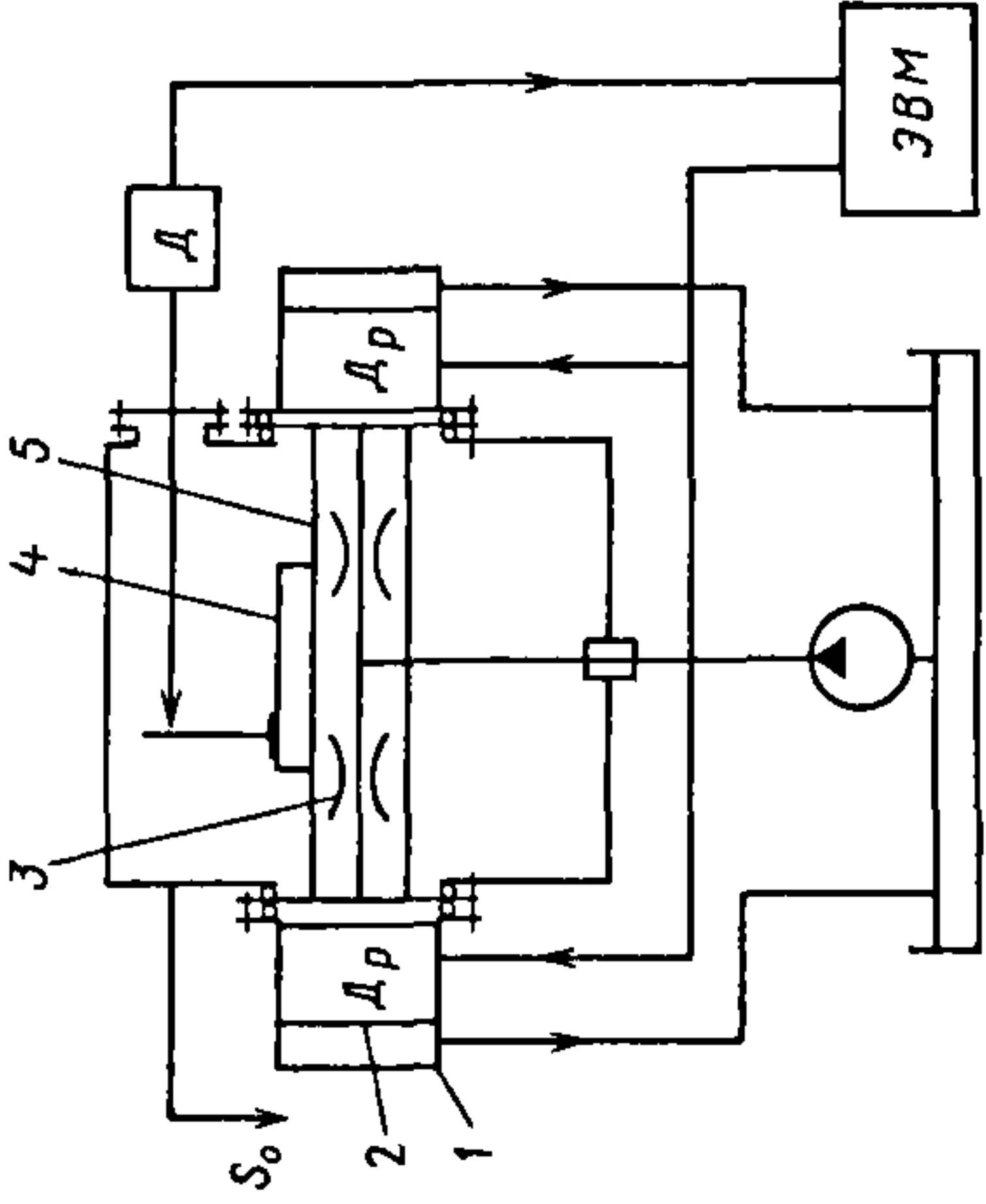


Гидрав- ли- ческий	6. Манжета		$10^{-4}$	$10^{-3}$	1	Двухкоординатный привод для микролиитографии. Достоинства – короткая кинематическая цепь, высокое быстродействие, большая передаваемая сила. Недостатки – невысокие точность и вакуум, наличие паров масла
	7. Сильфон		$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	Двухкоординатный привод для СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, короткая кинематическая цепь, высокие передаваемая сила, точность, быстродействие. Недостаток – малый диапазон перемещений
	8. ТРО		$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	Двухкоординатный привод для микролиитографии. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, более высокие точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность герметизирующих элементов – ТРО
	9. Нет уплотнения (пьезо-столбец)		$10^{-8}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	Однокоординатный привод для СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – малый диапазон перемещений и передаваемая сила
Пьезо- электри- ческий						

Продолжение табл. 8.4

Тип привода	№ схемы и тип уплотнения	Принципиальная схема	Основные параметры			Особенности привода
			$p$ , Па	$T$ , с	$\delta$ , мкм	
Пьезо-электрический	10. Нет уплотнения (пьезо-трубка)		$10^{-8}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	Трехкоординатный привод для СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – малый диапазон перемещений и передаваемая сила
	11. Нет уплотнения (пьезо-столбец)		$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	Однокоординатный привод для СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, высокие точность и быстродействие. Недостатки – малые передаваемые силы и диапазон перемещений
	12. Нет уплотнения (три пьезо-трубки)		$10^{-8}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	Однокоординатный привод для СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, высокие точность и быстродействие, большой диапазон перемещений. Недостаток – малая передаваемая сила



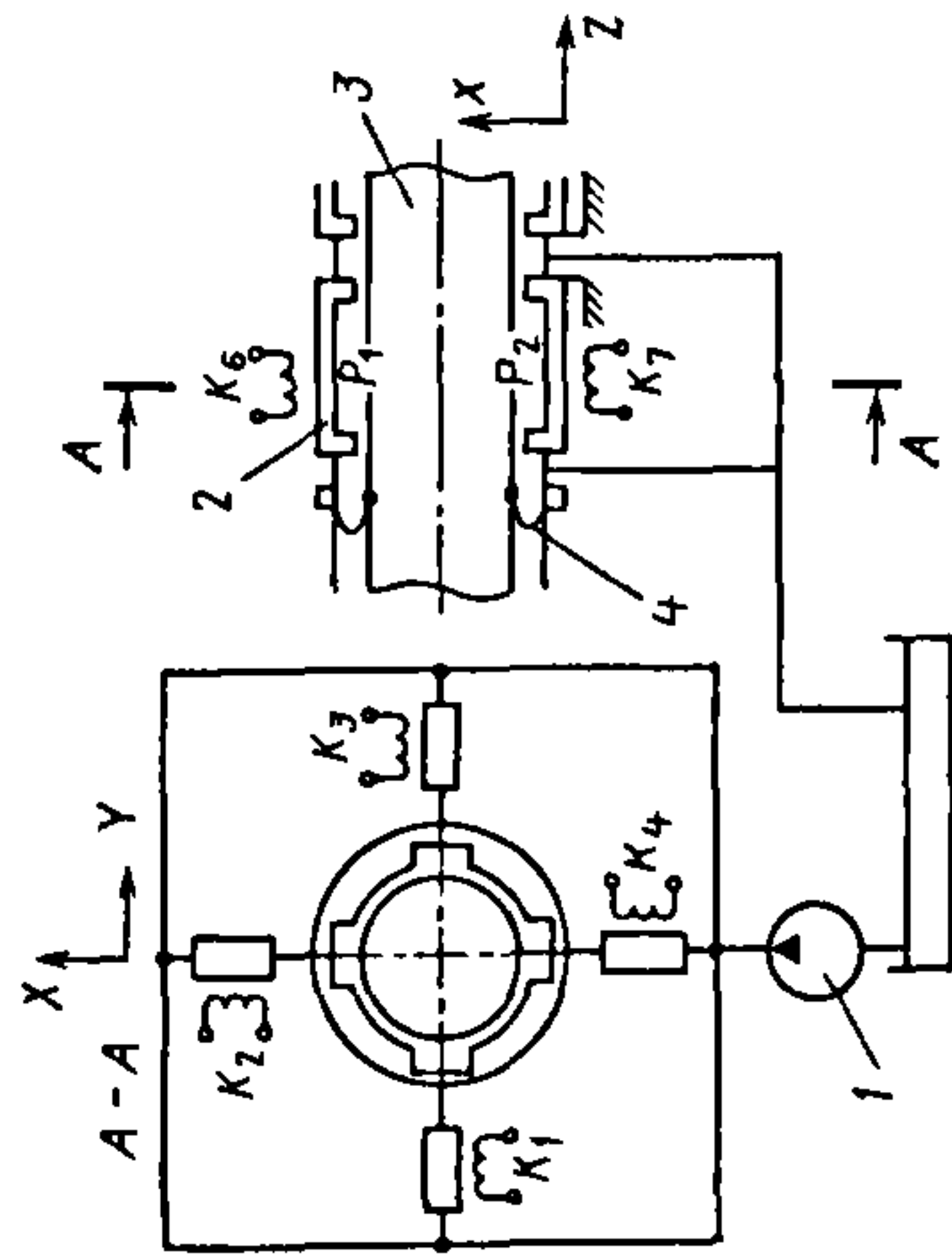
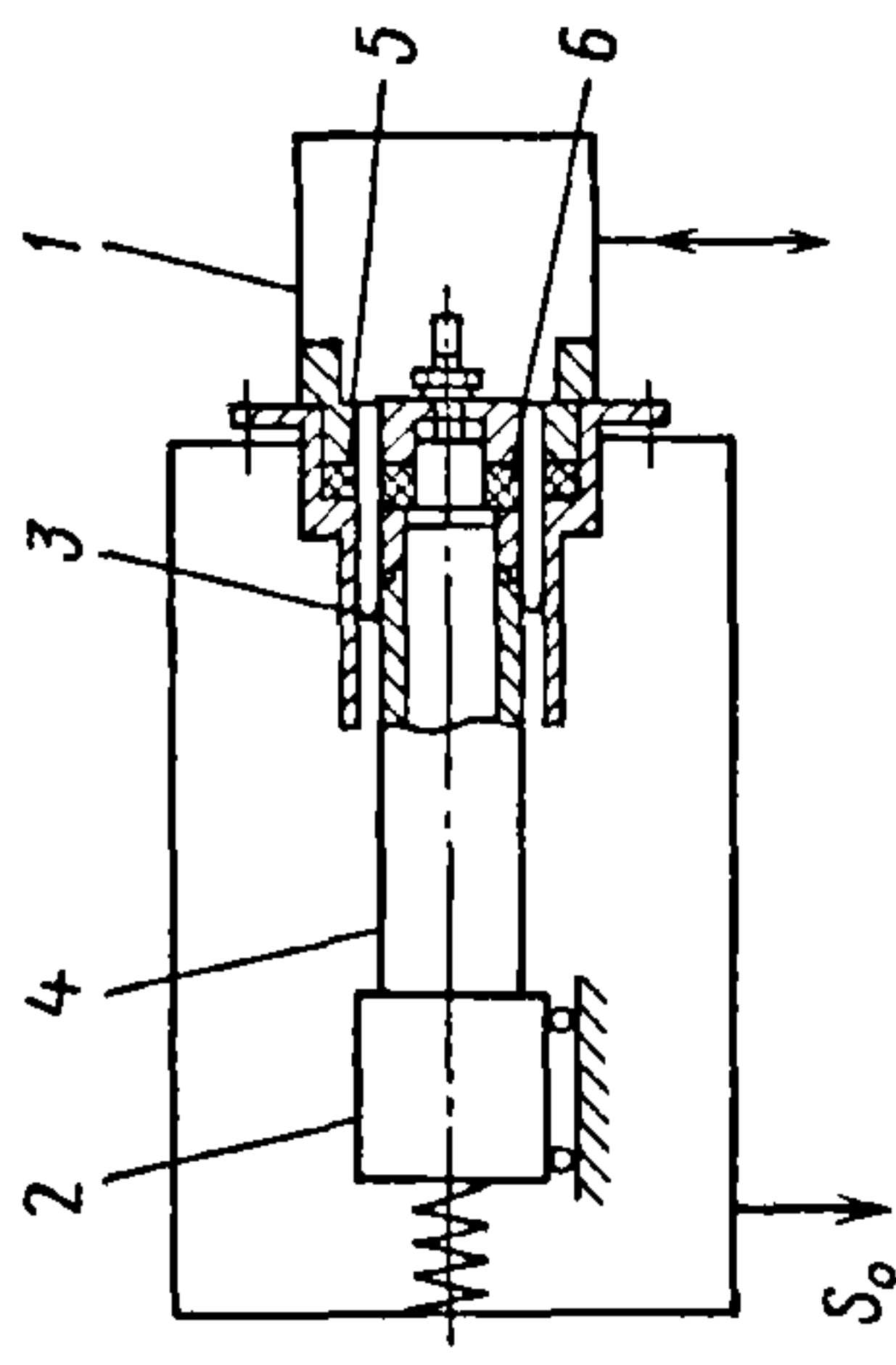
Магнито- реологический (МР)	13. ТРО		$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	Однокоординатный привод для ВВ оборудования. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность герметизирующих элементов – ТРО
	14. Плоская круглая мембрана		$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Однокоординатный привод для юстировки СВВ-оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – малый диапазон перемещений.

Продолжение табл. 8.4

Тип привода	№ схемы и тип уплотнения	Принципиальная схема	Основные параметры			Особенности привода
			$p$ , Па	$T$ , с	$\delta$ , мкм	
Магнито-реологический (МР)	15. Сильфон		$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Трехкоординатный привод для юстировки СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – малый диапазон перемещений
	16. Сильфон		$10^{-8}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Трехкоординатный привод для юстировки СВВ оборудования. Достоинства – обеспечение СВВ, короткая кинематическая цепь, высокие точность и быстродействие. Недостаток – малый диапазон перемещений



Окончание табл. 8.4

Магнито- реологи- ческий (МР)	17. ТРО		$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Пятикоординатный привод для ВВ оборудования. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие диапазон перемещений, точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность герметизирующих элементов – ТРО
	18. ТРО		$10^{-5}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Однокоординатный привод для ВВ оборудования. Достоинства – обеспечение ВВ, короткая кинематическая цепь, высокие диапазон перемещений, точность и быстродействие. Недостаток – невысокая прочность герметизирующих элементов – ТРО

На схеме 1 представлен двухкоординатный электромеханический привод на основе шаговых двигателей.\* Шаговые двигатели с муфтами и зубчатым редуктором размещены в атмосфере. Ввод вращательного движения в вакуумную камеру, которая откачивается с быстротой  $S_0$ , осуществляется с помощью двух вакуумных резиновых манжет 2. Далее вращательное движение преобразуется в поступательное посредством фрикционных пар «вал-ролик» 3.

На схеме 2 приведена двухкоординатная электромеханическая система установки электронной литографии, герметизация которой выполняется металлическими сильфонами 1, разгруженными от атмосферного давления Т-образной растяжкой 2.

На схеме 3 показана электромеханическая двухкоординатная позиционирующая система на шаговых двигателях для установки электронной литографии. Движение от шагового двигателя 1 через зубчатую передачу и передачу винт-гайка передается на нижнюю и верхнюю каретки координатного стола, расположенного в вакууме. Герметизация осуществляется посредством тонкостенных резиновых оболочек (ТРО) 2.

На схеме 4 представлен однокоординатный привод с большим диапазоном перемещения на основе планетарно-резьбовой передачи. Ведущий эксцентрик 1, приводимый во вращение от шестерни 2, передает вращение на гайку 4, совершающую круговое плоскопараллельное движение. Гайка находится в зацеплении с ведомым штоком 5, который перемещается поступательно. Резьба гайки выполняется с нулевым углом подъема (в виде ряда последовательных круговых канавок). Сильфоны 6, приваренные к корпусу передачи и промежуточной втулке 3, обеспечивают герметизацию привода.

На схемах 5 и 6 показаны варианты пневмогидравлического и гидравлическо-

го приводов на основе пар «поршень-цилиндр» 1 и сальниковых герметизаторов 2. В уплотнениях гидроцилиндров возникают большие силы статического трения скольжения, влияющие на погрешность позиционирования. В пневмогидравлическом приводе (см. схему 5) перемещение регулируется при помощи гидравлических дросселей, соединяющих полости гидроцилиндров.

На схеме 7 представлен вариант реализации гидравлического привода на основе металлических сильфонов 1, которые являются движителями и герметизаторами. Сила сопротивления в приводе возникает из-за деформаций сильфонов и изменяется в процессе движения координатного стола как по величине, так и по направлению.

На схеме 8 приведен гидравлический привод с использованием ТРО 1, имеющих малые упругие силы сопротивления.

На схеме 9 изображен пьезоэлектрический привод с одной степенью свободы. Привод представляет собой пьезостолбец, состоящий из соединенных друг с другом цилиндрических пьезоэлементов 1 диаметром  $D$  (дисков). На пьезоэлементы подается управляющее напряжение  $U$ , под действием которого столбец перемещается в осевом направлении и создает силу  $F_c$ .

На схеме 10 показан пьезоэлектрический привод с тремя степенями свободы. Привод представляет собой трубку 1 с внутренним  $d$  и внешним  $D$  диаметрами, состоящую из трубчатого пьезоэлемента, на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях которого расположены электроды. При подаче управляющего напряжения  $U$  на электроды свободный конец пьезотрубки перемещается по трем ортогональным координатам с осевой деформацией  $\xi$  и силой  $F_c$ . Пьезостолбец и пьезотрубка располагаются непосредственно в вакуумной камере и не имеют герметизирующих элементов.

На схеме 11 показан пьезоэлектрический механизм с упругими направляющими с одной степенью свободы. Осевое перемещение пьезостолбца 1 передается

\* Здесь и далее буквой М обозначен двигатель привода.



каретке 2 при помощи двухступенчатой рычажно-мультиплицирующей системы с упругими шарнирами 3. Пьезоэлектрический механизм располагается также непосредственно в вакуумной камере и не содержит герметизирующих элементов.

Для прецизионного перемещения объектов в СВВ по одной координате на большую величину (до сотен миллиметров) можно использовать шаговый привод на основе трех пьезотрубок. Последовательность этапов работы этого привода представлена на схеме 12.

В исходном состоянии (схема а) управляющий сигнал на пьезотрубки не подается и они находятся в нейтральном положении. При подаче сигнала на пьезотрубку 1 (схема б) она сжимается в радиальном направлении и захватывает шток. После этого поступает сигнал на пьезотрубку 2 (схема в) и она расширяется в осевом направлении, что приводит к перемещению штока на один шаг влево. При подаче сигнала на пьезотрубку 3 (схема г) происходит ее сжатие в радиальном направлении и захват штока. Затем сигнал с пьезотрубок 1 и 2 последовательно снимается, что приводит соответственно к расширению элемента 1 и возврату (сжатию) элемента 2 в исходное состояние (схемы д и е). После подачи сигнала на пьезотрубку 1 и снятия сигнала с пьезотрубки 3 (схемы ж и з) цикл заканчивается и модуль готов к перемещению на следующий шаг.

На схеме 13 приведен однокоординатный МР-привод с диапазоном перемещения по одной координате до 300 мм. В качестве рабочей среды в модуле используется МР-жидкость на основе микрочастиц карбонильного железа и вакуумного масла. Важнейшими элементами привода являются МР-распределитель 4, насос 5 и ТРО, герметизирующие направляющие 2 и два гидроцилиндра 3. МР-распределитель 4 состоит из четырех МР-дросселей, содержащих электромагнитные катушки  $K_1-K_4$  и магнитопроводы с рабочими зазорами, через которые протекает рабочая

среда. Перемещаемый объект 1, направляющие 2 со штоком и гидроцилиндры 3 находятся в вакуумной камере, остальные элементы – в атмосфере. В случае полного закрытия МР-дросселей рабочая среда перетекает в сливной бак через предохранительный клапан 6.

Привод работает следующим образом. Рабочая среда при помощи насоса 5 подается из сливного бака через МР-распределитель в гидроцилиндры 3. Изменяя величину электрического тока в катушках  $K_1-K_4$ , можно регулировать напряженность магнитного поля в рабочих зазорах МР-дросселей и, соответственно, динамическую вязкость рабочей среды, протекающей через них. Таким образом, можно менять давление в гидроцилиндрах 3 и осевую силу, действующую на шток. Поступательное перемещение по оси  $z$  передается от гидроцилиндров 3 через шток к каретке координатного стола, на которой закреплен перемещаемый объект 1. В процессе перемещения штока по оси  $z$  в направляющих 2 ТРО перекачиваются со штока на гидроцилиндры 3 и обратно, обеспечивая полную герметичность соединения.

Для микроперемещений в небольшом диапазоне (до 1 мм) с нанометровой точностью и миллисекундным быстродействием объектов в исследовательском и технологическом СВВ-оборудовании, а также для юстировки инерционных объектов может быть использован однокоординатный МР-привод реологического типа, приведенный на схеме 14. Привод состоит из двух позиционирующих узлов 1 с МР-дресселями 2 (Др), капиллярных дресселей 3, каретки 4, подвижного штока 5, датчика перемещения (Д). Узлы 1 герметизированы при помощи плоских металлических мембран, которые также играют роль упругих направляющих. Привод работает следующим образом. Рабочая среда – МР-жидкость поступает от насоса через капиллярные дрессели 3 и МР-дрессели 2 в узлы 1. Подавая сигналы в электромагнитные катушки МР-дресселей 2 от



управляющей ЭВМ, можно регулировать перепад давления рабочей среды в позиционирующих узлах 1 и, соответственно, перемещение штока 5 вдоль оси, которое измеряется датчиком (Д).

Трехкоординатный юстировочный МР-привод с диапазоном перемещения до 500 мкм (схема 15) содержит перемещаемую каретку 1, основание 2, сильфон 3, МР-дроссели 4, перемещаемый объект 5, опору 6, упругий шарнир 7, датчик перемещения 8. Принцип работы привода следующий. Рабочая МР-жидкость подается насосом в гидростатическую опору 6 через МР-дроссели 4  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ . Каретка 1 перемещается относительно основания 2 по трем координатам:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Герметизирующим элементом является сильфон 3 из коррозионно-стойкой стали. Перемещаемый объект 5 закреплен на упругом шарнире 7 и совершает линейное перемещение по оси  $Z$  и поворот вокруг осей  $X$ ,  $Y$ . Линейное перемещение измеряется датчиком 8, датчики угловых перемещений не показаны. Сигнал с датчика 8 поступает через аналого-цифровой преобразователь АЦП в управляющую ЭВМ. Сигналы управления подаются через цифроаналоговый преобразователь ЦАП на МР-дроссели 4.

Трехкоординатный МР-привод (схема 16) с увеличенным диапазоном юстировки (до 10 мм) содержит три пары гидроцилиндров 4, упругий узел подвески 2, перемещаемый объект 1, тяги 3 для передачи перемещений от МР-привода к объекту, гидравлическую насосную станцию (на схеме не показана), входные МР-дроссели 5, подвижный корпус 6, выходные МР-дроссели 7, сильфоны 8, 9.

МР-привод работает следующим образом. Рабочая жидкость подается при помощи гидравлической насосной станции в три пары гидроцилиндров 4 через входные МР-дроссели 5 и далее перемещается в сливной бак через выходные МР-дроссели 7. При подаче управляющих сигналов на входные и выходные МР-дроссели меняется динамическая вязкость

рабочей жидкости и создается перепад давления в каждой паре гидроцилиндров 4. Под действием перепадов давления возникают силы, перемещающие объект 1 посредством тяг 3 по линейной координате  $Z$  и двум угловым координатам вокруг осей  $X$  и  $Y$ . Перемещаемый объект 1 закреплен на упругом узле подвески 2, имеющем три степени свободы: линейную  $Z$  и две угловые – вокруг осей  $X$  и  $Y$ .

Пятикоординатный привод (схема 17) позволяет перемещать объекты по одной длинноходовой координате  $Z$  (в диапазоне до 300 мм), двум координатам  $X$  и  $Y$  (в диапазоне до 200 мкм) и двум угловым координатам вокруг осей  $X$  и  $Y$ . Привод содержит гидравлический насос 1, неподвижный корпус 2 и подвижный цилиндрический шток 3, герметизированный с двух сторон при помощи ТРО 4. Модуль представляет собой гидростатическую направляющую цилиндрического типа с четырьмя камерами высокого давления в корпусе 2, образующими опорный элемент направляющей. Для обеспечения устойчивости подвижного штока направляющая включает в себя два опорных элемента, расположенных вдоль оси  $Z$ . На входе камер высокого давления размещены МР-дроссели с электромагнитными катушками  $K_1$ – $K_4$ , на выходе МР-дроссели с катушками  $K_6$ ,  $K_7$  ( $K_5$ ,  $K_8$  – не показаны). Модуль работает следующим образом. Рабочая среда – МР-жидкость подается при помощи насоса 1 из сливного бака через входные МР-дроссели с катушками  $K_1$ – $K_4$  в камеры высокого давления. Протекая через радиальные рабочие зазоры между подвижным цилиндрическим штоком и магнитопроводами выходных МР-дросселей с катушками  $K_5$ – $K_8$ , рабочая жидкость попадает в сливной бак. Изменяя электрический ток в катушках МР-дросселей, можно регулировать давление в камерах модуля. При этом подвижный шток «всплывает» в корпусе 2 и может перемещаться вдоль осей  $X$  и  $Y$ , совершать поворот вокруг этих осей, а также при помощи дополнительного длиннохо-



дового привода (на схеме не показан) перемещаться вдоль оси  $Z$ .

На схеме 18 показан однокоординатный привод гидравлического типа с использованием МР-жидкости. Привод содержит гидроцилиндр 1, каретку 2, герметизатор – ТРО 3, закрепленную на гидроцилиндре 1 и штоке 4 посредством резиновых уплотнений 5 и металлических колец 6.

Привод работает следующим образом. В гидроцилиндр 1 подается МР-жидкость, под действием которой возникает осевая сила, действующая на шток 4 и перемещающая каретку 2. При возвратно-поступательном движении штока 4 ТРО 3 перекачивается со штока 4 на гидроцилиндр 1 и обратно, создавая только упругие силы сопротивления. В этом случае полностью отсутствуют силы трения скольжения штока и гидроцилиндра, что позволяет обеспечить высокую точность и плавность перемещения.

### 8.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ ВВОДЫ

Электрические вакуумные вводы служат для подачи электропитания к нагревательным устройствам, датчикам, двигателям и другим объектам, расположенным в вакуумных камерах. Их подсоединяют к последним стандартным вакуумными соединениям. Материал для токоподводящих элементов и изоляторов, а также вид вакуумного уплотнения выбирают в соответствии с конкретными условиями эксплуатации: напряжением, силой тока, частотой и температурой ввода. В зависимости от электрических параметров вводы подразделяют на низковольтные (сильноточные и слаботочные), высоковольтные и высокочастотные. Конструкции электрических вводов показаны на рис. 8.15. Плотность тока низковольтных (до 250 В) неохлаждаемых вводов не должна превышать: для меди и стали 5, для алюминия 4, для никеля и молибдена 3 А/мм<sup>2</sup>. Конструкция разборного сильно-

точного ввода (до нескольких десятков ампер) показана на рис. 8.15, а. Изолирующими и уплотняющими элементами между шпилькой и фланцем 1 в таких вводах являются резиновое кольцо 3 и втулка 2.

Низковольтные вводы, предназначенные для пропускания тока силой более >100 А, как правило, снабжают водяным охлаждением токоввода 1 (рис. 8.15, б). При этом плотность тока не должна превышать 10...12 А/мм<sup>2</sup>. Уплотняющими и изолирующими элементами являются кольцо 2 и втулка 3.

Для прогреваемых высоковакуумных установок используют металлокерамические вводы (рис. 8.15, в), состоящие из штыря 3 и керамической трубки 1, к концам которой вакуумно-плотно припаяны втулки 2 из кобальта. Пайку выполняют твердыми припоями в вакуумных или водородных печах. Ввод с помощью переходной втулки приваривают к фланцу. Конструктивные размеры, мм, металлокерамических вводов, применяемых при напряжении 4 кВ и силе тока соответственно 35, 250 и 850 А, приведены ниже:

$D_1$ .....	5; 10; 15
$D_2$ .....	20; 45; 55
$D_3$ .....	22; 46; 57
$B$ .....	35; 40; 45
$L_{\min}$ .....	30; 50; 50
$L_{\max}$ .....	8; 8; 8

Металлостеклянные вводы (рис. 8.15, г) представляют собой вакуумно-плотные спаи стеклянного элемента 2 с металлическим элементом 1 и переходной втулкой 3. Для металлостеклянных вводов наиболее часто используют платинит, ковар, вольфрам. Применяют также многостырьковые вводы, расположенные на едином изоляторе или в одном фланце (рис. 8.15, д).

Высоковольтные вводы (рис. 8.15, е) применяют при напряжении > 250 В, а также в случае необходимости исключить утечки в измерительных цепях. При напряжении > 1,5 кВ изоляторы 1 выполняют ребристым для увеличения площади изолирующей поверхности. В целях защиты изолирующих поверхностей от пыли устанавливают экраны 2.

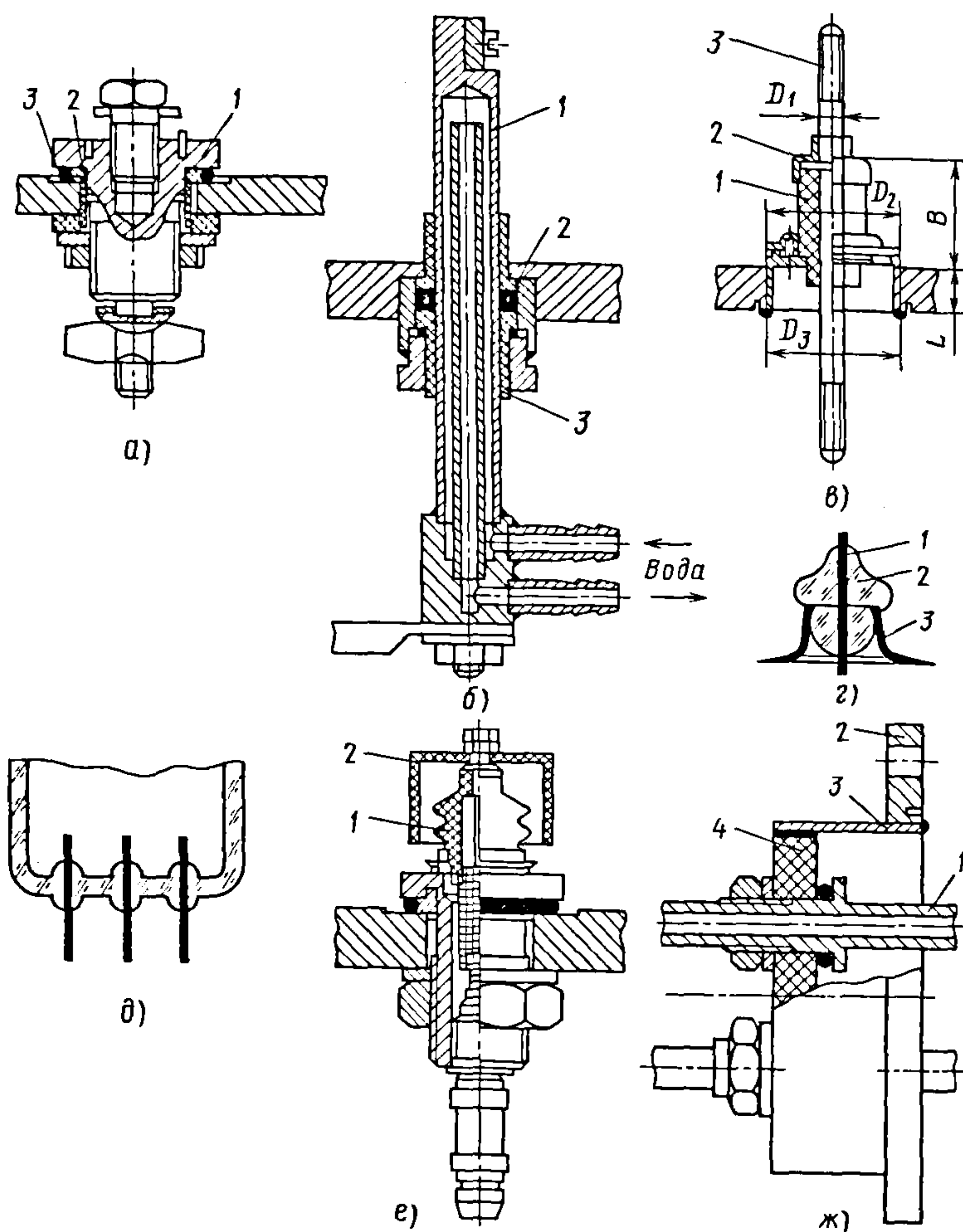


Рис. 8.15. Варианты электрических вводов

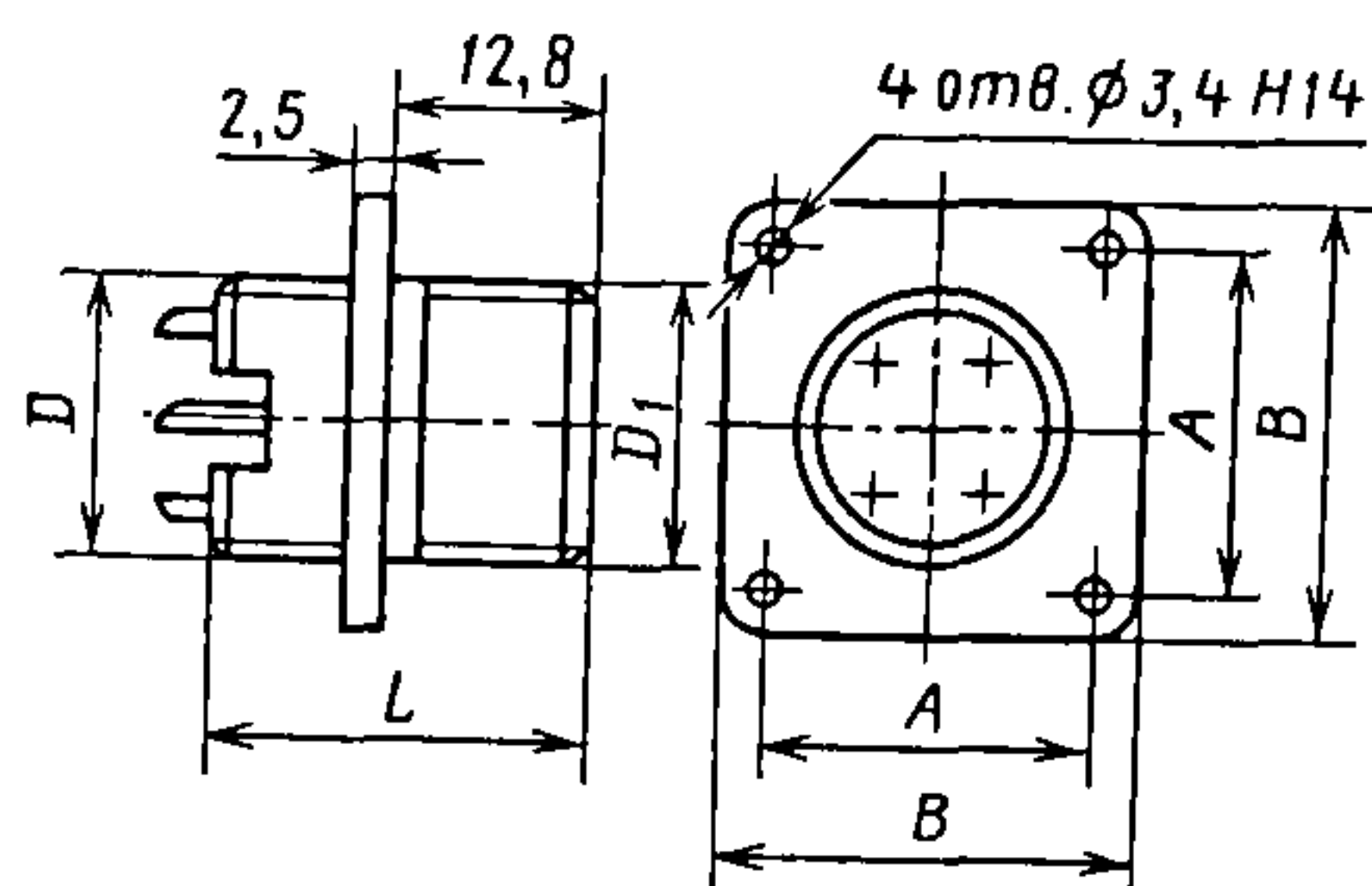
Высокочастотные вакуумные вводы (рис. 8.15, ж) используют для подвод тока высокой частоты ( $> 1500$  Гц) к индуктору 1, помещенному в вакуумной камере. Такой ввод состоит из фланца 2, к которому приварена втулка 3. В керамической изолирующей шайбе 4, вакуумно-плотно припаянной ко втулке, имеется два отверстия, через которые введены концы трубок индуктора. Через них подаются ток высокой частоты и вода для охлаждения. Часто высокочастотные вводы конструктивно выполняют коаксиальными для уменьшения потерь энергии.

В цепях с напряжением до 700 В постоянного и переменного тока и частотой

до 3 МГц применяют вакуумно-плотные серийные соединители типа 2РМГ. Они имеют блочные герметичные вилки и соединяются с кабельными негерметичными розетками соединителей типа 2РМ. Блочные и кабельные части соединителей могут быть без патрубка и с прямым патрубком. Кабельные части имеют прямые или угловые патрубки. Техническая характеристика соединителей 2РМГ дана в табл. 8.5. Размеры блочной части соединителей без патрубка (рис. 8.16) приведены в табл. 8.6. Условия эксплуатации: температура окружающей среды 213...473 К; перепад давления  $1,5 \cdot 10^5$  Па.



Рис. 8.16. Соединитель типа 2РМГ



8.5. Характеристики токовводов типа 2РМГ

Посадочный диаметр корпуса вилки или розетки, мм	Число контактов					Максимальная сила тока в контакте, А	Суммарная сила тока на соединитель, А	Рабочее напряжение постоянного или переменного (амплитудное значение) тока, В
	общее допускаемое	диаметром, мм						
		1,0	1,6	2,0	3,0			
14	4	4	—	—	—	6	20	560
18	7	7	—	—	—	5	30	
22	4	—	—	2	—	13	55	
		—	—	—	2	20		
	10	10	—	—	—	5	42	
24	19	19	—	—	—	4	63	700
27	7	5	—	—	—	6	45	
		—	2	—	—	10		
	24	24	—	—	—	4	80	
30	32	32	—	—	—	3		
33	20	18	—	—	—	4	76	560
		—	—	—	2	20		
		8	—	—	—	4,5	75	700
		12	—	—	—		83	560
36	22	5	—	—	—	8		80
		17	—	—	—		700	
	20	16	—	—	—	8	560	
		10	—	—	—		700	
		—	4	—	—		560	
39	45	30	—	—	—	3	125	560
		10	—	—	—			700
		—	5	—	—	6		560
		45	—	—	—			
42	50	33	—	—	—	3	142	700
		11	—	—	—			560
		—	7	—	—			6,0
	30	15	—	—	—	3,5	130	560
		—	15	—	—	7,0		560

### 8.6. Размеры элементов токовводов 2РМГ, мм

$D$	$D_1$	$A$	$B$
M18×1	M20×1,0	20	27
M24×1	M27×1,5	26	33
M27×1	M30×1,5	29	36
M30×1	M33×1,5	31	38
M33×1	M36×1,5	32	40
M36×1	M39×1,5	35	43
M39×1	M42×1,5	37	46
M42×1	M45×1,5	40	49

Примечания. 1. Резьба  $D$  левая.  
2. При диаметре контактов 1,0 и 1,5 мм  
длина  $L = 26$  мм, при диаметре контактов 2  
и 3 длина  $L = 28$  мм.

В вакуумном технологическом оборудовании широко используются следующие конструкции электрических вводов.

Слаботочный ввод (рис. 8.17) предназначен для вывода концов термодпар из вакуумной камеры. При такой конструкции соединения компенсационных проводов с термодпарой находятся вне вакуумной камеры, что позволяет избежать нагрева контактов, а следовательно, и паразитных, вносящих ошибки в показания термодпары. Проводник 1 герметизируется резиновым уплотнителем 2. Корпус электрического ввода изолирован от стенки вакуумной камеры втулками 3 и уплотнен резиновой прокладкой 5, деформация которой ограничена керамическим кольцом 4.

Низковольтные слаботочные электрические вводы, показанные на рис. 8.18, имеют довольно простые конструкции и могут быть изготовлены в лабораторных условиях. Высоковольтный вакуумный ввод с малыми электрическими утечками

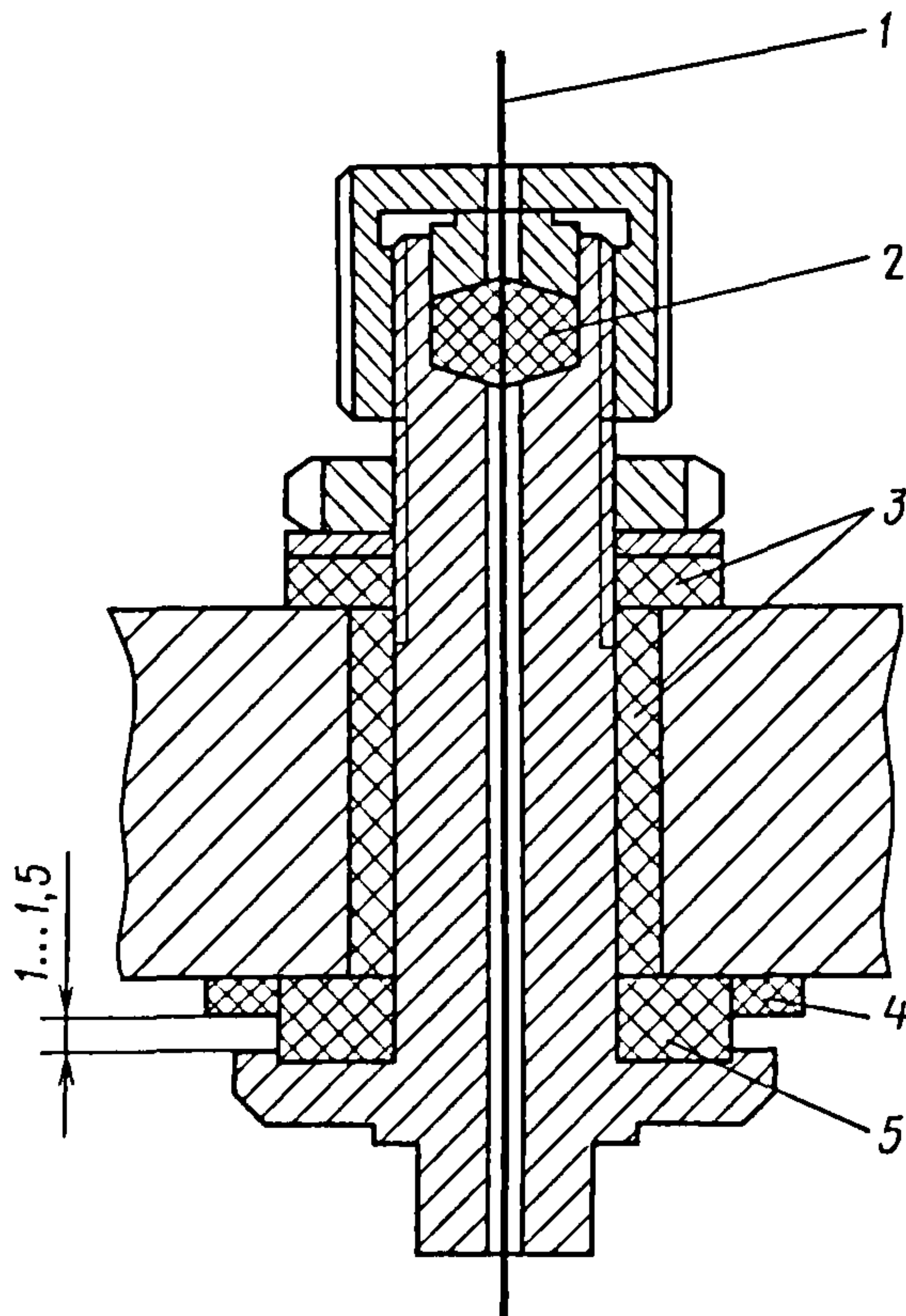


Рис. 8.17. Электрический вакуумный ввод для термодпар



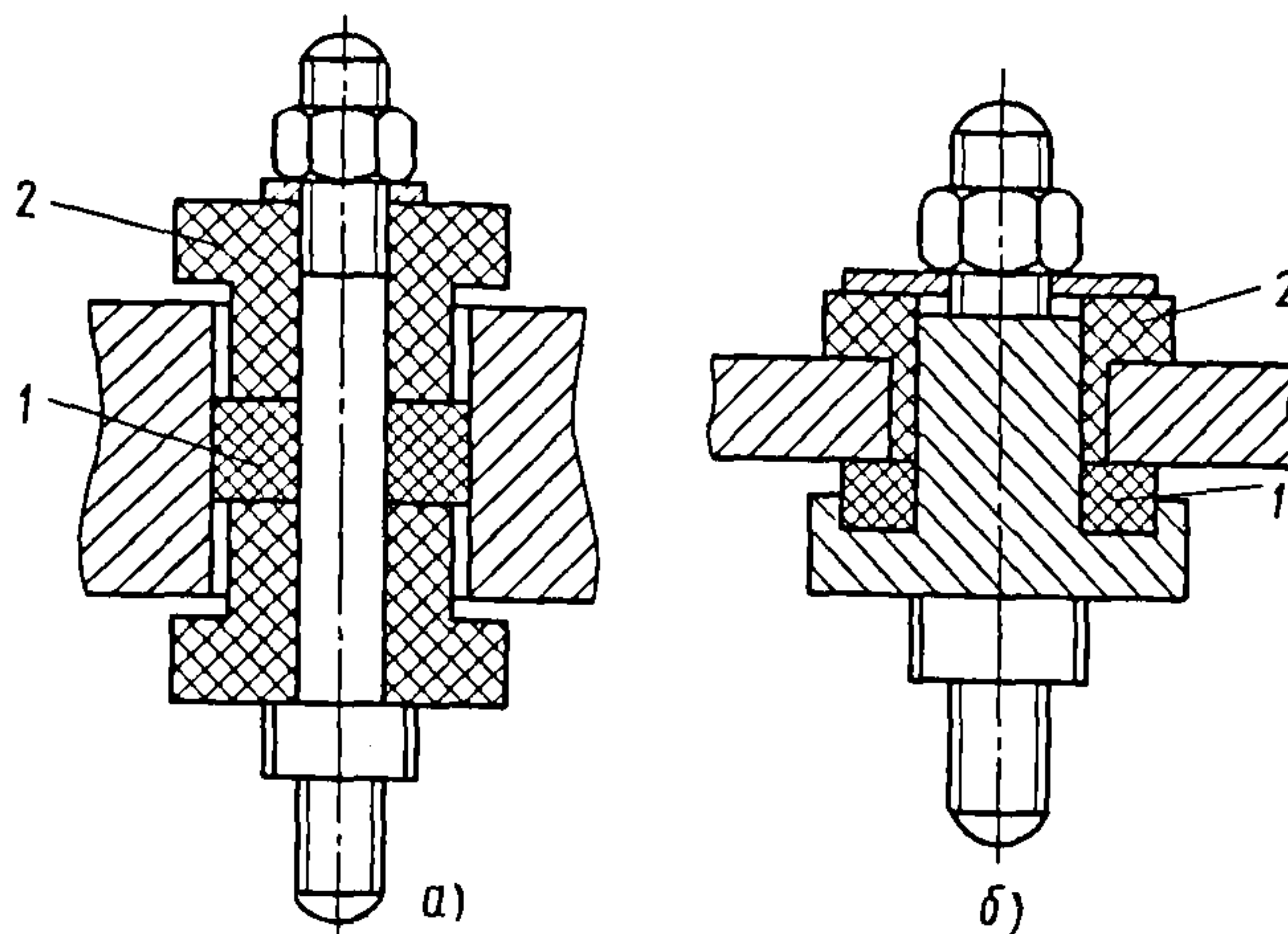


Рис. 8.18. Низковольтные фланцевые вакуумные вводы с внутренним (а) и наружным (б) уплотнителями: 1 — резиновая прокладка; 2 — втулка из керамики или другого электроизоляционного материала

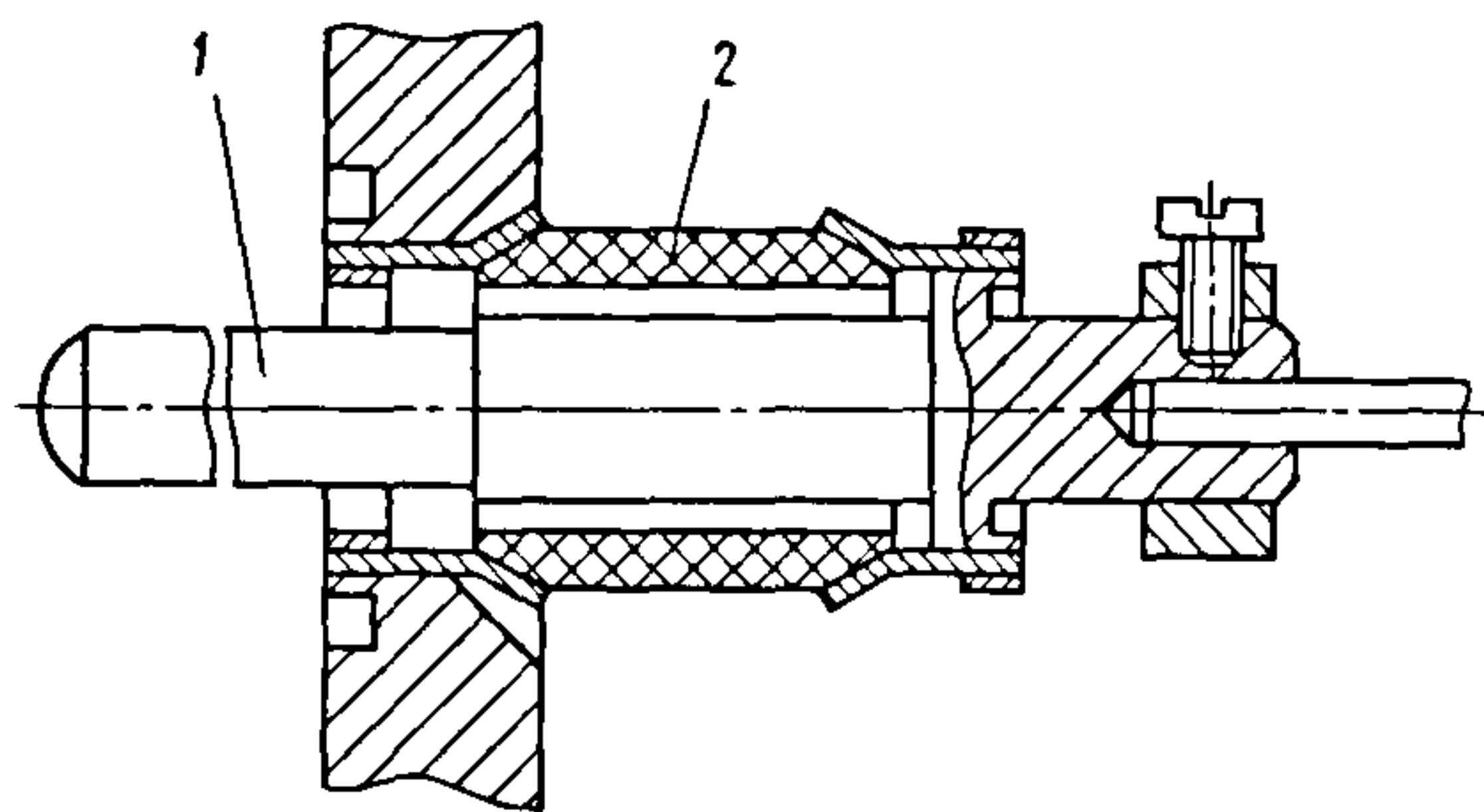


Рис. 8.20. Прогреваемый электрический СВВ-ввод: 1 — стержень; 2 — металлокерамический изолятор

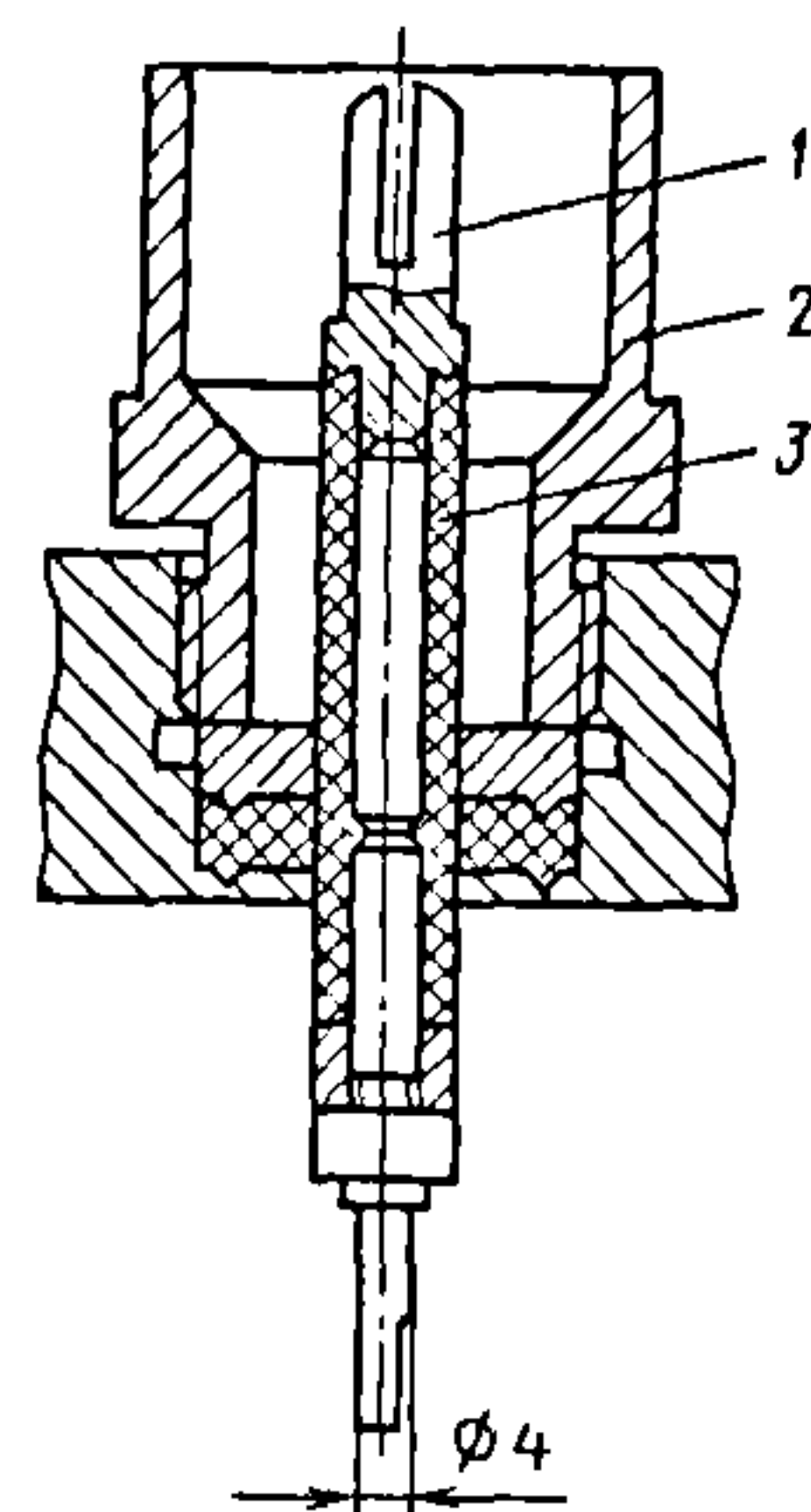


Рис. 8.19. Высоковольтный вакуумный ввод

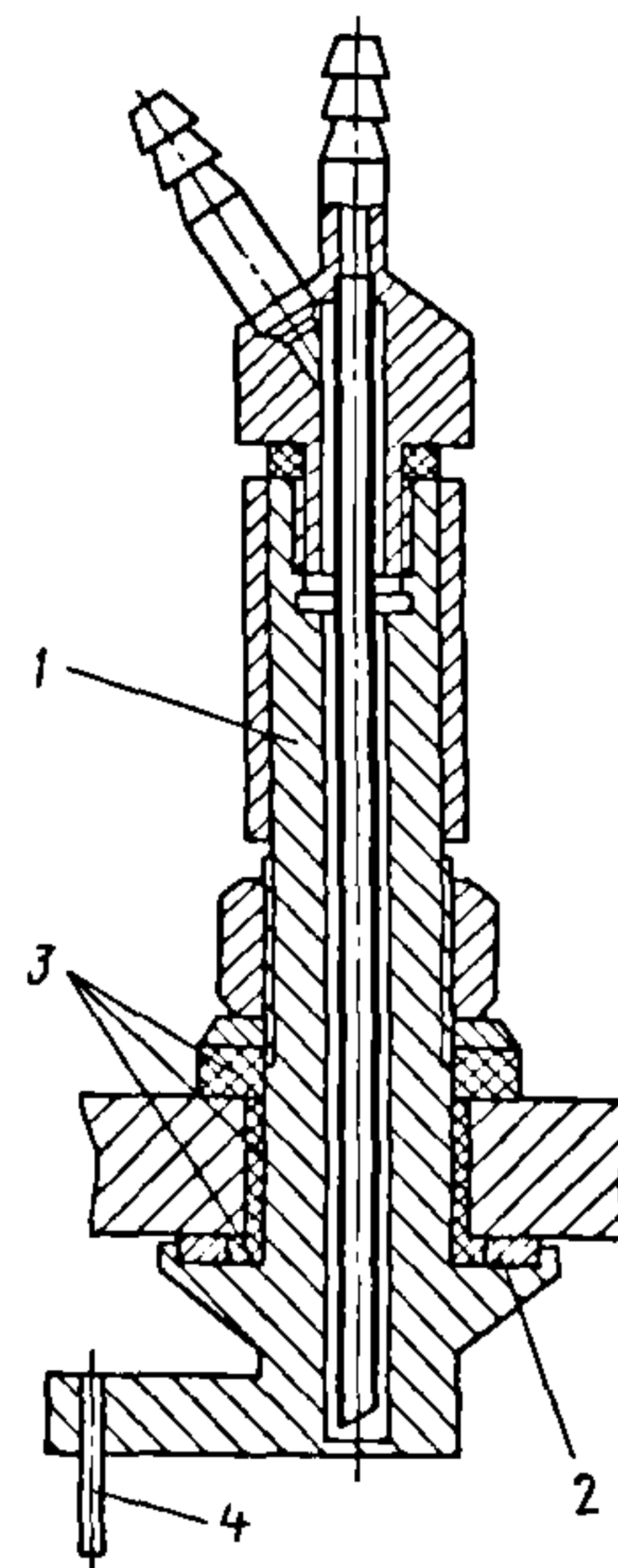


Рис. 8.21. Сильноточный вакуумный ввод с водяным охлаждением:

1 — медный стержень; 2 — резиновая прокладка; 3 — изоляционные кольца; 4 — нагреватель

при напряжении  $>250$  В представлен на рис. 8.19. Металлический стержень 1 изолируется и герметизируется фторопластовой втулкой 3. Сила прижатия втулки к корпусу создается с помощью резьбового соединения гнезда 2 и корпуса. Втулка должна иметь достаточные размеры изо-

лирующей поверхности для того, чтобы избежать утечки. Однако высоковольтные вводы с керамическими изоляторами (рис. 8.20) обладают лучшими электрическими характеристиками. Непрогреваемый сильноточный ввод, работающий при давлении  $\geq 5 \cdot 10^{-5}$  Па, показан на рис. 8.21.

#### 8.4. ВАКУУМНЫЕ ОКНА

Вакуумные окна служат для пропускания излучений (видимого света, инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-, альфа-, бета-нейтронного) из вакуумной камеры в окружающее пространство (или наоборот) без нарушения вакуумных условий. Окна должны удовлетворять следующим требованиям:

- выдерживать перепады давлений;
- допускать применение уплотнений без образования течей;
- не пропускать нежелательные виды излучений;

обладать высокой устойчивостью к воздействиям, вызывающим изменение прозрачности.

Окна изготовляют в виде плоских или выпуклых пластин и закрепляют на вакуумных камерах с помощью уплотнений, обычно используемых в вакуумной технике и электровакуумном приборостроении.

Материалы, применяемые для изготовления окон при излучении различных видов, указаны в табл. 8.7. Зависимость прозрачности стекла от энергии электронов приведена на рис. 8.22.

#### 8.7. Характеристики материалов вакуумных окон

Вид излучения	Материал	Примечание
Видимый свет	Стекло (обычное, оптическое, жаропрочное), кварц, пластмассы	Потери излучения составляют 6...20; 10...30 и 20...40 % при толщине обычного стекла соответственно 1...2; 2...4 и 4...8 мм. Для оптических стекол подобные потери соответствуют толщинам примерно в 20 раз больше
Ультрафиолетовое	Для длины волны $\lambda = 0,3...0,4$ мкм слюда, специальные фосфатные стекла, акриловые пластмассы (плексиглас); при $\lambda = 0,2...0,3$ мкм кварц, сапфир, соли (хлориды натрия и калия, фториды кальция и лития)	Стекло не должно содержать железа, хрома, свинца, титана, сурьмы
Инфракрасное	Боросиликатные стекла ( $\leq 10$ % $\text{SiO}_2$ и $\text{B}_2\text{O}_3$ ; 3 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), кварц, слюда, сапфир, различные соли	См. табл. 8.8
Рентгеновское	Фольга из легких металлов, алюминий, бериллий, оксиды легких металлов (бора, лития, бериллия), слюда, пластмассы, цветные стекла	Для поглощения рентгеновского излучения применяют окна из стекол с оксидами тяжелых металлов (свинца, бария, висмута, тория, урана, титана, вольфрама)
Поток $\beta$ -частиц (электронов)	Фольга толщиной в несколько микрометров (слюда, алюминий и его оксиды, тантал, золото, стекло)	См. рис. 8.22, табл. 8.9



Окончание табл. 8.7

Вид излучения	Материал	Примечание
Поток $\alpha$ -частиц	Фольга толщиной в несколько микрометров (целлофан, алюминий, слюда, тантал, золото, тонкие стекла)	Например, $\alpha$ -частица с энергией $8,8 \cdot 10^{-22}$ Дж (длина свободного пути $\lambda$ , мкм, 25 в целлофане; 22 в алюминии; 17 в слюде; 9,3 в тантале; 8,4 в золоте)
Поток нейтронов	Обычные стекла, содержащие оксиды кремния, алюминия, свинца и магния	Стекла, предназначенные для поглощения нейтронов, должны содержать оксиды гадолиния, индия, лития, европия и кадмия

Окна для пропускания видимого света (смотровые) используют в вакуумно-технологических установках для постоянного или периодического наблюдения за процессами или работой устройств в вакуумных камерах. Через смотровые окна по цвету электрического разряда можно визуально оценить, в каком газе происходит разряд, а также по свечению разогретого тела ориентировочно определить его температуру.

Свечение в положительной области (плазме) возникает при рекомбинации ионов с образованием нейтральных атомов. Ниже указаны цвета электрического разряда в различных газах.

Воздух ..... Голубой  
 Ag ..... Фиолетовый  
 CO<sub>2</sub> ..... Голубовато-зеленый  
 CO ..... Белый  
 He ..... От красно-фиолетового до желтовато-розоватого  
 H<sub>2</sub> ..... От красновато-розового до оранжевого  
 Ne ..... Кроваво-красный  
 N<sub>2</sub> ..... Оранжевый или красно-желтый  
 SO ..... Желтый с красноватым оттенком  
 Пары воды Голубовато-белый

В табл. 8.8 указаны длины волн  $\lambda$ , при которых пластина из соответствующего материала толщиной 5 мм пропускает ~50 % инфракрасного излучения, а в табл. 8.9 – толщины пластин различных материалов, пропускающих 50 и 80 % электронов различной энергии.

#### 8.8. Длины волн $\lambda$ , мкм, при которых пластины толщиной 5 мм пропускают ~50 % инфракрасного излучения

Материал	$\lambda$	Материал	$\lambda$
Стекло	2,2...2,5	MgO	7,0
CaCO <sub>3</sub>	2,5	CaF <sub>2</sub>	10,0
Кварц	3,8...4,4	NaF	10,0
Слюда	5,3	AgCl	28,0
Сапфир	6,5	CsBr	50,0
LiF	7,0	Cs	60,0

Типичная конструкция смотрового окна для непрогреваемых систем показана на рис. 8.23. Толщину  $h_c$  смотрового стекла выбирают в зависимости от диаметра  $D_c$  свободной поверхности:  $h_c \approx (0,15...0,20)D_c$ .

В прогреваемых СВВ-системах стекла смотровых окон впаивают в металлические оправы (стаканы), причем температурные коэффициенты линейного расширения стекла и материала оправы должны быть достаточно близки. В спаях, прогреваемых до температуры 523...573 К, используют плоские стекла (рис. 8.24), в спаях, прогреваемых до более высоких температур, – выпуклые. Оправы сваривают с фланцами, соединяемыми с вакуумными камерами через металлические прогреваемые прокладки (рис. 8.25, а). При циклических высокотемпературных прогревах используют конструкцию из нескольких коваровых герметично сваренных колец (рис. 8.25, б).

8.9. Толщины  $h_c$  пластин из ряда материалов, пропускающих 50 и 80 % электронов

Прозрач- ность, %	Энергия электронов $E \cdot 10^{18}$ , Дж	Толщина, мкм, пластины <sup>1</sup> из			
		пластмассы (1,45)	SiO <sub>2</sub> (2,3)	Al (2,7)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3,8)
80	1,6	0,12	0,08	0,07	0,05
	3,2	0,60	0,43	0,37	0,26
	6,4	1,90	1,20	1,00	0,74
	12,8	6,60	4,20	3,60	2,50
50	1,6	0,55	0,35	0,30	0,20
	3,2	1,80	1,10	0,96	0,68
	6,4	5,80	3,70	3,10	2,20
	12,8	17,80	11,30	9,60	6,80

<sup>1</sup> В скобках указана плотность материала, г/см<sup>3</sup>.

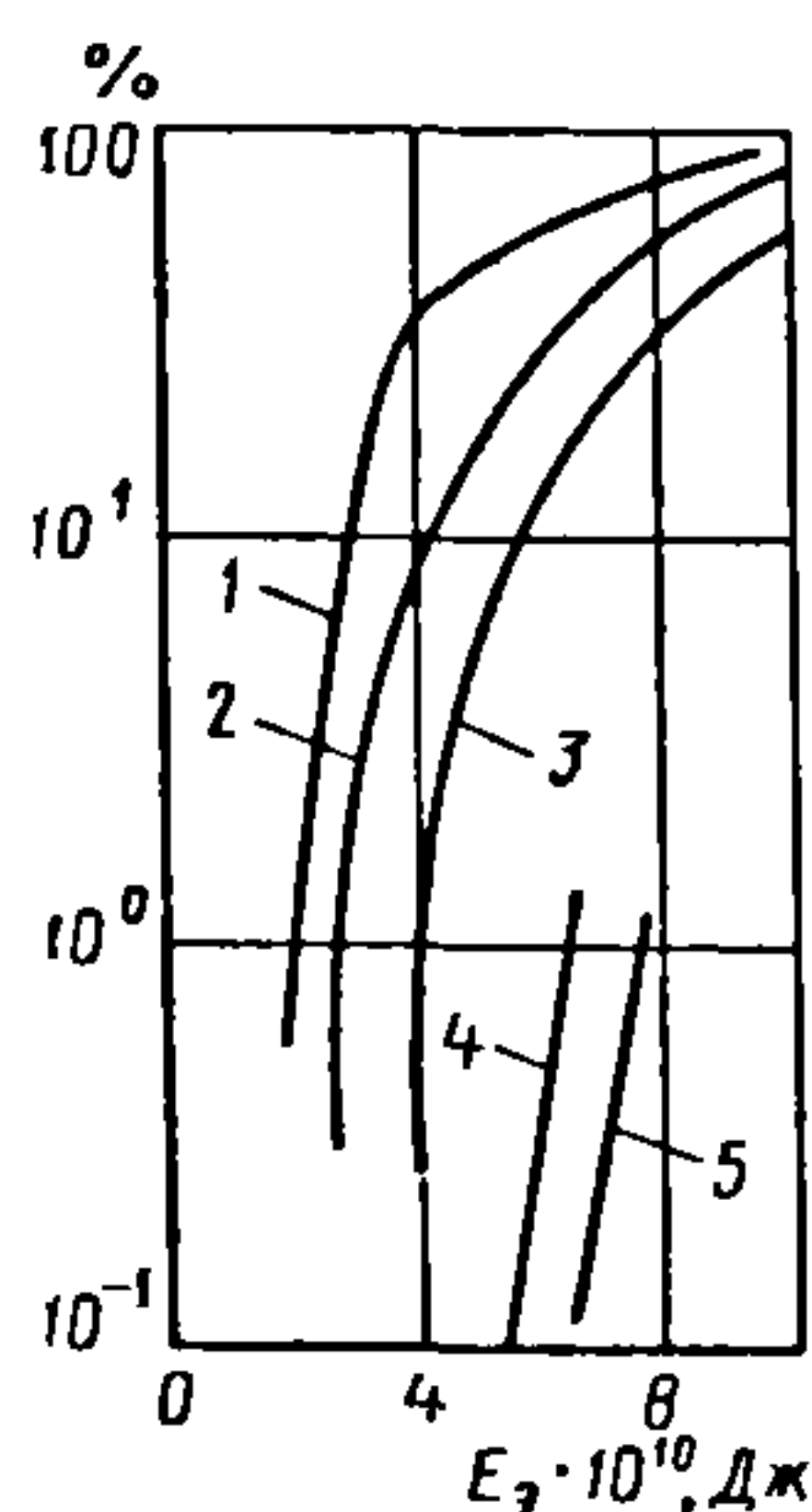


Рис. 8.22. Зависимость относительной прозрачности стеклянной пластины от энергии электронов  $E$ , при различной толщине  $\Delta$ , нм, пластины:

1 – при  $\Delta < 1$ ; 2 – при  $\Delta = 210$ ; 3 – при  $\Delta = 360$ ; 4 – при  $\Delta = 760$ ; 5 – при  $\Delta = 990$

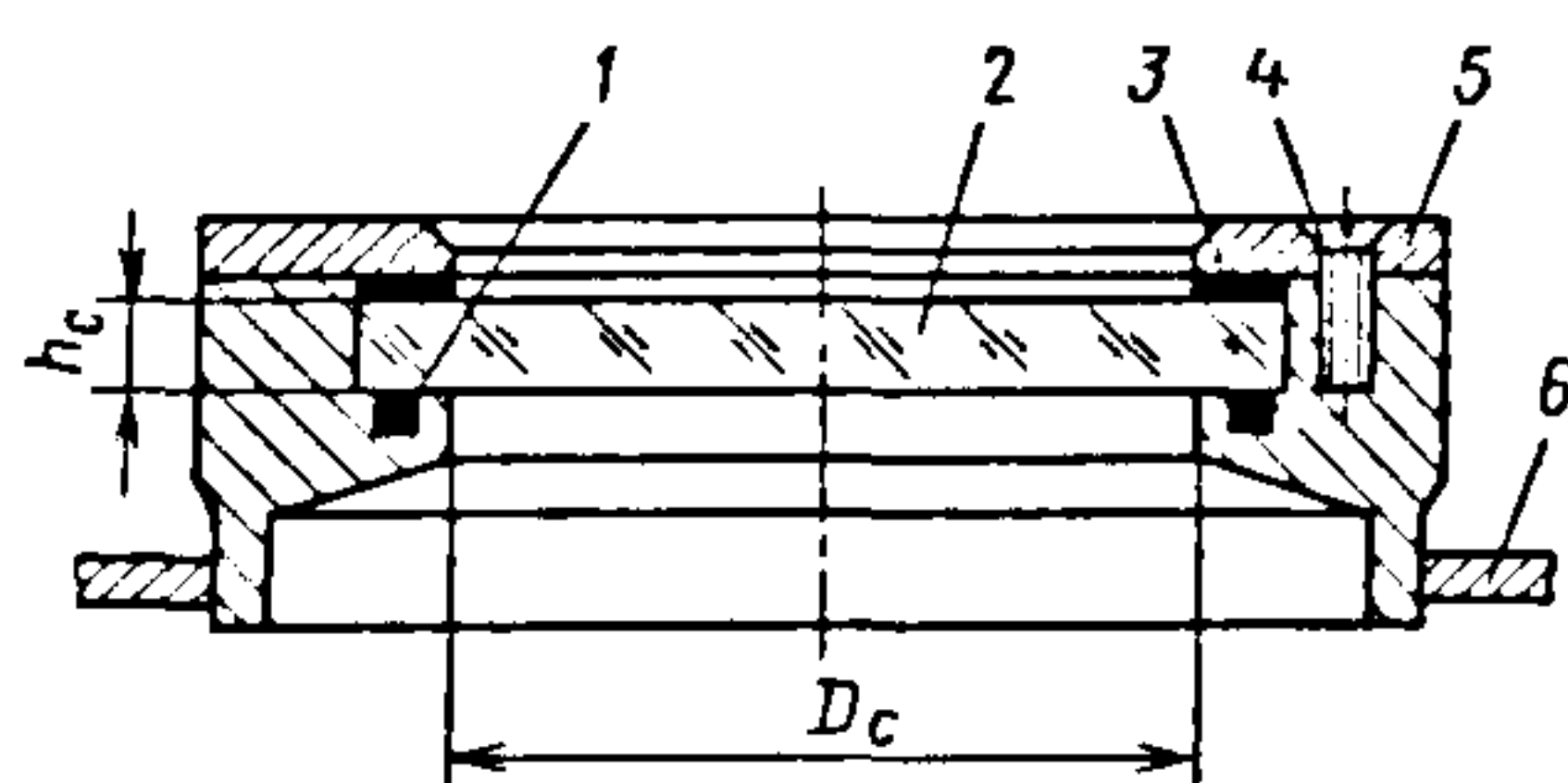


Рис. 8.23. Смотровое окно с резиновым уплотнением:

1, 3 – прокладки; 2 – стекло; 4 – винт; 5 – зажимное кольцо; 6 – стенка камеры

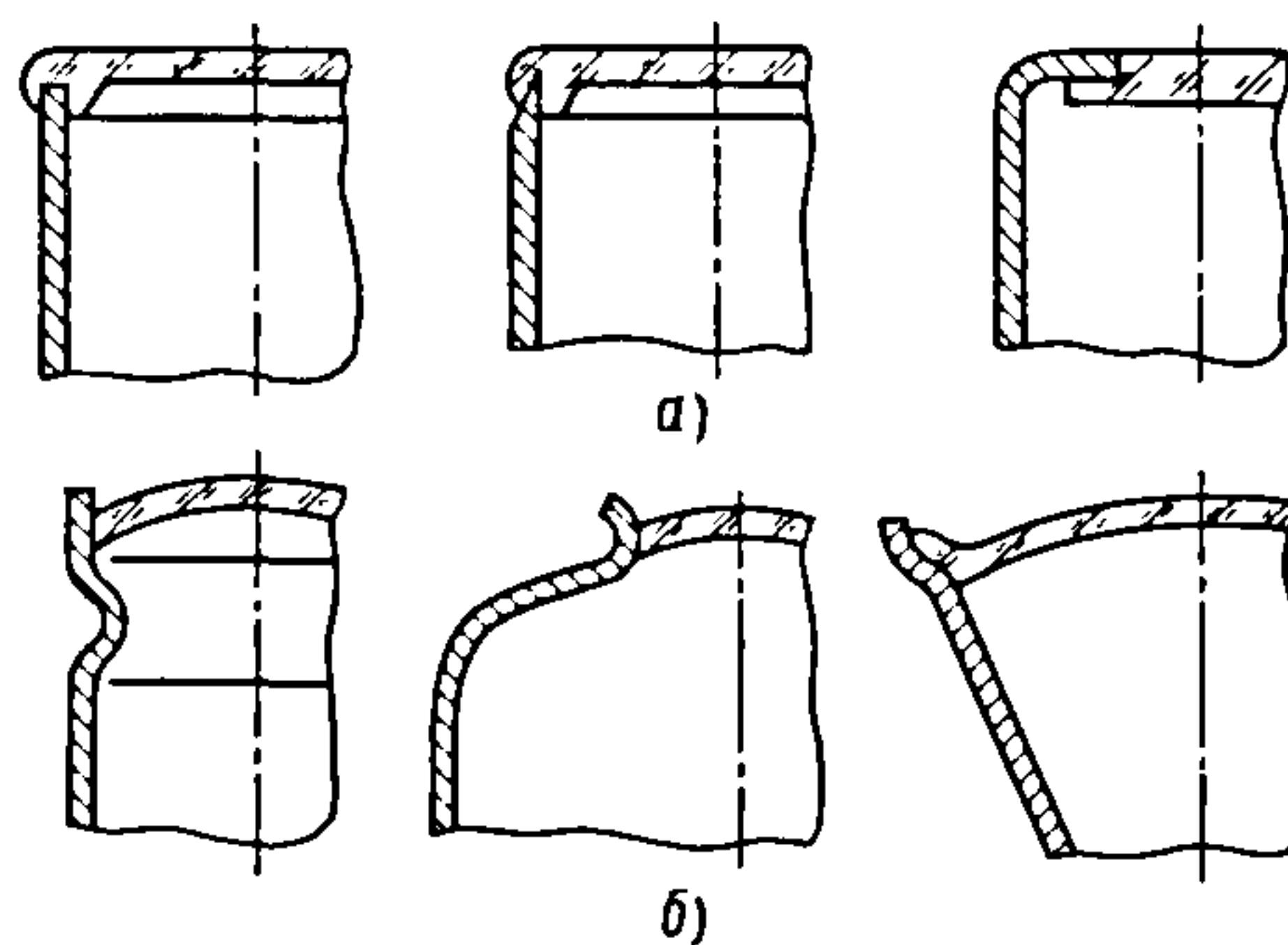


Рис. 8.24. Оконные спай с плоскими (а) и выпуклыми (б) стеклами

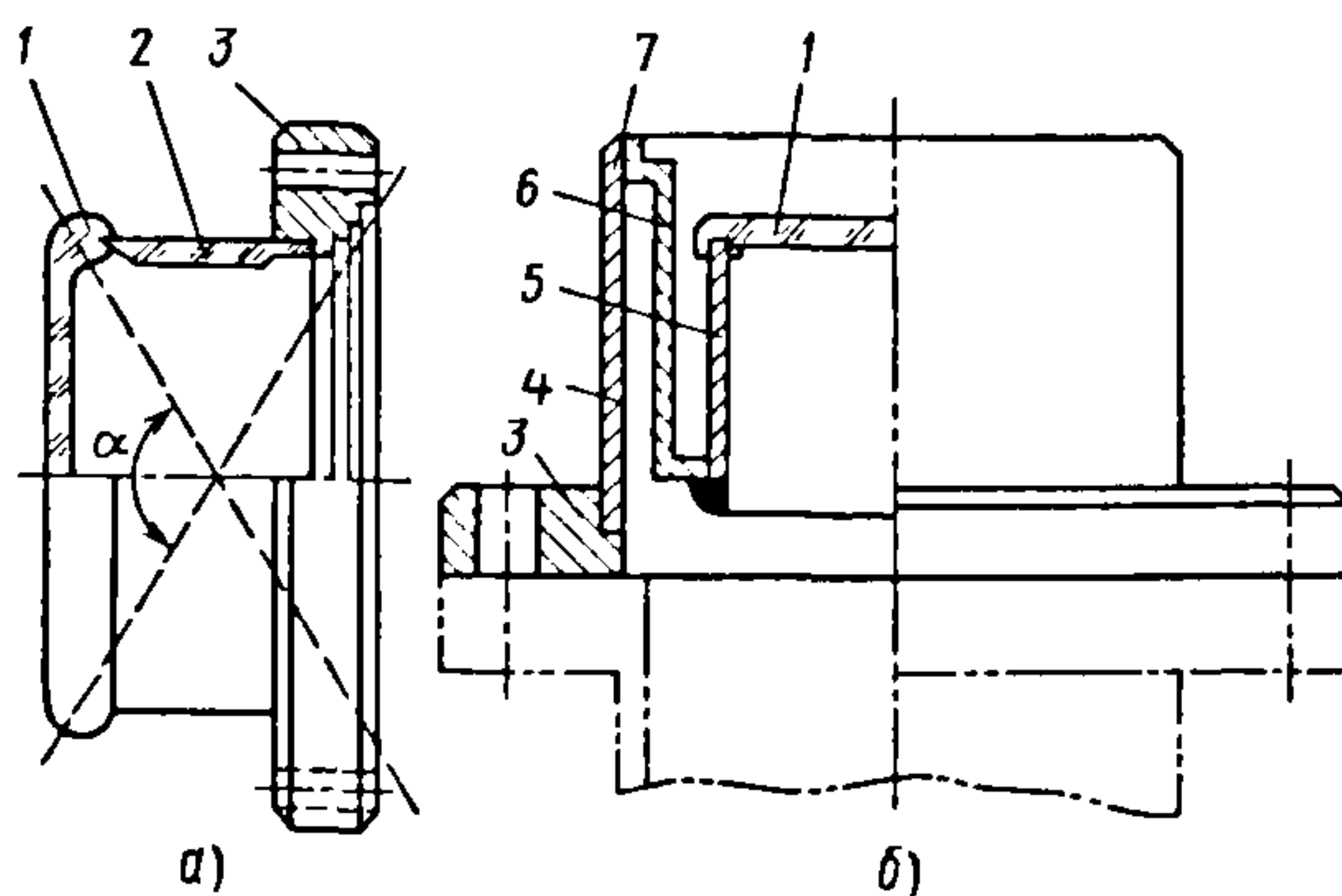


Рис. 8.25. Смотровые окна для прогреваемых систем:

1 – стекло; 2 – стаканы из кварца; 3 – фланец; 4–6 – соответственно наружное, внутреннее и промежуточное кольца; 7 – место сварки;  $\alpha$  – угол зрения



Многие технологические процессы, проводимые в вакууме (вакуумная плавка, электронно-лучевая сварка, нанесение тонких пленок, вакуумная дистилляция, зонная очистка и др.), сопровождаются интенсивным испарением или ионным распылением веществ. При этом на смотровых стеклах образуются осадки, снижающие прозрачность стекол и ограничивающие срок службы смотровых окон. Смотровые стекла приходится периодически протирать или снимать для удаления осадков механическим или химическим способом, а также применять защитные устройства (табл. 8.10).

Эффективность защиты смотрового окна от запыления характеризуют коэффициентом  $K_z = t_z/t_0$ , где  $t_z$  и  $t_0$  – срок службы окон соответственно с защитным устройством и открытых (без него).

Устройства для защиты окон можно подразделить на две группы: 1) устройства для обновления запыленных участков защитных прозрачных материалов; 2) устройства, уменьшающие интенсивность потока напыляющих молекул.

В приспособлениях первой группы прозрачный защитный материал, который

во время измерений остается чистым, располагают перед основным смотровым окном. Как правило, этого достигают механическим перемещением защитного материала относительно визируемого канала. Устройства второй группы уменьшают поток молекул, защищая основное смотровое стекло от запыления. Обычно этого достигают механическим, электрическим или газовым воздействием на летящие молекулы.

В зависимости от конструкции установки и ее назначения устройства должны обеспечивать возможность периодического или непрерывного наблюдения.

На рис. 8.26 показано смотровое окно с протиром и системой водяного охлаждения для исключения перегрева уплотняющих прокладок.

Другое конструктивное решение, обеспечивающее длительный срок службы смотрового окна, – применение поворотных дисков со сменными защитными стеклами. После загрязнения стекла, расположенного против смотрового отверстия, диск поворачивают, подводя к смотровому отверстию незагрязненное стекло (рис. 8.27).

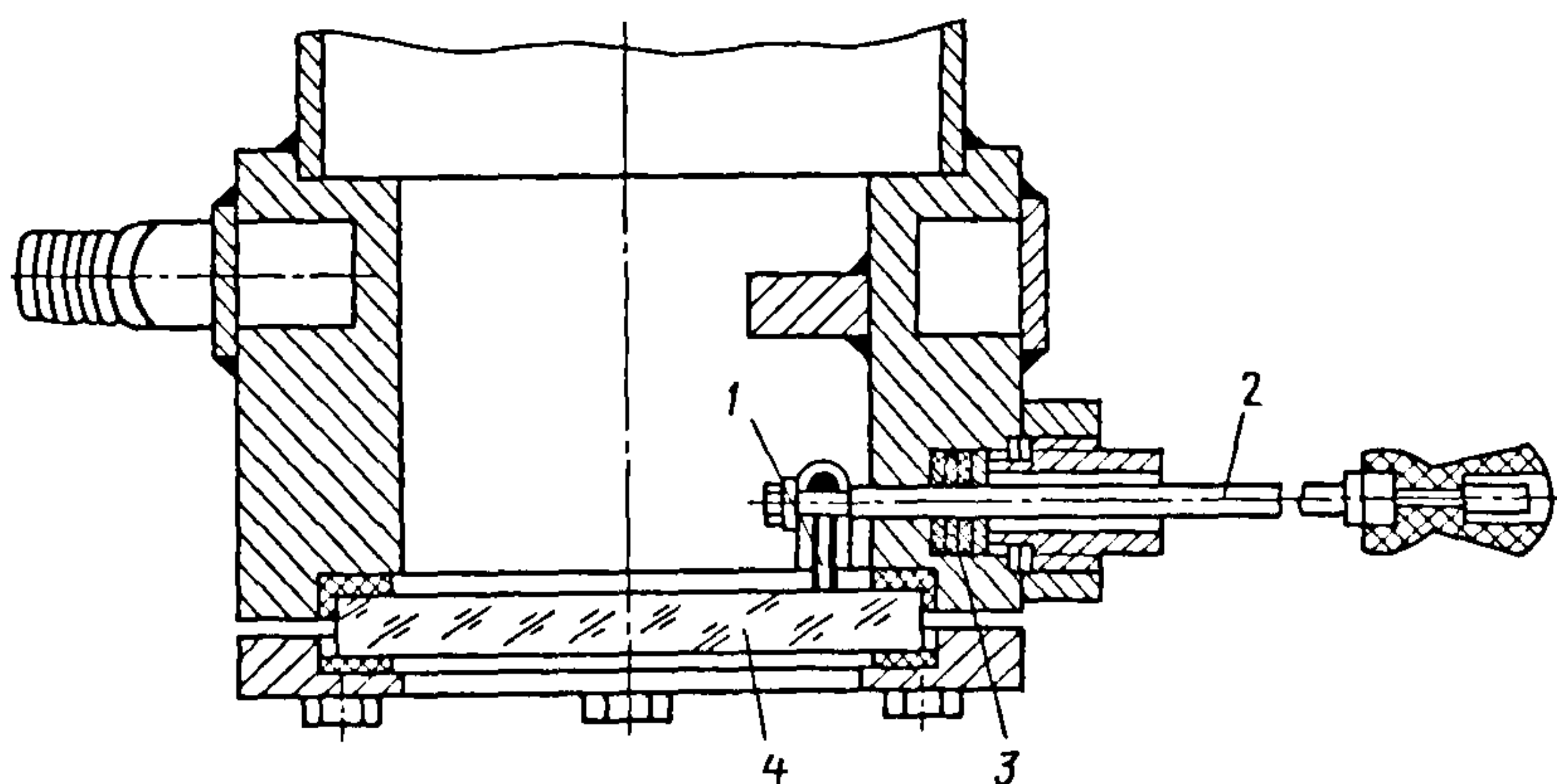


Рис. 8.26. Смотровое окно с протиром:  
1 – протир; 2 – шток; 3 – уплотнение; 4 – стекло

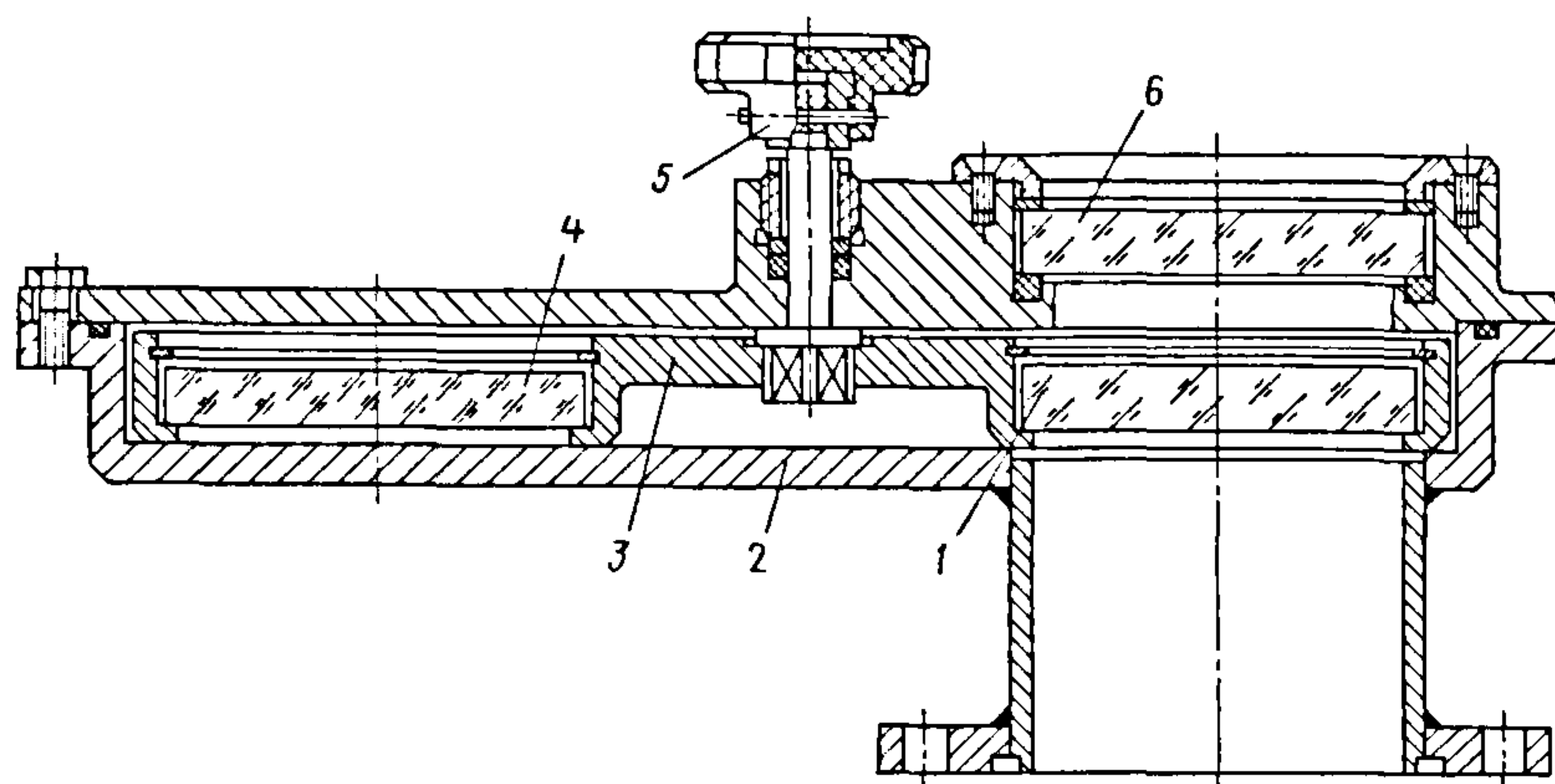


Рис. 8.27. Смотровое окно с поворотным диском:

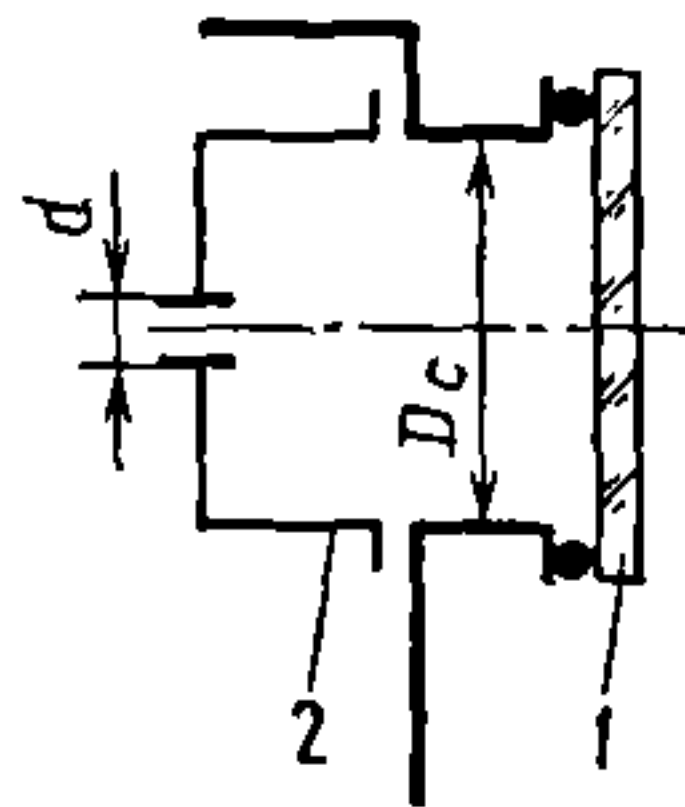
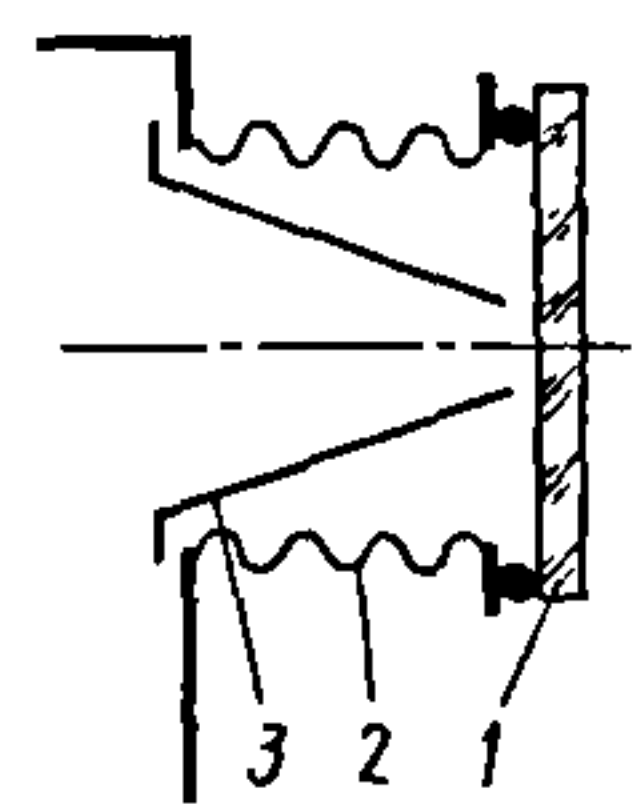
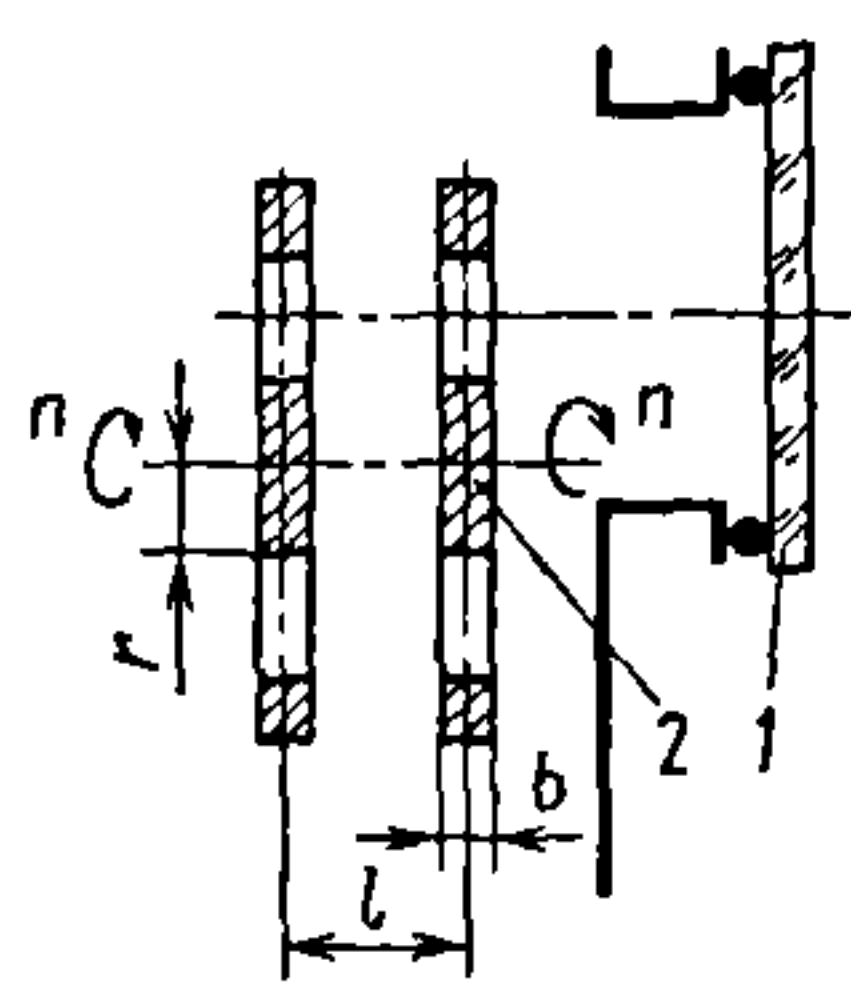
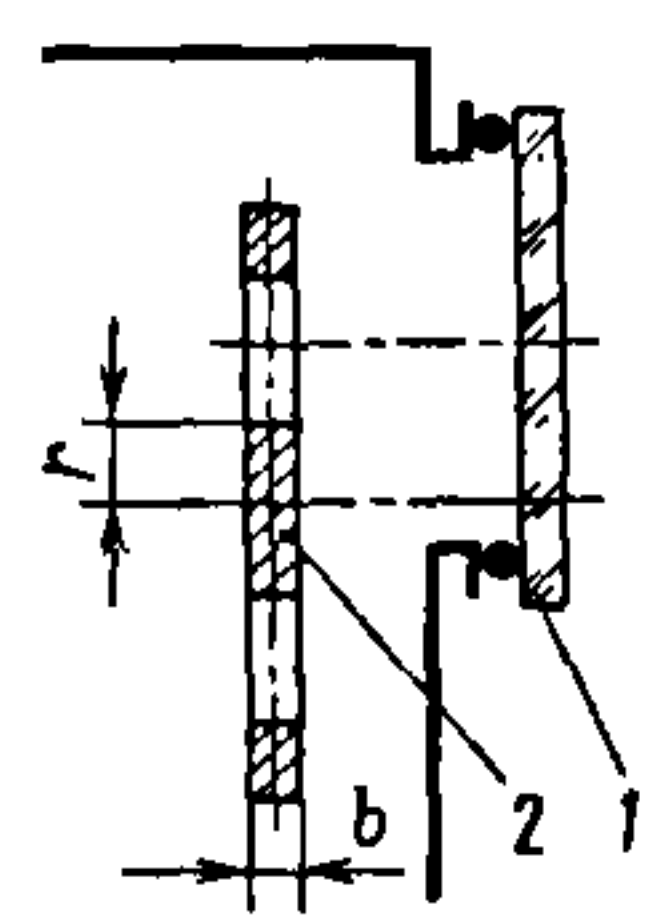
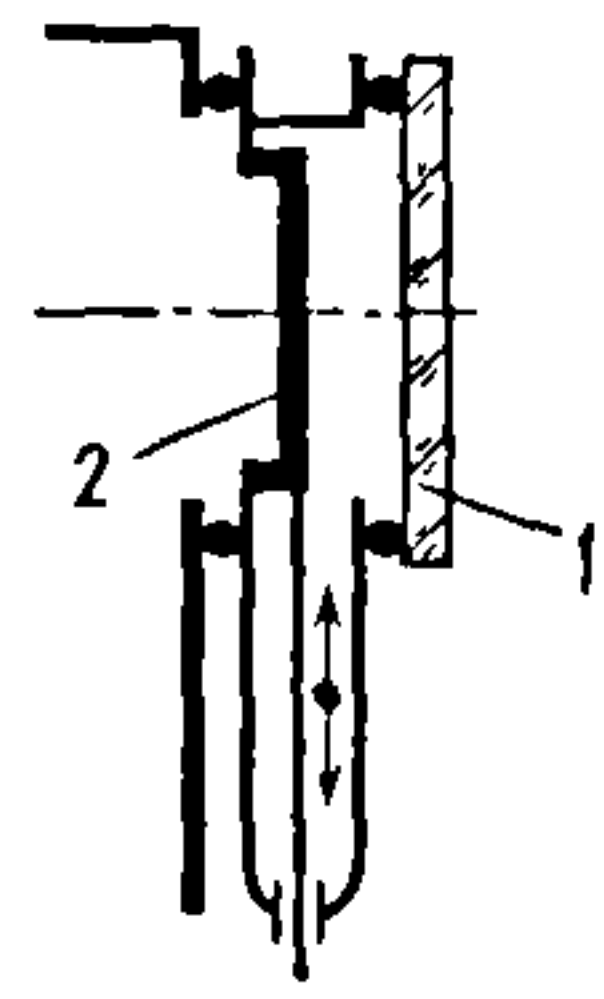
1, 4 – сменные стекла; 2 – корпус; 3 – поворотный диск; 5 – ручка; 6 – смотровое стекло

### 8.10. Защитное устройство вакуумных окон

Защитное устройство		$K_3$
Схема	Конструктивные особенности	
	Окно с защитой смотрового стекла 1 легкосъемным стеклом 2. Применяют в системах с низкой интенсивностью запыления. Обеспечивает постоянное наблюдение с большим углом зрения	1
	Окно с открывающейся заслонкой 2 стекла 1 во время наблюдения должно иметь ввод движения в вакуум. Применяют поступательное, вращательное, маятниковое и другие устройства для перемещения заслонки	$\geq 100$
	Окно с поворотным экраном 2, в котором предусмотрено отверстие а, подводимое последовательно к незапыленным участкам стекла 1; должно иметь механический вакуумный ввод. Отличается малым углом зрения	5...10
	Окно с зеркалом 4 и экраном 2, защищающим стекло 1 от прямого попадания частиц вещества из источника загрязнения 3. Применяют при точечном источнике, когда осаждаемое на зеркале вещество образует пленку с хорошими отражательными свойствами	100...200



Продолжение табл. 8.10

Защитное устройство		$K_z$
Схема	Конструктивные особенности	
	Окно с защитой стекла 1 экраном 2 с малым отверстием. Применяют при наличии больших поверхностных источников загрязнения	$K_z = D_c^2 / d^2 \approx 100$
	Окно с защитным неподвижным конусом 3 и подвижным стеклом 1 на сильфоне 2 дает возможность подводить отверстие конуса к любому незапыленному участку стекла	10...50 ( $K_z > 50$ при условии возврата отверстия в центральную часть при периодических наблюдениях)
	Окно с защитой стекла 1 вращающимися дисками 2, имеющими прорези (селектор скорости). Обеспечивает малый угол зрения. Частоту вращения $n$ подбирают так, чтобы большая часть потока частиц не проходила через вторую щель, а осаждалась на втором диске, т.е. $\bar{v} = 2\pi r$ , где $\bar{v}$ – средняя скорость частиц	$K_z \approx 10^3 \dots 10^4$ ; $K_z = Kz \exp(l/b)^2 \frac{M(2\pi n)^2}{2RT}$ ; где $z$ – число прорезей; $K = 1 - \frac{\ln[b/(2\pi rz)]}{\ln(i_0/i_{\text{доп}})}$ ; где $i_0$ и $i_{\text{доп}}$ – начальная и минимальная допускаемая плотности светового потока
	Окно с защитой стекла 1 вращающимся диском 2 с прорезями обеспечивает больший угол зрения, чем предыдущая конструкция, но меньшее значение $K_z$	$K_z \approx 100 \dots 300$ ; $K_z = b/(2\pi r) \left( 1 - \frac{\ln[b/(2\pi r)]}{\ln(i_0/i_{\text{доп}})} \right)$
	Окно с затвором 2 между смотровым стеклом 1 и камерой открывают только во время наблюдения либо по окончании процесса	$\geq 100$

Окончание табл. 8.10

Защитное устройство		$K_3$
Схема	Конструктивные особенности	
	Окно с протиром 2 стекла 1 применяют в случае легко удаляемого осадка. Имеется механический ввод в вакуум. Обеспечивает очистку стекла без нарушения вакуума	100...200
	Окно с защитой 1 путем отклонения конденсирующихся ионов электрическим полем цилиндрического конденсатора 2, установленного на изоляторах 3	~330
	Окно со стеклом 1 на длинном сильфоне 2, поворачиваемом в необходимое положение только в момент наблюдения. Не требует механических вакуумных вводов	$\geq 100$
	Окно с защитой смотрового стекла 1 непрерывной прозрачной пленкой 2 и экраном 3	$\geq 100$

В этой конструкции вместо диска можно использовать большое поворотное стекло, так как давление по обе стороны от него одинаковое и, следовательно, оно не подвергается воздействию силовых нагрузок. В связи с этим требования прочности и термостойкости стекла являются второстепенными; можно использовать даже оконное стекло. Толщина защитных стекол обычно незначительна, поэтому доля поглощаемой в стекле энергии излучения незначительна.

К преимуществам этого способа следует отнести то, что срок службы смотро-

вого окна пропорционален числу защитных стекол при весьма простой конструкции устройства.

В смотровых окнах с вакуумным затвором, расположенным между смотровым стеклом и камерой (рис. 8.28), наличие затвора позволяет заменять стекла без разгерметизации рабочей камеры.

В устройстве другого типа для защиты смотрового стекла 2 (рис. 8.29), укрепленного в держателе 1, используют прозрачную пленку. Устройство состоит из дна 3 и корпуса 4; по патрубку 7 скользит прозрачная пленка 6 из лавсана.



Пленка перематывается с катушки 5 на катушку 8, которая приводится от двигателя и редуктора, расположенных вне вакуумной камеры.

Срок службы смотрового стекла увеличен, так как загрязняющие частицы задерживаются прозрачной пленкой. Скорость движения ленты подбирают с учетом ее термостойкости, а также того, что за время прохождения смотрового канала ее запыленность не должна превышать допускаемой.

Один из способов уменьшения интенсивности потока частиц на стекло — защита его струей инертного газа. При определенной плотности струя газа, омывающая смотровое стекло, рассеивает по-

ток загрязненных частиц, в результате чего уменьшается загрязнение. Сама струя инертного газа прозрачна, но инертный газ может значительно увеличить давление в системе.

Частично данную задачу решают созданием области повышенной плотности газа непосредственно перед смотровым стеклом. Для этого газ подается через патрубок 2 в пространство перед стеклом. Устройство снабжено перегородкой 1 с диафрагмой малого диаметра (рис. 8.30). Чем меньше диаметр диафрагмы, тем меньше расход инертного газа в объеме  $a$  и тем меньше газа поступает в вакуумную систему.

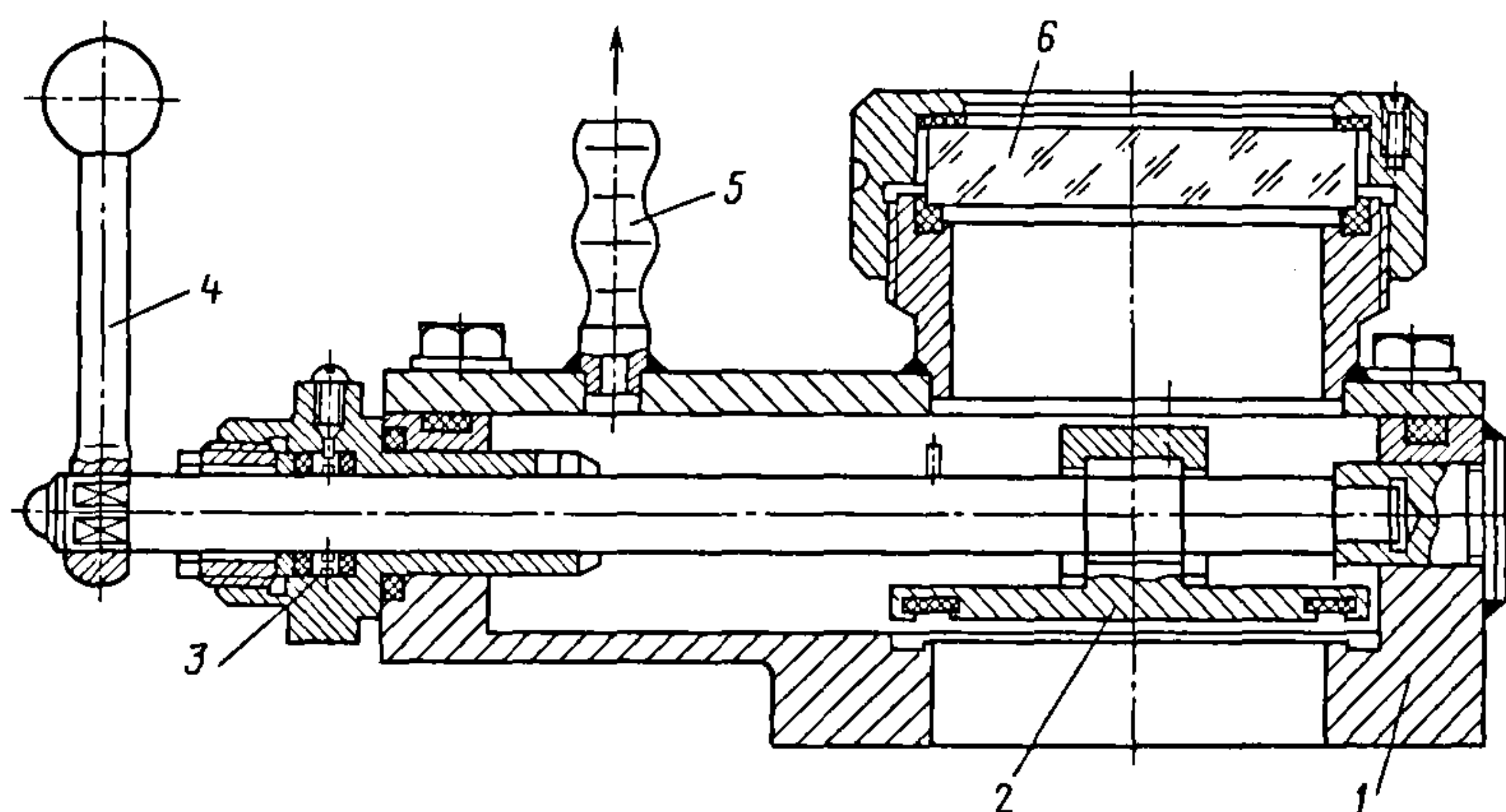


Рис. 8.28. Смотровое окно с вакуумным затвором:

1 — корпус; 2 — вакуумный затвор; 3 — уплотнение; 4 — ручка; 5 — штуцер к форвакуумному насосу; 6 — смотровое стекло

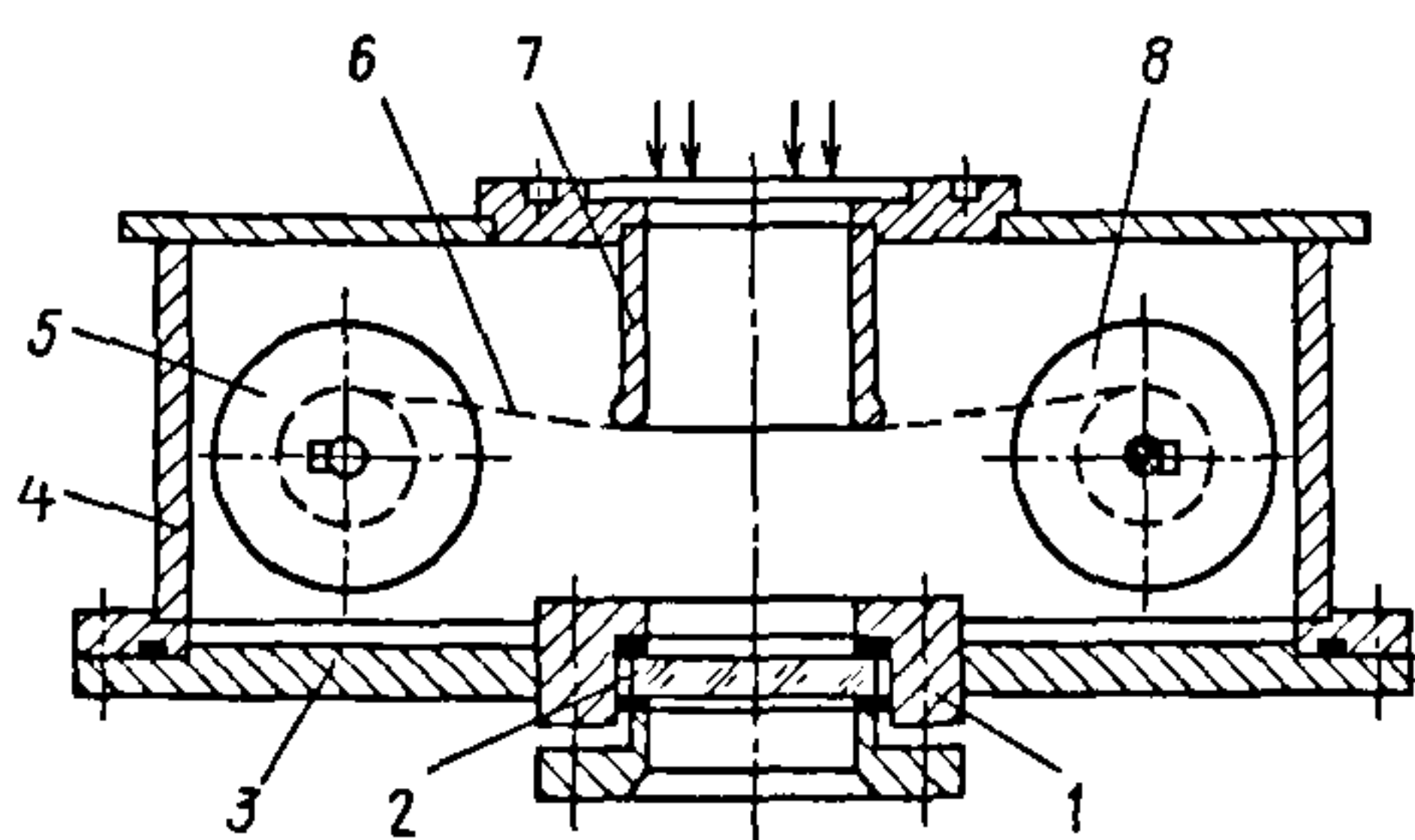


Рис. 8.29. Смотровое окно с движущейся прозрачной пленкой

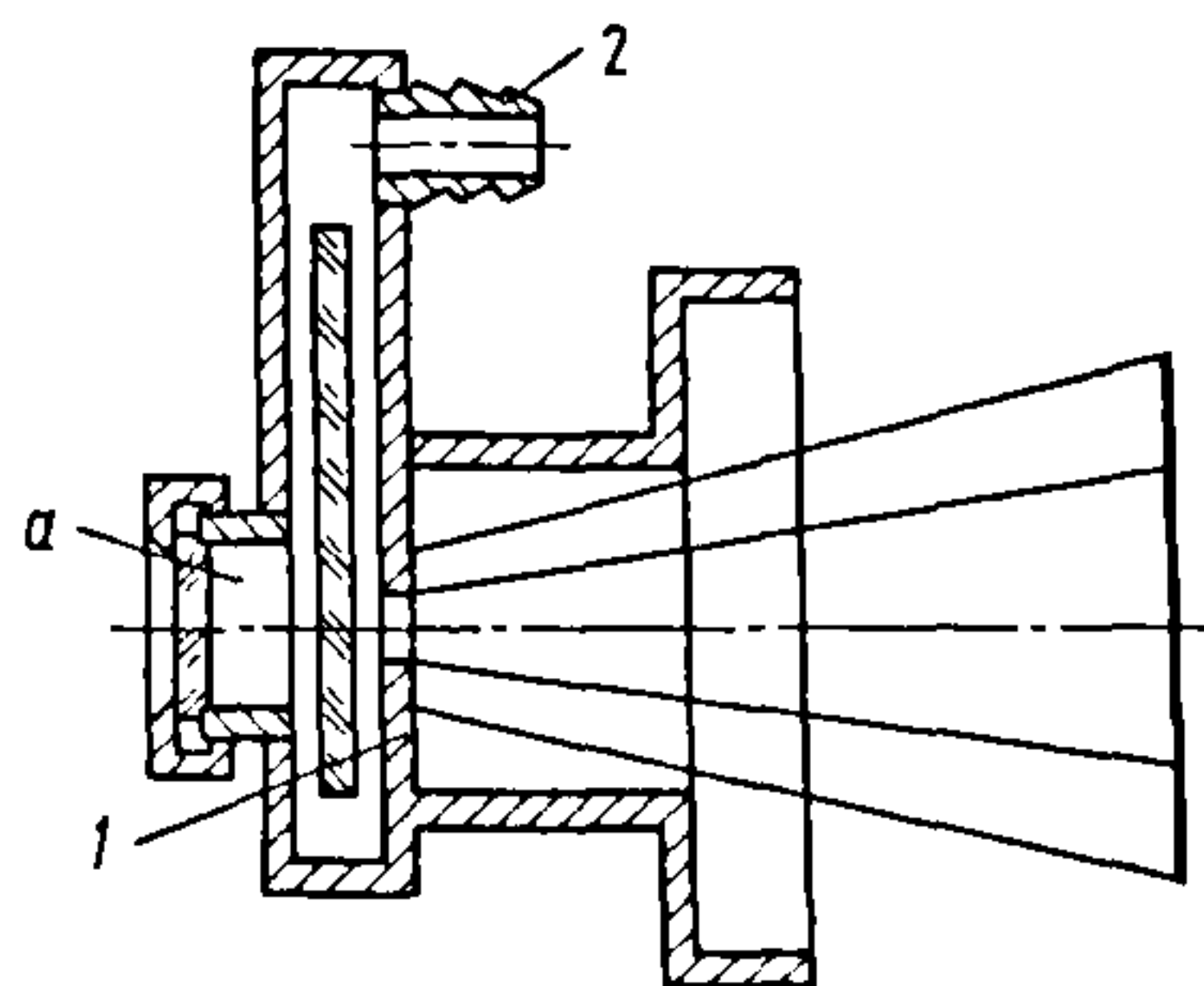


Рис. 8.30. Смотровое окно с газовой защитой

Кроме того, защита стекла сопряжена с повышением производительности вакуумной откачной системы для поддержания разрежения внутри установки в заданных пределах. Для увеличения сопротивления потоку газа в вакуумный объем помещают не одну, а несколько диафрагм на некотором расстоянии одна от другой. Это уменьшает расход газа.

Преимущества метода – простота конструкции и отсутствие вращающихся частей, недостатки – поступление газа в вакуумный объем, а также малый угол зрения из-за небольшого диаметра диафрагмы.

Такой способ защиты можно использовать в основном при визуальном наблюдении. Эффективность метода проверена при плавке ниобия в электронно-лучевых печах. Без защиты стекло в течение 2...3 мин становится совершенно непрозрачным. При подаче аргона в процессе плавки в течение 2 ч на стекле не обнаружено следов потемнения.

Если смотровое окно находится в труднодоступном месте или оператору опасно находиться около вакуумной установки, применяют различные перископические устройства. Объектив перископа устанавливают на смотровом окне, а окуляр – в месте, удобном и безопасном для наблюдения.

### 8.5. ЗАГРУЗОЧНЫЕ ВАКУУМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Наибольшие непроизводительные потери времени при работе вакуумного технологического оборудования приходится на предварительную многократную откачку рабочих камер при загрузке и выгрузке обрабатываемых изделий. Кроме того, разгерметизация рабочей камеры не позволяет воспроизводить вакуумные условия от цикла к циклу.

Для исключения непроизводительных потерь времени, а также обеспечения идентичности вакуумных условий используют различные устройства для пода-

чи веществ и образцов в рабочий объем без нарушения вакуума. Все эти устройства можно разделить на три группы: магазинно-бункерные, шлюзовые и комбинированные.

*Магазинно-бункерные устройства 1* (рис. 8.31, а) с загруженными в них материалами или изделиями 2 применяют в установках периодического действия и размещают непосредственно в рабочей камере 4 установки. Загрузку и выгрузку магазинов или бункеров выполняют после разгерметизации камеры. Из устройств 1 изделия 2 периодически поступают на рабочую позицию 3 для проведения технологических процессов. После обработки изделия транспортируются в приемный магазин 5 или бункер.

Применение таких устройств практически не усложняет конструкцию вакуумных систем и позволяет предварительно прогревать материалы для их обезгаживания в ходе первоначальной откачки рабочей камеры. Конструктивно устройства выполняют на базе обычных загрузочных устройств с учетом специфических для вакуумной техники требований. Основной недостаток магазинно-бункерных устройств – их ограниченная вместимость.

*Шлюзовые загрузочные устройства (ШЗУ)* представляют собой совокупность средств герметизации, транспортирования и откачки, обеспечивающих подачу изделий из области с атмосферным давлением в рабочую вакуумную камеру и обратно без напуска газов в рабочие камеры. Применение ШЗУ позволяет загружать практически неограниченное число изделий, но по конструкции эти устройства гораздо сложнее магазинно-бункерных. По виду герметизации ШЗУ подразделяют на закрытые и открытые.

Для *закрытых ШЗУ* характерна полная герметизация рабочей камеры с помощью затвора во время проведения технологического процесса. ШЗУ с одной шлюзовой загрузочно-выгрузочной камерой (рис. 8.31, б) работает следующим образом.



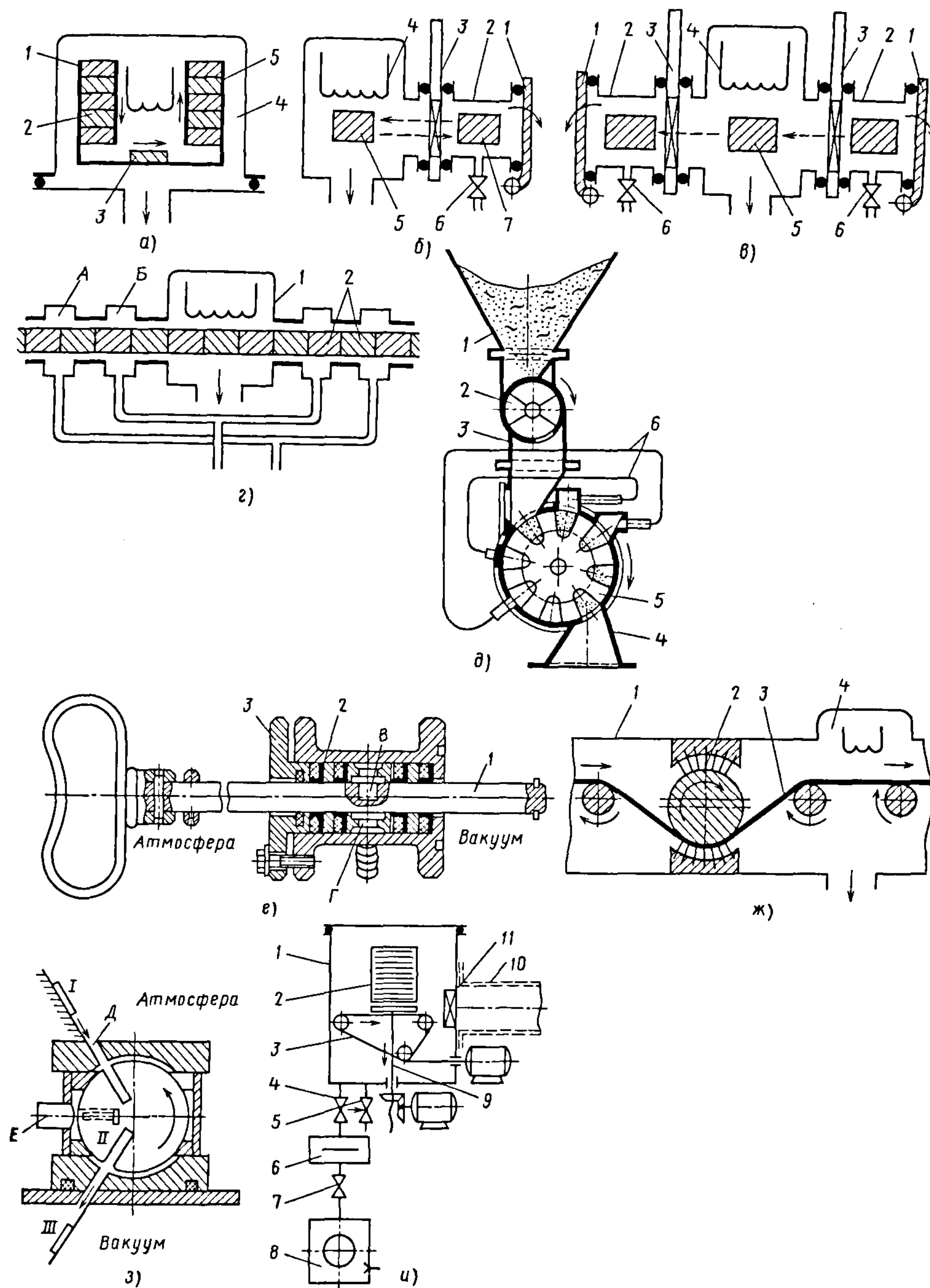


Рис. 8.31. Схемы загрузочных вакуумных устройств

При закрытом откачном патрубке с клапаном 6 шлюзовую камеру 2 заполняют воздухом до атмосферного давления, а затем открывают крышку 1 и вводят в шлюзовую камеру изделие 7, после чего крышку закрывают. Далее, через клапан 5 откачивают воздух из шлюзовой камеры 1 до давления, равного или близкого к давлению в рабочей камере 4. Затем открывают затвор 3 и через его проходное отверстие транспортируют изделия в рабочую камеру на позицию обработки 5. Обработанное изделие выгружают из рабочей камеры в обратной последовательности.

Для совмещения процессов обработки изделий и операций загрузки-выгрузки применяют шлюзовые устройства с двумя шлюзовыми камерами 2 (рис. 8.31, в; обозначения те же, что на рис. 8.31, б).

В *открытых* ШЗУ нет уплотнительных устройств. Многоступенчатой дифференциальной откачкой через диффузионно-щелевые зазоры между стенками межкамерного канала и транспортирующего устройства давление снижают от атмосферного до рабочего. С помощью устройств такого типа можно обеспечить непрерывное или дискретное транспортирование изделий с постоянными размерами и формой поперечного сечения (листов, полос, проволоки, лент, прутков и др.), а также кассет, спутников, цилиндрических носителей и других держателей изделий.

Такие ШЗУ перспективны также для последовательной загрузки штучных изделий, которые следуют одно за другим непрерывно (торец в торец), образуя как бы непрерывный материал. Спутники, в которых эти изделия закреплены, по форме сечения должны быть идентичны каналу ШЗУ.

Для непрерывного ввода материала в рабочую камеру применяют так называемые динамические уплотнения – ряд последовательно расположенных вакуумных камер, давление в которых ступенчато уменьшают до значения, близкого к давлению в рабочей камере. Число ступеней

откачки, зазоры в межкамерном канале и откачные средства выбирают в зависимости от заданного давления в рабочей камере. Межкамерный канал и транспортирующее устройство изготавливают из материалов с близкими температурными коэффициентами линейного расширения, применяя интенсивное охлаждение для исключения возможности изменения ширины канала вследствие температурного расширения.

Конструктивная схема открытого ШЗУ дана на рис. 8.31, г. По форме сечения изделия 2, подаваемые в камеру 1, идентичны транспортному каналу шлюза. В корпусе шлюза со стороны входа и выхода имеются по две кольцевые полости А и Б, которые попарно объединены трубопроводами, обеспечивающими ступенчатую откачку.

Открытое ШЗУ с поворотным ячеечным механизмом (рис. 8.31, д) предназначено для подачи сыпучих материалов. Из воронки 1 материал поступает в дозирующее колесо 2 и, далее, через промежуточную камеру 3 в ячейки транспортного колеса 5 к выходному патрубку 4 в рабочую камеру. Дифференциальную ступенчатую откачку выполняют через трубопроводы 6.

Иногда в открытых системах применяют уплотнители, «обжимающие» транспортирующее устройство; это позволяет значительно уменьшить поток воздуха из атмосферы через межкамерный канал, что, в свою очередь, приводит к уменьшению размеров шлюзовой системы, уменьшению мощности откачных средств, а также расширению допусков на точность зазора в межкамерных каналах. Недостаток таких устройств – частые повреждения уплотнителей из-за постоянного трения и попадания твердых частиц. Конструкция шлюза с уплотнителем показана на рис. 8.31, е.

На полированной штанге 1 имеется канавка для загрузки подаваемого материала. Штанга может вращаться и совершать возвратно-поступательное движение.



ние. Уплотнение прокладки 2 — из резины или фторопласта. Сила сжатия прокладок должна обеспечивать как свободное перемещение штока, так и герметичность. Для загрузки штангу выводят в сторону атмосферы так, чтобы полость В оказалась снаружи фланца 3, закладывают подаваемый материал в канавку и подают штангу в сторону вакуумной полости. При этом вначале канавка оказывается в канавке Г полости форвакуумной откачки, затем — в рабочем объеме камеры. При повороте штанги на  $180^\circ$  подаваемый материал высыпается из канавки в соответствующее устройство рабочей камеры.

В ШЗУ для подачи ленточного материала (рис. 8.31, ж) лента 3 проходит из шлюзовой камеры 1 в рабочую камеру 4 через уплотнитель 2, который состоит из нескольких плоских эластичных мембран, одним концом закрепленных на стенке межкамерного канала, а другим — сжимающих поверхности ленты и приводного барабана. При изменении толщины ленты эффективность уплотнения не снижается.

Принципиальная конструктивная схема открытого ШЗУ роторного типа с пазами для переноса изделий в рабочую камеру показана на рис. 8.31, з. В положении I образец загружают в полость Д устройства. При повороте этой полости в положении II из нее через патрубок Е проводят предварительную откачку. Далее, при повороте полости в положение III образец под действием собственной силы тяжести падает в вакуумное пространство на рабочую позицию.

Комбинированные загрузочные системы — это сочетание шлюзовых и магазинно-бункерных устройств (рис. 8.31, и). Принцип работы такого ШЗУ заключается в том, что шлюзовая камера 1 может отделяться от рабочей камеры 10 затвором 11. После загрузки магазина 2 в ШЗУ давление в устройстве снижают до требуемого с помощью откачной системы, включающей в себя затвор 4, ловушку 6, клапан 7 и форвакуумный насос 8. Затем открывается затвор 11 между шлюзовой и

рабочей камерами и изделия одно за другим подаются на обработку из магазина в камеру 10 с помощью резиновых пасиков 3 и шагового механизма 9.

По окончании обработки всех изделий закрывают затвор 11, давление в ШЗУ повышают до атмосферного через натека-тель 5, выгружают обработанный магазин и загружают новый. При линейной конструктивной компоновке установки на другом ее конце размещают такое же по конструкции приемное ШЗУ.

При проектировании вакуумного технологического оборудования наибольшую сложность представляет расчет газовых потоков в открытых шлюзовых загрузочных системах. При расчете определяются геометрические параметры ШЗУ, установившееся давление в вакуумных объемах, проводимости межкамерных каналов; выбирают средства откачки, габаритные размеры и тип устройства транспортирования изделий; задаются зазоры между стенками межкамерных каналов и устройства транспортирования.

Рассчитывается эквивалентный диаметр каждого канала по формуле  $d_e = 4F/\Pi$ , где  $F$  — площадь сечения канала;  $\Pi$  — периметр.

Определяется режим течения газа в каждом канале по формуле  $k = d_e(P_i + P_{i+1})/2$ , где  $P_i$  — давление на входе в канал,  $P_{i+1}$  — давление на выходе из канала. Если  $k > 1,33$  Па·м, то имеет место вязкостный режим течения, при  $0,02 < k < 1,33$  Па·м — молекулярно-вязкостный; при  $k < 0,02$  Па·м — молекулярный.

Зная режим течения газа, можно определить проводимость каналов и эффективные скорости откачки промежуточных и рабочей камеры, обеспечивающие заданное давление в этих камерах. Затем рассчитывается быстрота действия вакуумных насосов с учетом проводимости вакуумных магистралей.

Для вязкостного режима, который обычно имеет место в первом канале, проводимость канала находится по фор-

муле  $U_b = A_b(P_i + P_{i+1})/2l$ , где  $A_b$  – постоянная канала;  $l$  – длина канала, м.

Постоянная канала вычисляется следующим образом:

$$A_b = 1,79k_b(ab^3/\lambda_1)\sqrt{T/M},$$

где  $a, b$  – ширина и высота канала соответственно, м;  $\lambda_1$  – длина свободного пробега молекул газа при давлении 1 Па, м;  $T$ ,  $M$  – температура (К) и молекулярная масса газа, кг/кмоль, соответственно;  $k_a$  – коэффициент, зависящий от отношения  $a/b$ .

Давление в первой промежуточной камере  $P_1$  рассчитывается по формуле

$$P_1 = P_0\sqrt{(A_b\varphi_b)/2S_1},$$

где  $P_0$  – величина атмосферного давления;  $\varphi_b$  – коэффициент, равный для вязкостного режима  $5 \cdot 10^3 \dots 10^4$ ;  $S_1$  – эффективная быстрота откачки первой промежуточной камеры.

В результате вычислений по этой формуле определяется, при каком наибольшем давлении  $P_1$  (и минимальной  $S_1$ ) обеспечивается в следующем канале молекулярно-вязкостный режим течения газа.

Длину и проводимость первого канала для вязкостного режима можно рассчитать по формулам

$$l_b = P_0\sqrt{A_b/(2S_{1\min}\varphi_b)};$$

$$U_b = \sqrt{0,5A_bS_{1\min}\varphi_b}.$$

Для расчета второго канала, в котором имеет место молекулярно-вязкостный режим течения газа, необходимо определить постоянные канала для вязкостного  $A_b$  и молекулярного  $A_m$  режимов. Последняя рассчитывается по формуле

$$A_m = 97k_m[(a^2b^2/(a+b))]\sqrt{T/M},$$

где  $k_m$  – коэффициент, зависящий от отношения  $b/a$ .

Давление во второй промежуточной камере  $P_2$  при эффективной быстроте откачки  $S_2$  равно

$$P_2 = \sqrt{(P_{1\max}\varphi_{m-b}/S_2)(0,5A_bP_{1\max} + zA_m)},$$

где  $\varphi_{m-b}$  – коэффициент, равный для молекулярно-вязкостного режима  $10 \dots 100$  Па/м;  $z$  – коэффициент, учитывающий среднее давление в канале и определяемый по формуле

$$z = \frac{1 + (d_3/\eta)\sqrt{M/(R_0T)}[(P_i + P_{i+1})/2]}{1 + 1,24(d_3/\eta)\sqrt{M/R_0T}[(P_i + P_{i+1})/2]},$$

где  $\eta$  – вязкость газа, Па·с;  $R_0 = 8,317$  Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная.

Обеспечить в третьем канале молекулярный режим течения газа можно путем определения  $P_{2\max}$  ( $S_{2\min}$ ) и расчета рациональных длин и проводимости второго канала для молекулярно-вязкостного режима по следующим формулам:

$$l_{m-b} = \sqrt{(P_{1\max}/S_{1\min}\varphi_{m-b})(0,5A_bP_{1\max} + zA_m)},$$

$$U_{m-b} = \sqrt{(S_{1\min}\varphi_{m-b}/P_{1\max})(0,5A_bP_{1\max} + zA_m)}.$$

В третьем канале нужно обеспечить молекулярный режим течения газа, а для откачки третьей промежуточной камеры необходимо использовать высоковакуумное средство откачки, например диффузионный насос. Постоянная канала  $A_m$  для молекулярного режима определяется по приведенной выше формуле.

Если третья камера является рабочей, то третий канал должен надежно блокировать рабочий объем, давление  $P_3$  в котором рассчитывается по следующей формуле:

$$P_3 = (\sqrt{A_mS_3P_{2\max}\varphi_m} + Q)/S_3,$$

где  $S_3$  – эффективная быстрота откачки рабочей камеры, м<sup>3</sup>/с;  $\varphi_m$  – коэффициент, равный для молекулярного режима  $10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3}$  Па/м;  $Q$  – поток газовыделений в рабочей камере, м<sup>3</sup>·Па/с.

Длину  $l_m$  и проводимость  $U_m$  третьего канала можно рассчитать по следующим формулам:



$$l_m = \sqrt{A_m p_{2 \max} / S_3 \varphi_m},$$

$$U_m = \sqrt{A_m S_3 \varphi_m / p_{2 \max}}.$$

В рабочей камере вакуумной установки с правильно рассчитанной и сконструированной ШЗУ обеспечивается необходимое для технологического процесса давление.

При перемещении через шлюзовое устройство загружаемого изделия в расчет параметров ШЗУ входит определение колебаний давления в промежуточных и рабочей камерах, а также оптимальной скорости движения транспортирующего устройства. При перемещении последнего от одной промежуточной камеры к другой не только изменяется проводимость канала, но и переносится некоторое количество газа  $pV$  из объема  $V_1$  в объем  $V_2$ . При этом изменяются давление  $p_2$  и его всплеск  $p_{2 \max}$  можно выразить следующим уравнением:  $p_1 V + p_2 V_2 = p_{2 \max} (V + V_2)$ .

### 8.5.1. Виды шлюзовых систем

*Вакуумная шлюзовая система* – это совокупность устройств герметизации, транспортирования и откачки, обеспечивающих перепад давлений и перемещение изделий между вакуумными камерами с различным давлением.

В зависимости от степени герметизации вакуумных камер относительно друг друга шлюзовые системы разделяют на следующие;

*закрытые*, имеющие уплотнители и характеризующиеся полной герметизацией вакуумных камер относительно друг друга;

*открытые*, где нет уплотнителей и отсутствует герметизация вакуумных камер относительно друг друга;

*полуоткрытые* (полузакрытые), имеющие уплотнители и характеризующиеся частичной герметизацией вакуумных камер относительно друг друга;

*комбинированные*, отличающиеся сочетанием закрытых, открытых и полуоткрытых шлюзовых систем.

### Закрытые шлюзовые системы.

Наиболее простой вариант закрытой шлюзовой системы представляет собой вакуумную шлюзовую камеру с двумя затворами, одним из которых она герметично отделена от рабочей (вакуумной) камеры, а другим – от атмосферы (обычно это загрузочное окно с крышкой). Внутри шлюзовой камеры имеется устройство для передачи изделия в рабочую камеру.

Работу шлюзовой системы осуществляют в такой последовательности. Сначала закрывают откачной патрубком 5 (рис. 8.32, а) шлюзовой камеры 4, заполняют ее воздухом до достижения атмосферного давления, а затем открывают крышку 2 и устанавливают в шлюзовую камеру изделие 3, после чего крышку закрывают. Далее откачивают воздух из шлюзовой камеры до достижения давления, равного или близкого к давлению воздуха в рабочей камере 1. Затем открывают затвор 6 (рис. 8.32, б) между шлюзовой и рабочей камерами и транспортируют изделия в рабочую камеру. Обработав изделия в рабочей камере, их выгружают в обратной последовательности.

Более сложные шлюзовые системы состоят из нескольких шлюзовых камер, отделенных друг от друга герметичными затворами. Если шлюзовая 4 (рис. 8.32, в) и рабочая 1 камеры соединены узким каналом для транспортировки изделий 3, то для герметизации канала часто используют заслонки или затворы – уплотнительные ролики 6 из резины круглого сечения. Затвор 6 открывает и закрывает канал, на поверхности которого имеется углубление 7 цилиндрической формы.

К закрытым шлюзовым системам относятся также устройства, в которых вакуумные камеры с различным давлением герметично разделены жидкостью, образующей жидкостный затвор 6 (рис. 8.32, г).

Изделие 3 (лента или проволока) поступает в вакуумную рабочую камеру 1 через жидкостный затвор, который расположен в канале U-образной формы, где жидкость под действием атмосферного

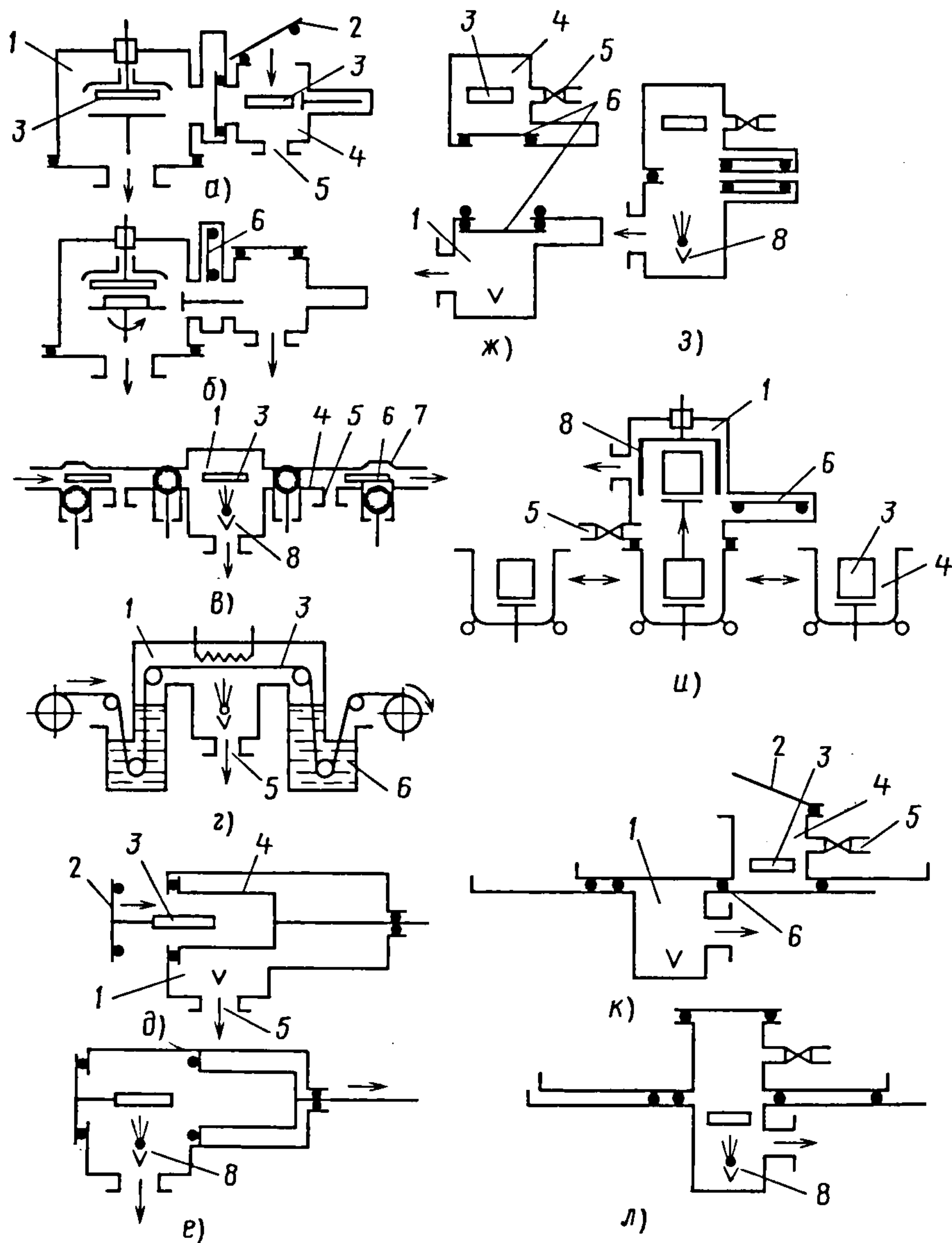


Рис. 8.32. Закрытые шлюзовые системы:

*а, б* – с одной неподвижной шлюзовой камерой в закрытом и открытом положениях; *в* – с двумя неподвижными шлюзовыми камерами; *г* – без шлюзовых камер; *д, е* – с подвижной шлюзовой камерой в закрытом и открытом положениях; *ж, з* – с переносной шлюзовой камерой в закрытом и открытом положениях; *и* – с передвижной шлюзовой камерой; *к, л* – с передвижной шлюзовой камерой и скользящим затвором в закрытом и открытом положениях; *1* – рабочая камера; *2* – съемная крышка; *3* – изделие; *4* – шлюзовая камера; *5* – откачной патрубок; *6* – затвор; *7* – цилиндрическое углубление; *8* – источник нанесения покрытия



давления занимает разные уровни. Жидкость, применяемая для закрытых шлюзовых систем, должна иметь малое давление парообразования, высокую плотность, низкую химическую активность и плохую способность смачиваемости.

Для устранения налипания уплотняющей жидкости на изделие со стороны вакуумной камеры помещают жидкость с малым давлением парообразования, например вакуумное масло, образующее тонкую пленку на этом изделии. Со стороны атмосферы помещают другую защитную жидкость, которая очищает изделие от пленки масла, следов уплотняющей жидкости и образует защитное или декоративное покрытие на нем. Избыток защитной жидкости удаляют с изделия скребками, воздушными или газовыми струями.

Разновидностью закрытых шлюзовых систем являются устройства, в которых подвижная шлюзовая камера размещена внутри вакуумной рабочей камеры (рис. 8.32, д, е) или вне ее (рис. 8.32, ж-л).

Шлюзовая камера 4 (см. рис. 8.32, д) прижимается открытым отверстием к стенке рабочей камеры 1. В месте стыковки шлюзовой и рабочей камер имеется съемная крышка 2 для загрузки и выгрузки изделий 3. После загрузки изделий откачивают воздух из шлюзовой камеры и перемещают ее от стенки рабочей камеры (см. рис. 8.32, е). Далее начинают наносить пленку на неподвижные изделия.

Переносная шлюзовая камера 4 (см. рис. 8.32, ж), предназначенная для загрузки и выгрузки изделий, должна находиться в специальном помещении с обеспыленной атмосферой, в котором ее герметизируют и откачивают. После этого шлюзовую камеру 4 переносят и устанавливают на рабочую камеру 1, а затем открывают затворы 6. Далее начинают наносить покрытие на изделие 3 из источника 8.

Для загрузки крупногабаритных изделий и изделий с большой массой используют передвижные шлюзовые камеры 4 (см. рис. 8.32, и). Изделия подъемным

механизмом загружают в шлюзовую камеру, которую устанавливают под рабочей камерой 1. Затем откачивают воздух из шлюзовой камеры через патрубок 5 и открывают затвор 6. После этого изделия перемещают в рабочую камеру 1 с источником нанесения покрытия 8.

Корпус подвижной шлюзовой камеры 4 используют в качестве затвора рабочей камеры 1 (рис. 8.32, к). Вначале загружают изделие 3, открывая крышку 2, а затем через патрубок 5 откачивают шлюзовую камеру и перемещают ее к рабочей камере 1. После соединения шлюзовой камеры с рабочей изделие 3 переносят к источнику 8 нанесения покрытия (рис. 8.32, л).

Закрытые шлюзовые системы отличаются простотой конструкции и надежностью в эксплуатации, благодаря этим качествам они нашли наибольшее применение в промышленном и лабораторном вакуумном оборудовании.

**Открытые шлюзовые системы.** В открытых шлюзовых системах вакуумные камеры сообщаются между собой межкамерными каналами, по которым перемещается транспортирующее устройство 3 (рис. 8.33) с изделиями 6. Размеры и форма транспортирующего устройства такой шлюзовой системы зависят от размеров и формы межкамерных каналов 1 и 4, которые, в свою очередь, зависят от размеров и формы изделия. Межкамерные каналы создают частичное сопротивление поступлению воздуха из атмосферы в шлюзовые камеры 2 и из них в рабочую камеру 5. Откачные средства шлюзовых камер откачивают часть воздуха, поступившего из канала 1, и создают небольшое разрежение. Остальную часть воздуха, поступившего из межкамерного канала 4, откачивает откачное средство рабочей камеры, создавая рабочий вакуум.

Чем меньше зазоры (щели) между стенками межкамерных каналов и транспортирующего устройства и чем значительнее длина этих каналов, тем больше сопротивление потоку воздуха, в результате чего можно создать более низкое

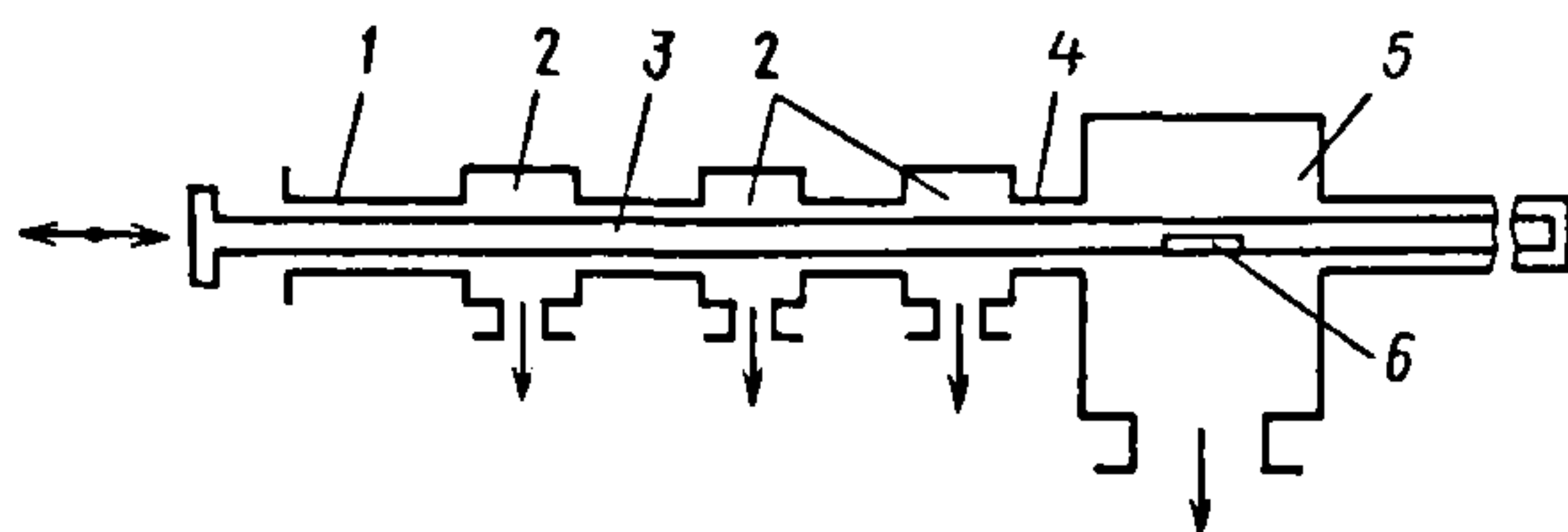


Рис. 8.33. Многокамерная открытая шлюзовая система:

1 – канал в шлюзовую камеру;  
2 – шлюзовые камеры; 3 – транспортирующее устройство (шток); 4 – канал в рабочей камере; 5 – рабочая камера;  
6 – изделие

давление в шлюзовых и рабочей камерах. Такое уплотнение шлюзовых камер называют *диффузионно-целевым*. С помощью уплотнения подобного типа можно обеспечить транспортирование изделий, имеющих постоянную форму поперечного сечения (листов, полос, проволоки, лент, прутков и т.п.), а также кассет, спутников и других держателей изделий.

Число шлюзовых камер в открытой шлюзовой системе, зазоры в межкамерных каналах и откачные средства выбирают в зависимости от давления, которое необходимо создать в рабочей камере. Чтобы достичь в последней более низкого давления, применяют многокамерную (многоступенчатую) шлюзовую систему, разделенную несколькими межкамерными каналами, и оснащают ее более эффективными откачными средствами.

Всасываемый в открытую шлюзовую систему поток воздуха можно уменьшить,

если на входе первого межкамерного канала создать встречную воздушную струю кольцевой формы. Струя сжатого выходящего с большой скоростью воздуха способствует уплотнению шлюзовой системы и обладает откачивающим действием. Вакуум, образуемый в первой шлюзовой камере под действием струи сжатого воздуха, зависит от размеров и формы сопел, формы выпускной камеры, скорости истечения воздуха и может достигать 1330 Па.

На рис. 8.34 дана схема открытой шлюзовой системы, которая состоит из шлюзовой камеры 9 с откачным средством, камеры высокого давления 6, межкамерных каналов 5, 8 и 10, эжекторного сопла 1, камеры расширения 2 и диффузора 3. Транспортирующее устройство 4 (лента, проволока, блок держателей изделия и т.п.) вводят через каналы в рабочую камеру 11.

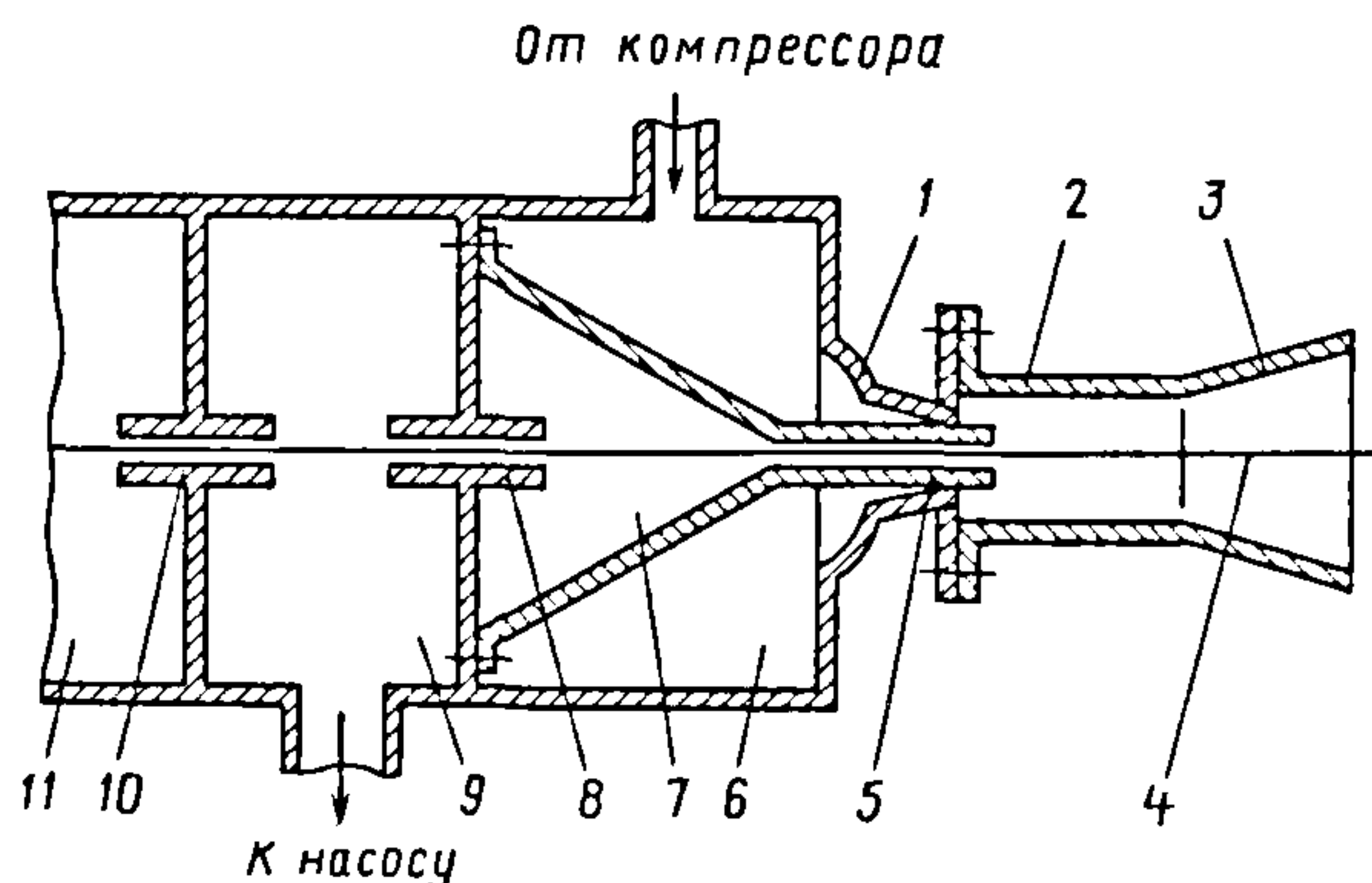


Рис. 8.34. Многокамерная открытая шлюзовая система с дополнительным устройством, препятствующим натеканию воздуха:

1 – эжекторное сопло; 2 – камера смешения; 3 – диффузор; 4 – транспортирующее устройство; 5, 8, 10 – каналы; 6 – камера высокого давления; 7, 9 – шлюзовые камеры; 11 – рабочая камера



Для уменьшения потока воздуха, поступающего в шлюзовую камеру 9, в камеру высокого давления 6 подается воздух от компрессорной установки, из-за чего в эжекторном сопле образуется высоконапорная струя, при истечении которой во входном сечении камеры смещения 2 устанавливается давление, меньшее атмосферного. Даже при отключенных откачных средствах камер 9 и 11 воздух из них через камеру 7 и канал 5 поступает в камеру смещения 2 и оттуда под действием высоконапорной струи — к диффузору 3, где давление воздуха стабилизируется и становится равным атмосферному.

Пройдя область встречного потока воздуха, а затем область разрежения в камере 7, которая является первой ступенью откачки шлюзовой системы, транспортирующее устройство через канал 8 поступает во вторую ступень откачки, т.е. шлюзовую камеру 9 и т.д.

Недостатки открытых шлюзовых систем следующие:

- попадание в межкамерные каналы (вместе с поступающим воздухом) различных частиц, которые загрязняют поверхность изделий, повышают силу трения и приводят к заклиниванию трущихся поверхностей;

- появление задиров на сопряженных поверхностях межкамерных каналов и устройств транспортирования;

- коробление и потеря работоспособности шлюзовой системы при нагреве устройств транспортирования;

- сложность герметизации межкамерных каналов при выключении откачных средств;

- высокая стоимость изготовления межкамерных каналов и устройств транспортирования.

Для устранения недостатков открытых шлюзовых систем на входе первого канала устанавливают боксы с обеспыленной средой, увеличивают зазоры между сопряженными поверхностями, а для обеспечения необходимого вакуума в шлюзовых камерах используют более

мощные откачные средства. Кроме того, трущиеся поверхности шлифуют, полируют, наносят на них хромовое покрытие, а также смазывают их пастами, например на основе дисульфида молибдена.

Межкамерные каналы и транспортирующие устройства изготавливают из материалов с одинаковым коэффициентом линейного расширения и интенсивно охлаждают.

**Полуоткрытые шлюзовые системы.** Уплотнитель, применяемый в полуоткрытой шлюзовой системе, позволяет значительно уменьшить поток воздуха из атмосферы через межкамерные каналы. В результате этого уменьшаются габаритные размеры шлюзовой системы, используются менее мощные откачные средства и могут быть увеличены зазоры в межкамерных каналах.

В качестве уплотнителей 1 (рис. 8.35, а) в полуоткрытых шлюзовых системах применяют пластины, выполненные из материалов с малым коэффициентом трения, например из различных фторопластов и капрона, которые закрепляют в межкамерном канале и поджимают к поверхности изделия (ленты) резиновыми прокладками. Эластичность последних позволяет транспортировать ленты различной толщины (до 2 мм). Износ пластин из-за постоянного трения ограничивает применение таких уплотнителей в полуоткрытых шлюзовых системах.

Большим ресурсом работы обладают *роликовые* уплотнители. В многоступенчатой полуоткрытой шлюзовой системе для ввода ленты в рабочую камеру и вывода из нее используют в качестве уплотнителя 1 резиновые вращающиеся ролики (рис. 8.35, б). Оси роликов устанавливают в цилиндрические межкамерные каналы, и ролики приводят во вращение движущейся лентой, при этом зазоры между лентой и роликом практически отсутствуют и натекание воздуха в местах стыка незначительно. Воздух проникает только в зазоры между роликами и цилиндрическими межкамерными каналами. Для его

откачки используют двухступенчатую откачную систему на входе и выходе ленты из рабочей камеры.

Рассмотренные полуоткрытые шлюзовые системы не позволяют транспортировать ленты с большим диапазоном толщины, а также отдельные плоские изделия. В шлюзовых системах (рис. 8.35, в–е) этот недостаток отсутствует.

Уплотнитель полуоткрытой шлюзовой системы (рис. 8.35, в) состоит из нескольких плоских эластичных мембран, которые одним концом закреплены на стенках межкамерного канала, а другим прижимаются к поверхности ленты и при-

водного барабана. При изменении толщины ленты эффективность уплотнителя не снижается.

В полуоткрытой шлюзовой системе (рис. 8.35, г) уплотнитель выполнен в виде полых роликов, которые не трутся о поверхность изделий. Внутри одного из пустотелых роликов с эластичной поверхностью подают сжатый воздух. При прохождении, например, плоских изделий, стыков лент поверхность этого ролика деформируется, не нарушая герметичности устройства. Другой пустотелый эластичный ролик (приводной) имеет внутри жесткую обечайку, соединенную с приводом.

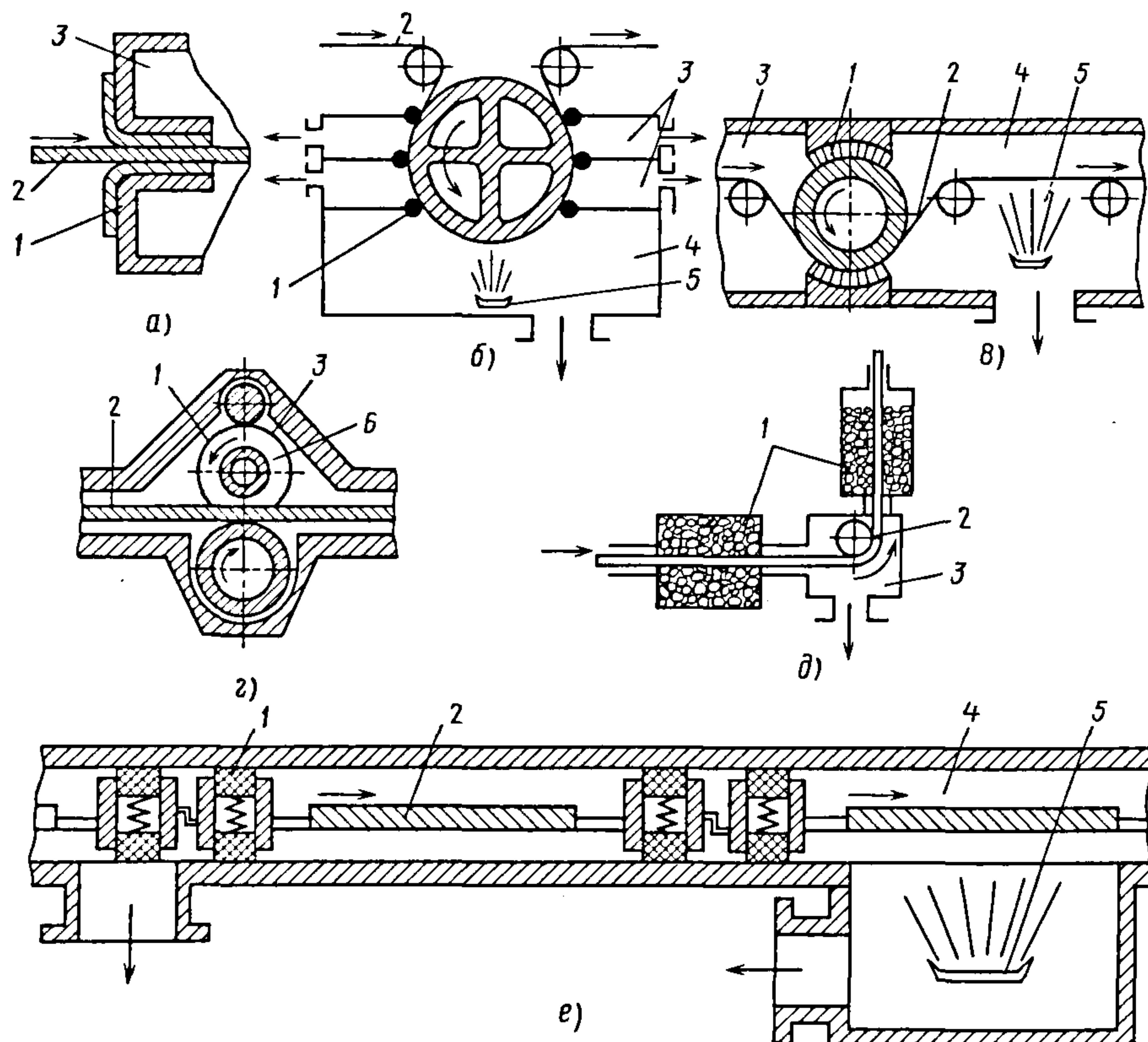


Рис. 8.35. Полуоткрытые шлюзовые системы с уплотнителем в виде:

а – неподвижных пластин; б – роликов; в – мембран; г – полых роликов; д – гранул;  
е – подвижных пластин; 1 – уплотнитель; 2 – изделие; 3 – шлюзовая камера; 4 – рабочая камера;  
5 – источник нанесения покрытия; б – полость со сжатым воздухом



Полуоткрытая шлюзовая система (рис. 8.35, д), в которой уплотнителем служат гранулы, размещенные в межкамерных каналах, отличается простотой конструкции. Гранулы прижимаются к ленте под действием силы тяжести, а в горизонтальном канале шлюзовой системы, кроме того, потоком воздуха, всасываемым со стороны входного отверстия.

В полуоткрытых шлюзовых системах (рис. 8.35, е) подпружиненные подвижные уплотнители, установленные по торцам кассеты, уплотняют межкамерный канал. В кассетах загружают крупногабаритные изделия различной формы в рабочую камеру. Для поддержания постоянного рабочего давления в ней длина кассет должна быть меньше длины межкамерного канала.

Недостатки полуоткрытых шлюзовых систем следующие:

быстрое изнашивание уплотнителей, в особенности работающих на трении скольжения;

повреждение рабочей поверхности уплотнителей при попадании твердых частиц и нарушение герметичности шлюзовой системы;

выход из строя уплотнителей при перегреве транспортирующего устройства или стенок межкамерного канала.

Если уплотнитель в межкамерном канале шлюзовой системы практически не создает сопротивления потоку воздуха, то эффективность такой системы такая же, как у открытой; если уплотнитель ограничивает почти весь поток воздуха, — она такая же, как у закрытой.

Комбинированные шлюзовые системы. В вакуумном оборудовании широко применяют комбинированные шлюзовые системы. При большой разности давления в шлюзовых камерах между ними применяют закрытые или полуоткрытые шлюзовые системы, наиболее рационально и экономично используя откачные средства. При малой разности давления между этими камерами используют открытые шлюзовые системы.

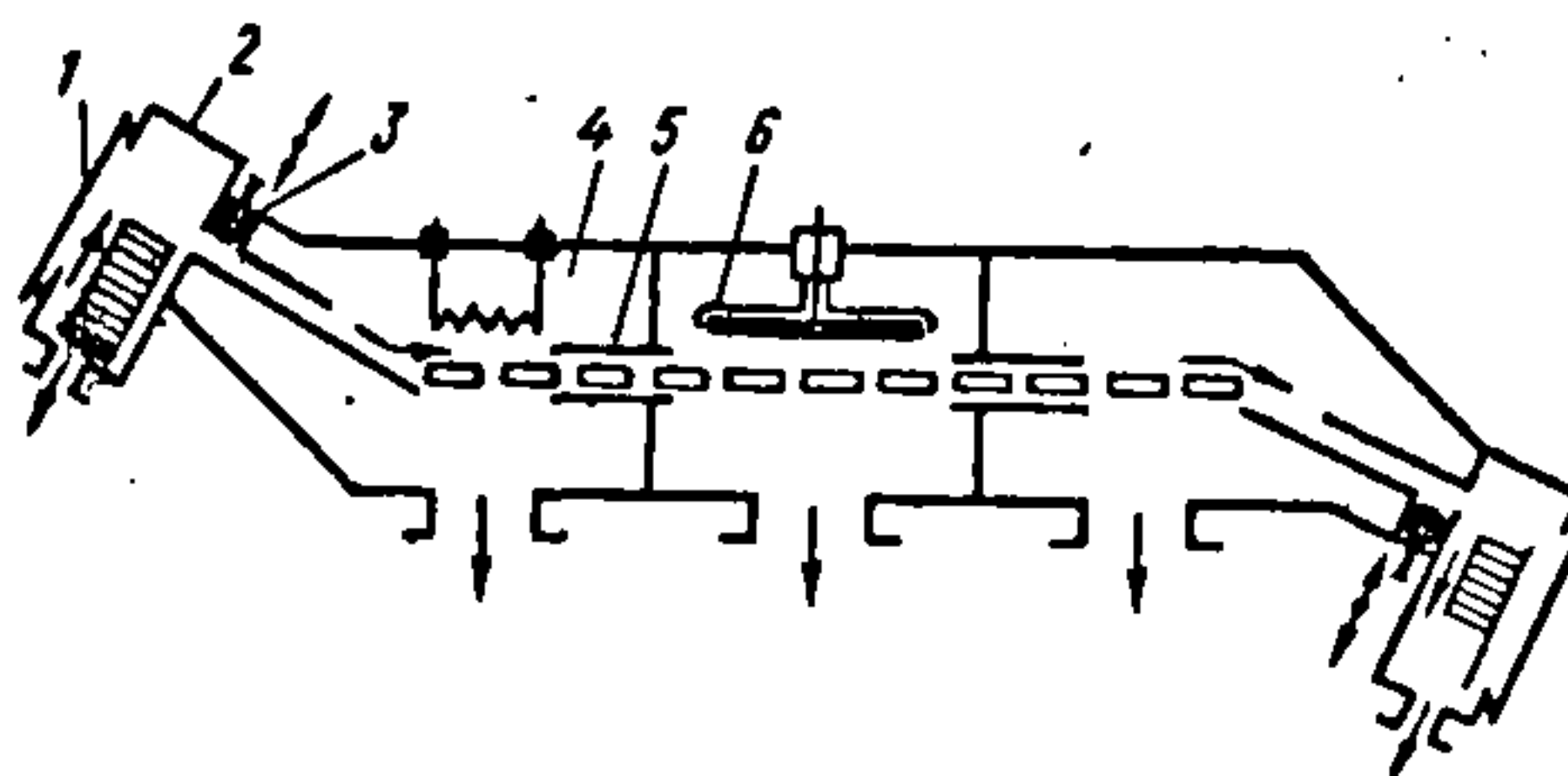


Рис. 8.36. Комбинированная шлюзовая система:

1 — затвор (крышка); 2 — шлюзовая камера загрузки; 3 — затвор (эластичный ролик); 4 — шлюзовая камера нагрева; 5 — межкамерный канал; 6 — рабочая камера

В вакуумной установке с комбинированной шлюзовой системой (рис. 8.36) первую ступень откачки герметизируют от атмосферы и последующих ступеней затворами 1 и 3 (закрытая шлюзовая система), а шлюзовую камеру откачивают форвакуумным насосом. Камеру нагрева 4, которая является второй ступенью откачки, откачивают высоковакуумным насосом и соединяют с рабочей камерой 6 межкамерным каналом 5 (открытая шлюзовая система). Канал также обеспечивает перепад давления. В рабочей камере в этом случае давление может достигнуть  $10^{-7}$  Па, так как на нее почти не влияет первая ступень откачки комбинированной шлюзовой системы.

Конструкции комбинированных шлюзовых систем сочетают конструкции закрытых, открытых и полуоткрытых систем.

### 8.5.2. Использование шлюзовых систем в вакуумном оборудовании

Одним из критериев качества вакуумного оборудования является непрерывность технологического процесса обработки изделий, при которой рабочие и вспомогательные операции совмещены во времени, а непроизводительные потери рабочего времени отсутствуют.

Рабочее время, затрачиваемое на выполнение технологической операции нанесения тонкопленочного покрытия в ва-

куумном оборудовании со шлюзовыми системами, состоит в большинстве случаев из времени, затраченного на рабочие операции, включающие в себя нанесение покрытий, нагрев, очистку, травление, охлаждение изделия, а также на вспомогательные операции: напуск воздуха в камеру, загрузку и выгрузку изделий, откачку камер, перемещение изделий между шлюзовыми и рабочими камерами.

Непрерывность технологического процесса может быть сохранена при постоянном взаимодействии с изделием воздействующей среды. В этом случае требуется непрерывно или периодически удалять одно или несколько изделий из зоны групповой обработки и наполнять ее необработанными.

В вакуумном оборудовании непрерывность технологического процесса можно обеспечить только с помощью шлюзовой системы. Однако не всегда при использовании шлюзовой системы удастся полностью совместить время рабочих и вспомогательных операций.

По степени совмещения рабочих и вспомогательных операций различают вакуумные установки:

- периодического действия, характеризующиеся прерывистостью технологического процесса, при котором рабочие и вспомогательные операции не совмещены во времени;

- полунепрерывного действия, отличающиеся прерывистостью технологического процесса, когда рабочие и вспомогательные операции частично совмещены во времени;

- непрерывного действия, характеризующиеся непрерывностью технологического процесса, при котором рабочие и вспомогательные операции полностью совмещены во времени.

Установки периодического действия могут быть двух видов: без шлюзовых и со шлюзовыми системами.

Для установок полунепрерывного действия в зависимости от степени совмещения рабочих и вспомогательных операций определяют, к какому типу (пе-

риодическому или непрерывному) они относятся.

**Шлюзовые системы установок периодического действия.** В установках периодического действия наибольшее распространение получили закрытые шлюзовые системы, которые обычно выполняют в виде одной шлюзовой камеры, отделяемой от рабочей герметичным затвором.

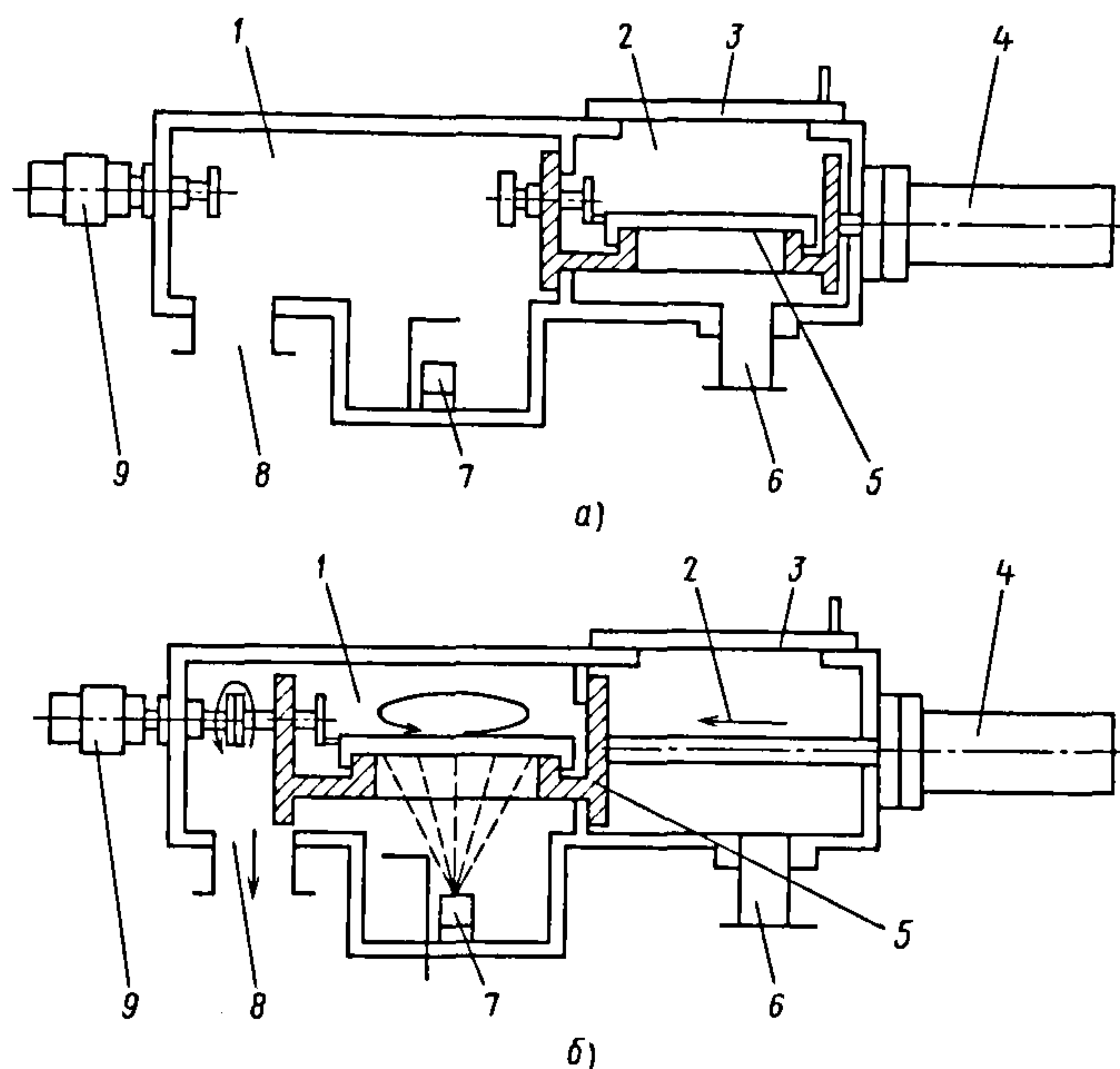
При загрузке изделий в шлюзовую камеру в рабочей камере поддерживаются готовность источника нанесения покрытия и определенное давление. При нанесении покрытий в рабочей камере шлюзовая остается пустой (в ожидании возвращения обработанных изделий). Откачивают шлюзовую камеру обычно до достижения давления, равного давлению рабочей камеры или более низкого, для того чтобы уменьшить загрязнение газовой среды рабочей камеры при сообщении ее со шлюзовой.

Иногда с целью упрощения вакуумной системы шлюзовую камеру откачивают только форвакуумным насосом. В этом случае ограничения внесения загрязнений в рабочую камеру достигают уменьшением размеров шлюзовой камеры несмотря на то, что при этом уменьшается число загружаемых изделий и снижается производительность.

Загрязнения в рабочую камеру могут попадать с обрабатываемых изделий, их держателей, а также в результате газовыделения элементов конструкции рабочей и шлюзовой камер. Поэтому часто обезгаживание (прогрев) изделий с держателями и самих шлюзовых камер совмещают. Время охлаждения изделий после нанесения покрытия уменьшают напуском в шлюзовые камеры инертных или других химических неактивных газов.

На рис. 8.37 показана установка периодического действия с закрытой шлюзовой системой, отличающаяся от установки с одной шлюзовой камерой исполнением транспортирующего устройства и шлюзовых затворов, объединенных общим приводом.





**Рис. 8.37. Установка периодического действия с закрытой шлюзовой системой во время загрузки и выгрузки изделий (а) и нанесения покрытия (б):**

1 – рабочая камера; 2 – шлюзовая загрузочно-выгрузочная камера; 3 – крышка шлюзовой камеры; 4 – привод транспортирующего устройства и затворов; 5 – держатель изделий; 6 – откачной патрубков шлюзовой камеры; 7 – испаритель; 8 – откачной патрубков рабочей камеры; 9 – привод вращения держателя изделий

Установка оснащена плоским держателем 5 изделий, который вращается в зоне покрытия, что способствует равномерному нанесению пленки. В рабочей камере 1 поддерживают постоянное рабочее давление и готовность к работе источника нанесения покрытия. Шлюзовая камера 2 периодически сообщается с атмосферой для загрузки и выгрузки изделий. Транспортирующее устройство переносит держатель изделий из шлюзовой камеры в рабочую и обратно. Однако установка может обеспечить лишь периодическую обработку изделий и не совмещает рабочие и вспомогательные операции.

Достоинствами установки периодического действия являются малое изменение характеристик газовой среды в рабочей камере и быстрый запуск источника нанесения покрытия. Повысить произво-

дительность подобных установок можно, увеличив число одновременно обрабатываемых изделий.

Чтобы улучшить производительность установки периодического действия со шлюзовой системой, сокращают время откачки шлюзовых камер, уменьшают объемы этих камер, оснащают их высокопроизводительными откачными средствами. Кроме того, увеличивают число загружаемых изделий, используя групповые носители и магазинные устройства, а также совмещают вспомогательные рабочие операции с основными, обрабатывая изделия на нескольких позициях, и ускоряют охлаждение изделий в шлюзовой камере напуском инертного газа.

**Шлюзовые системы в установках полунепрерывного действия.** В вакуумном оборудовании применяют различные

установки полунепрерывного действия, в которых так же, как и в установках периодического действия, используют одну шлюзовую камеру. Для частичного совмещения рабочих и вспомогательных операций в шлюзовой камере размещают два и более держателя изделий. Например, в установке, приведенной на рис. 8.38, *а*, в шлюзовой камере 2 можно разместить два групповых держателя 3 изделий. Одновременно с нанесением покрытия в рабочей камере 7 в шлюзовой обезгаживают нагревателем 8 другой держатель изделий.

Перед выгрузкой держателя изделий из рабочей камеры обезгаженный держатель снимают с транспортирующих роликов 1 подъемным устройством 4, установленным на съемной крышке 5 шлюзовой камеры 2, освобождая место для транспортирования держателя изделий из рабочей камеры. Далее обезгаженный держатель опускают на ролики 1, транспорти-

руют в рабочую камеру 7 и закрывают затвор 6.

Одновременно с нанесением покрытия в рабочей камере из шлюзовой выгружают держатель с нанесенным покрытием и затем загружают и обезгаживают необработанный держатель изделий. Если время загрузки и выгрузки держателей, откачки шлюзовой камеры и предварительной обработки будет меньше или равно времени нанесения покрытия в рабочей камере, производительность установки значительно повышается. Недостаток установки заключается в том, что из-за большого объема шлюзовой камеры увеличивается непроизводительное время ее вакуумирования.

Увеличения производительности установок достигают совмещением операций, т.е. одновременным выполнением рабочих и вспомогательных операций на нескольких позициях в рабочих и шлюзовых камерах.

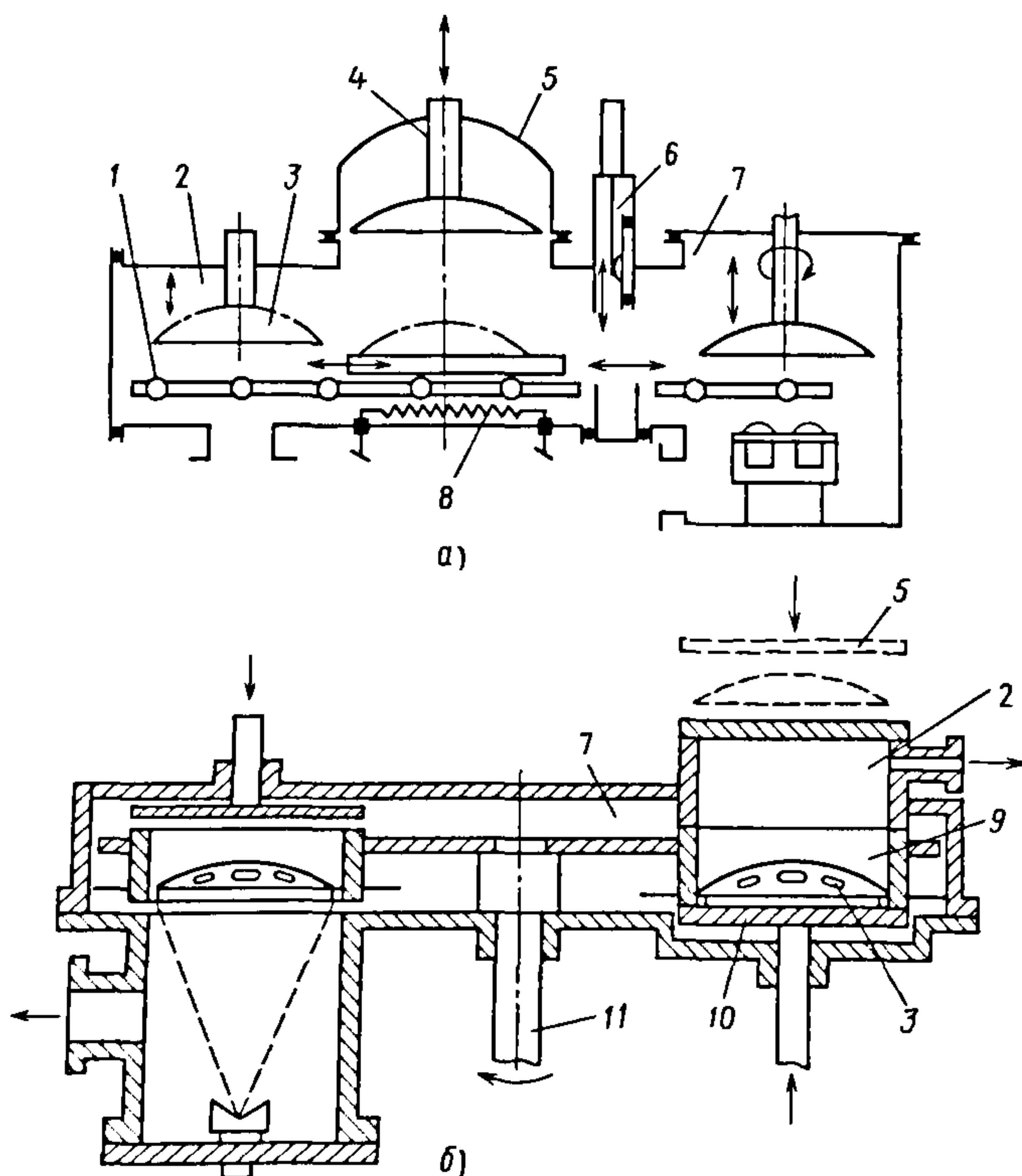
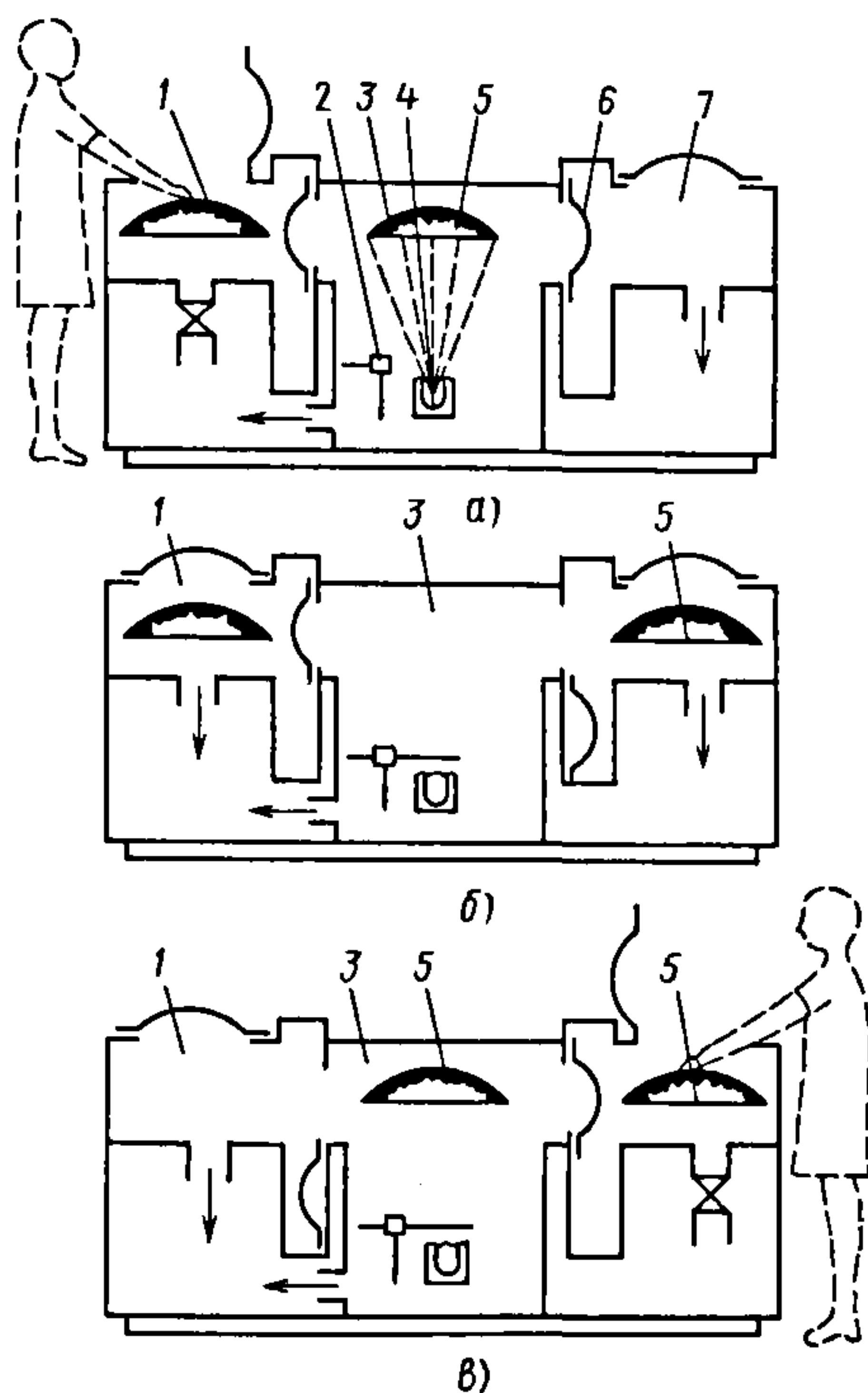


Рис. 8.38. Установка полунепрерывного действия с закрытой шлюзовой системой:  
*а* — с двумя групповыми держателями в шлюзовой камере;  
*б* — с одним групповым держателем в шлюзовой камере;  
 1 — транспортирующие ролики; 2 — шлюзовая камера;  
 3 — держатель изделий; 4 — подъемное устройство;  
 5 — съемная крышка; 6 — затвор; 7 — рабочая камера;  
 8 — нагреватель; 9 — цилиндр;  
 10 — подвижная плита;  
 11 — транспортирующее устройство (карусель)

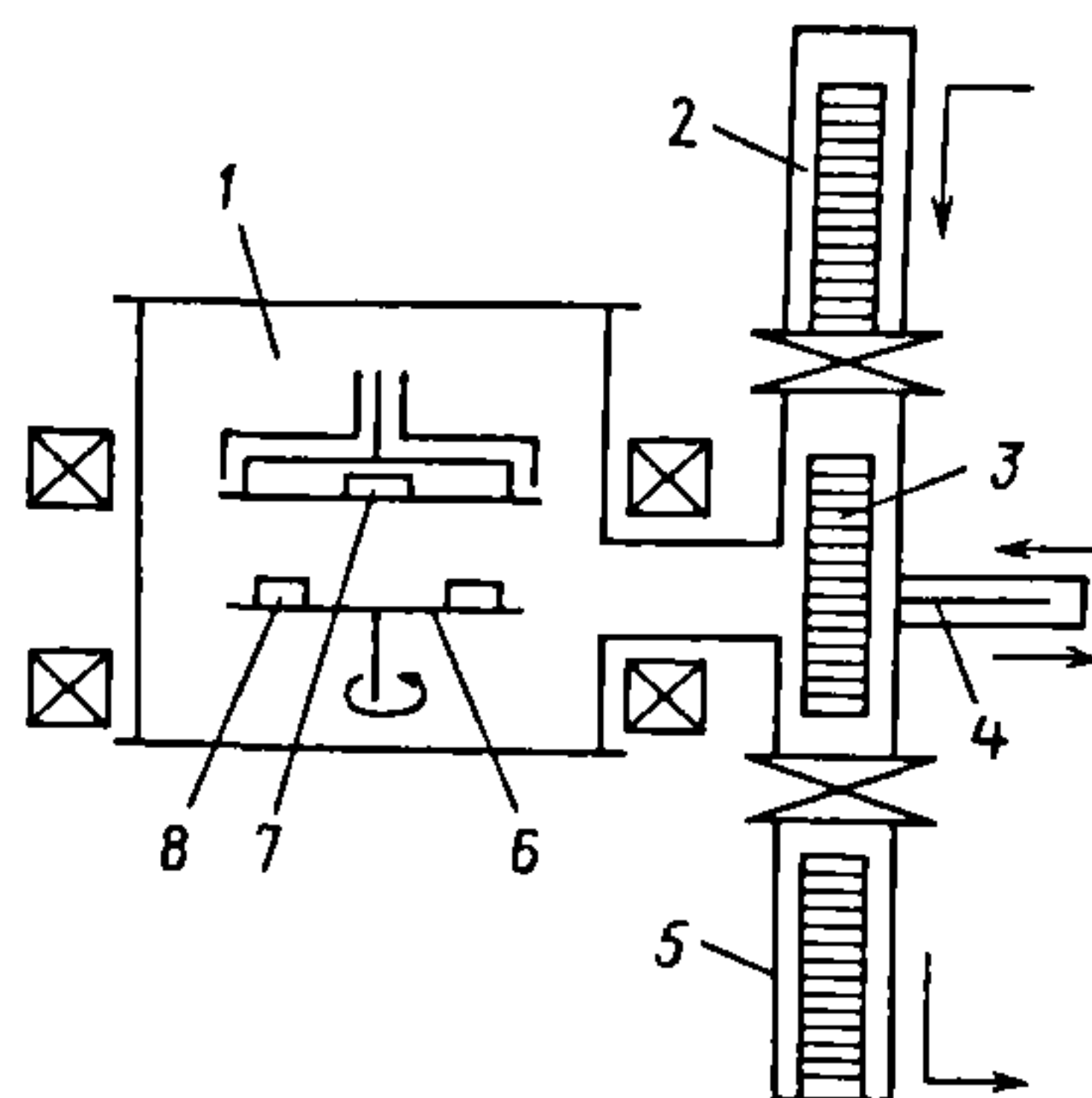


На рис. 8.39 приведена схема установки полунепрерывного действия, состоящая из одной рабочей и двух шлюзовых камер, одну из которых используют для загрузки групповых держателей, а другую — для выгрузки. В загрузочной шлюзовой камере 1, кроме того, проводят нагрев изделий, а в выгрузочной 7 — охлаждение. Нанесение покрытия прерывают лишь во время транспортирования изделий из загрузочной шлюзовой камеры в рабочую 3 и из рабочей — в шлюзовую камеру выгрузки 7.



**Рис. 8.39.** Установка полунепрерывного действия линейной компоновки с двумя шлюзовыми камерами:

а — загрузка изделий и нанесение покрытия; б — откачка загрузочной шлюзовой камеры и перемещение обработанных изделий; в — перемещение необработанных и выгрузка обработанных изделий; 1 — шлюзовая камера загрузки; 2 — заслонка; 3 — рабочая камера; 4 — источник нанесения покрытия; 5 — держатель изделий; 6 — затвор; 7 — шлюзовая камера выгрузки



**Рис. 8.40.** Установка непрерывного действия с закрытой шлюзовой системой:

1 — рабочая камера; 2, 5 — соответственно загрузочная и выгрузочная шлюзовые камеры; 3 — магазин держателей изделий; 4 — возвратно-поступательный механизм; 6 — карусель; 7 — источник нанесения покрытия; 8 — держатель изделия

Повышению производительности установок полунепрерывного действия способствует дифференцирование операций, а также использование нескольких шлюзовых загрузочно-выгрузочных камер и разделение процессов загрузки-выгрузки изделий на отдельные шлюзовые камеры. В таких установках наибольшее применение нашли закрытые шлюзовые системы.

**Шлюзовые системы в установках непрерывного действия.** В установках непрерывного действия, как и в перечисленных выше, применяют различные шлюзовые системы.

В закрытой шлюзовой квазинепрерывной системе (рис. 8.40) имеются шлюзовые камеры загрузки 2 и выгрузки 5. Первый магазин 3 с держателями изделий загружают сначала в шлюзовую камеру загрузки 2. После откачки этой камеры магазин перемещают в рабочую камеру 1, последовательно перемещая держатели 8 изделий к источнику 7 нанесения покрытия возвратно-поступательным механизмом 4. На карусели 6 одновременно можно обрабатывать несколько изделий.

После заполнения изделиями всех позиций на карусели при каждом ходе возвратно-поступательного механизма 4

необработанное изделие из магазина перемещается на карусель 6, а обработанное возвращается в ячейку магазина.

При выходе первого магазина из загрузочной шлюзовой камеры 2 ее герметизируют от рабочей камеры, напускают воздух, загружают второй магазин с необработанными изделиями и откачивают. Одновременно первый магазин из рабочей камеры постепенно перемещают в шлюзовую камеру выгрузки 5. После откачки загрузочной шлюзовой камеры 2 второй магазин перемещают в рабочую камеру до совмещения с первым. Обработав все изделия в первом магазине, его выгружают через шлюзовую камеру выгрузки 5.

Таким образом обеспечивают постоянный ритм загрузки и выгрузки изделий на карусель 6.

Для нанесения покрытия в вакууме применяют открытые и полуоткрытые шлюзовые системы с транспортным каналом для перемещения изделий, который проходит через несколько рабочих и шлюзовых камер, соединенных между собой и с атмосферой межкамерными каналами.

Зазоры между каналами и элементами транспортирующего устройства обеспечивают свободное движение и создают сопротивление натеканию воздуха из атмосферы. Каждая камера снабжена средством откачки воздуха, поступающего через зазоры. Таким образом, давление в шлюзовых камерах снижается ступенчато.

В установке непрерывного действия (рис. 3.1.23) для нанесения покрытия на

плоские изделия девять шлюзовых и две рабочие камеры соединены между собой и атмосферой каналами, в которых находится одновременно 45 держателей изделий. Зазоры между стенками каналов и держателями изделий составляют сотые доли миллиметра.

Четыре шлюзовые камеры на входе и четыре на выходе обеспечивают откачку рабочих камер до давления  $<7 \cdot 10^{-4}$  Па, при этом в крайних шлюзовых камерах поддерживается давление  $5 \cdot 10^2$  Па. Вакуумная система рабочих и шлюзовых камер состоит из диффузионных паромасляных и механических насосов. В средней шлюзовой (буферной) камере 4, предназначенной для устранения взаимного влияния газовых сред двух рабочих камер, поддерживают более высокий вакуум.

Шлюзовые камеры 2 используют для предварительного нагрева изделий. В рабочих камерах 3 и 5 наносят покрытия сначала на нижнюю, а затем на верхнюю поверхность изделий. Через камеры 6 изделия выгружают, одновременно охлаждая их. Концевые отсеки на входе и выходе установки закрыты скафандрами с очищенным от пыли воздухом.

В установке квазинепрерывного действия (рис. 8.42) загрузку изделий осуществляют транспортирующим устройством (ротором), имеющим один паз для размещения изделия. Откачивают шлюзовое загрузочное устройство 1 форвакуумным насосом. Внутри установки имеется замкнутый гибкий конвейер 5, который транспортирует изделия.

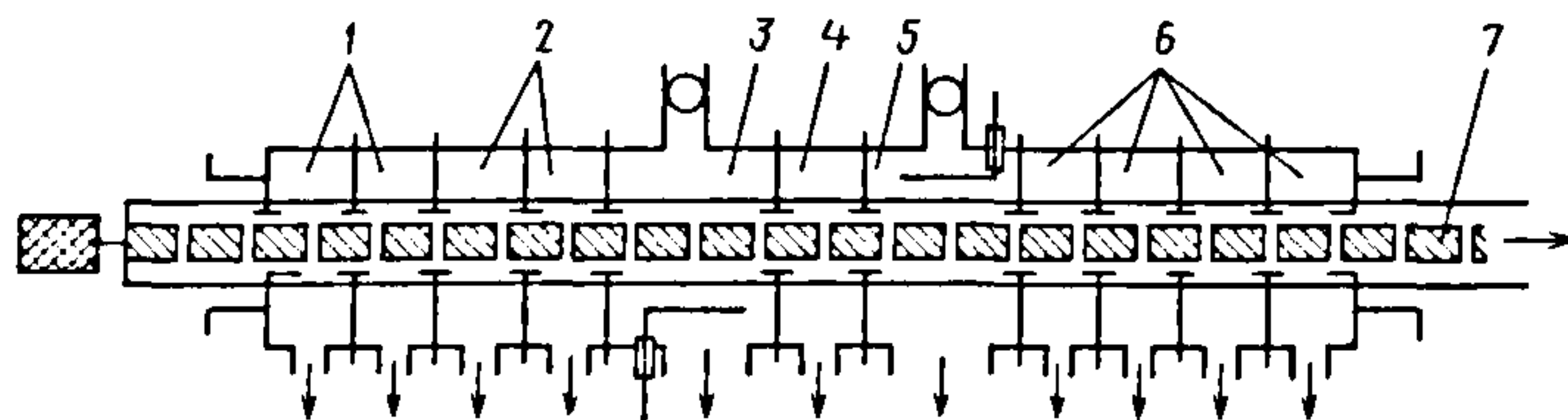


Рис. 8.41. Установка непрерывного действия с открытыми шлюзовыми системами и транспортирующим устройством:

1, 2 — шлюзовые загрузочные камеры; 3, 5 — рабочие камеры; 4 — высоковакуумная шлюзовая камера; 6 — шлюзовые выгрузочные камеры; 7 — держатель изделий



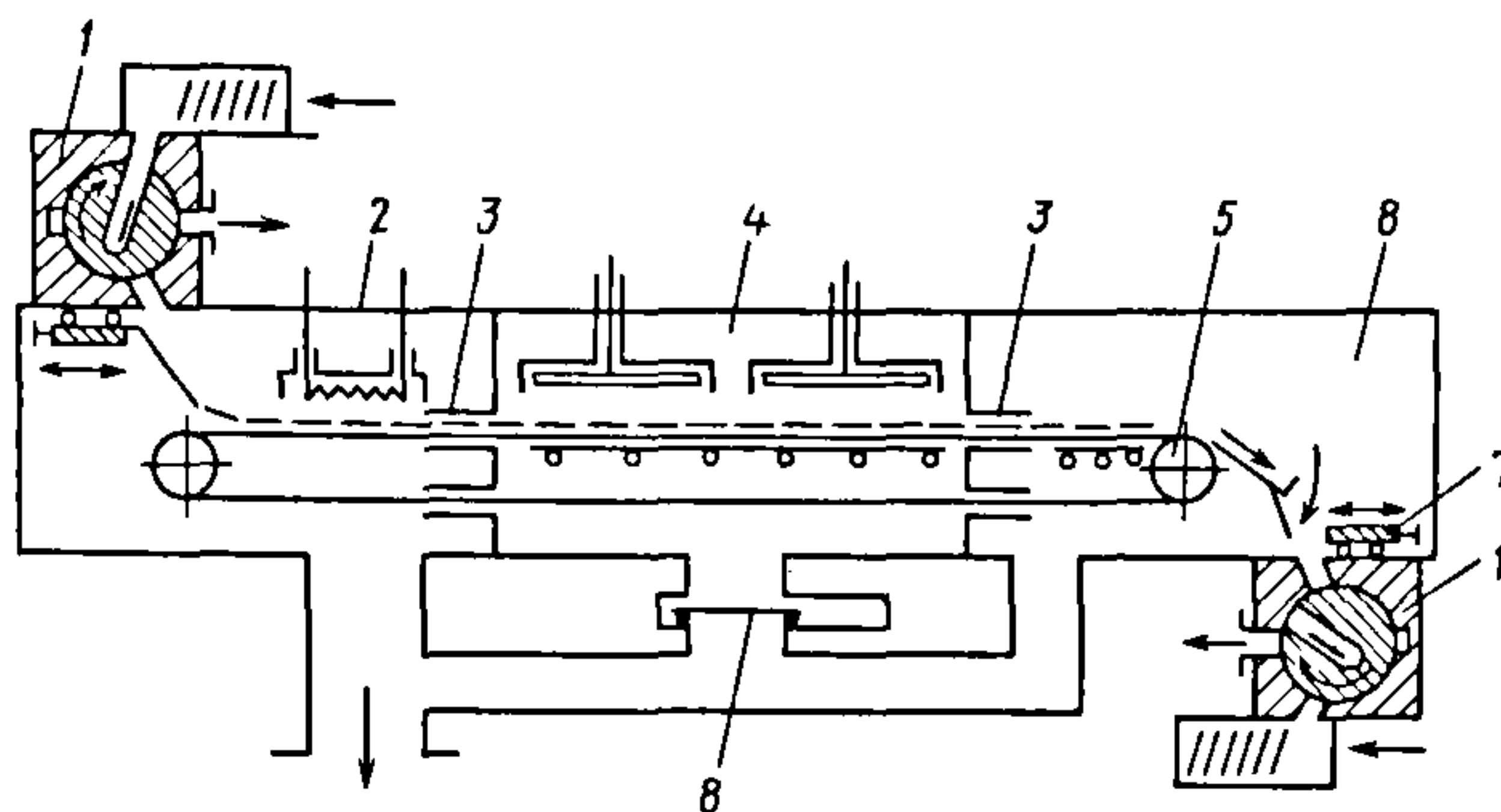


Рис. 8.42. Установка непрерывного действия со шлюзовыми загрузочными устройствами:

1 – шлюзовое загрузочное устройство; 2 – высоковакуумная шлюзовая камера нагрева;  
3 – межкамерные каналы; 4 – рабочая камера; 5 – конвейер; 6 – высоковакуумная шлюзовая  
камера охлаждения; 7, 8 – затворы

Рабочая 4 и высоковакуумные шлюзовые камеры 2 и 6 разделены между собой перегородками с каналами для прохождения конвейера. Между камерами установки и в шлюзовых устройствах применена открытая шлюзовая система. При работе установки осуществляют непрерывную высоковакуумную откачку шлюзовых камер нагрева 2 и охлаждения 6. Для высоковакуумной откачки рабочей камеры 4 открывают затвор 8.

Для нанесения пленок в рабочей камере 4 закрывают затвор 8, устанавливают давление 1,3 Па и откачивают поток газа через зазоры между конвейером 5 и каналами 3. Таким образом в шлюзовых камерах 2 и 6 поддерживают более высокий вакуум, чем в рабочей 4, что уменьшает загрязнение ее газовой среды. При изменении скорости конвейера и режима работы устройства нанесения покрытия изменяются толщина пленки и производительность установки.

В подобных установках со шлюзовыми загрузочными устройствами используют открытые и комбинированные шлюзовые системы. Шлюзовые устройства такого типа применяют для разделения между собой рабочих и шлюзовых камер, что позволяет поддерживать значительный перепад давления между камерами и уменьшать взаимное влияние их газовых сред.

Шлюзовые загрузочные устройства компактны, конструктивно просты, позволяют сохранять качество рабочей поверхности изделия. Кроме того, в таких устройствах не применяют держатели. Увеличивая число вакуумных камер в шлюзовых устройствах, создают большой перепад давления между атмосферой и рабочей камерой. Чем меньше объем загрузочной полости в шлюзовом устройстве, тем меньше времени затрачивают на откачку газовой среды и меньше вносят загрязнений в газовую среду рабочей камеры.

## 8.6. ГИБКИЕ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ ЗВЕНЬЯ

Гибкие вакуумно-плотные элементы используют для компенсации погрешностей изготовления и температурных деформаций вакуумных трубопроводов, облегчения их сборки и защиты установок от вибраций механических насосов. В вакуумной технике в качестве гибких элементов наиболее распространены резиновые диафрагмы, резиновые линзовые компенсаторы, а также металлические сильфоны.

На рис. 8.43 показано гибкое звено, в котором роль компенсатора играют резиновые мембраны 2, являющиеся одновременно уплотнительными элементами соединения. Их устанавливают между кольцами 3 и 4 и прижимают к промежуточному фланцу 1.

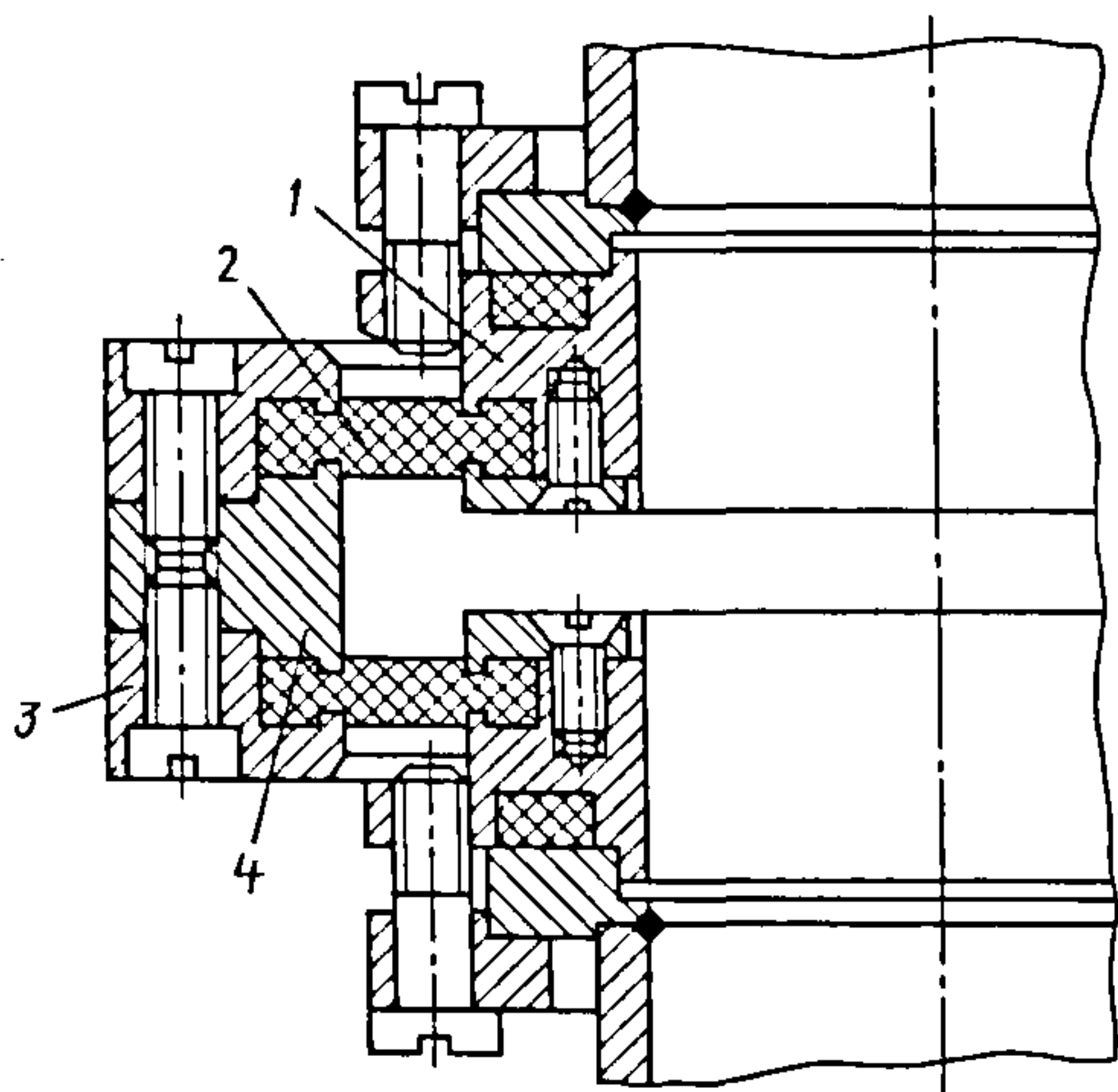


Рис. 8.43. Гибкое звено с резиновыми мембранами

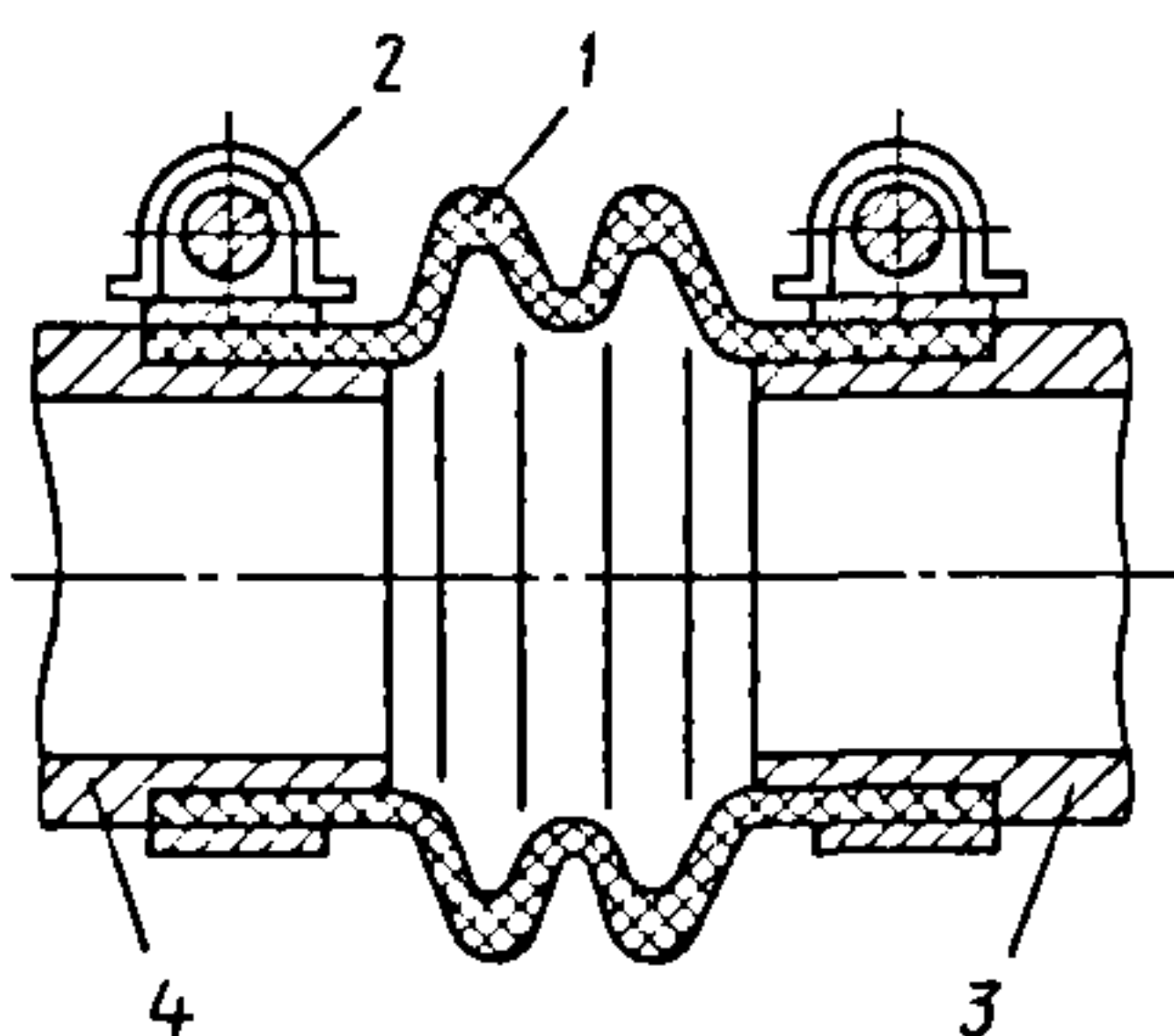


Рис. 8.44. Резиновый линзовый компенсатор

Резиновые линзовые компенсаторы (рис. 8.44) обычно размещают на форвакуумных трубопроводах. На концах соединяемых труб 3 и 4 выполняют проточки для размещения резинового компенсатора 1. Наружный диаметр проточки на 2...3 мм больше внутреннего диаметра посадочного места компенсатора. Шеро-

ховатость поверхности проточки должна соответствовать  $Rz = 10$  мкм. Концы компенсатора закрепляют на трубе стяжными хомутами 2.

В высоковакуумных, а также прогреваемых конструкциях используют сильфоны из коррозионно-стойких сталей (12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т и др.), предназначенных для работы в средах, не вызывающих коррозии материала при  $T = 73...673$  К. Эти сильфоны изготавливают в двух исполнениях: с внутренним и наружным посадочными диаметрами бортика. Основные параметры и размеры сильфонов (рис. 8.45) указаны в табл. 8.11 (исполнение 1) и 8.12 (исполнение 2).

При эксплуатации рабочий ход на сжатие сильфона должен составлять 70 %, на растяжение – 30 % максимального рабочего хода, указанного в упомянутых таблицах. Стальные сильфоны соединяют с арматурой механическим способом, аргонодуговой или электронно-лучевой сваркой. Не рекомендуется пайка высокотемпературными припоями (973...1073 К), вызывающая нарушение структуры материала и изменение физических характеристик сильфона.

На рис. 8.46 показано механическое соединение сильфона 4 с фланцем 2 с помощью разрезных колец 1, закладываемых между гофрами сильфона. Соединение уплотняют резиновым кольцом 3 круглого сечения, защемленным в бортике срезанного гофра сильфона и прижатым к фланцу 2. Внутренний диаметр разрезного кольца меньше диаметра уплотнительного кольца. Разрезное кольцо свободно входит во впадину сильфона между

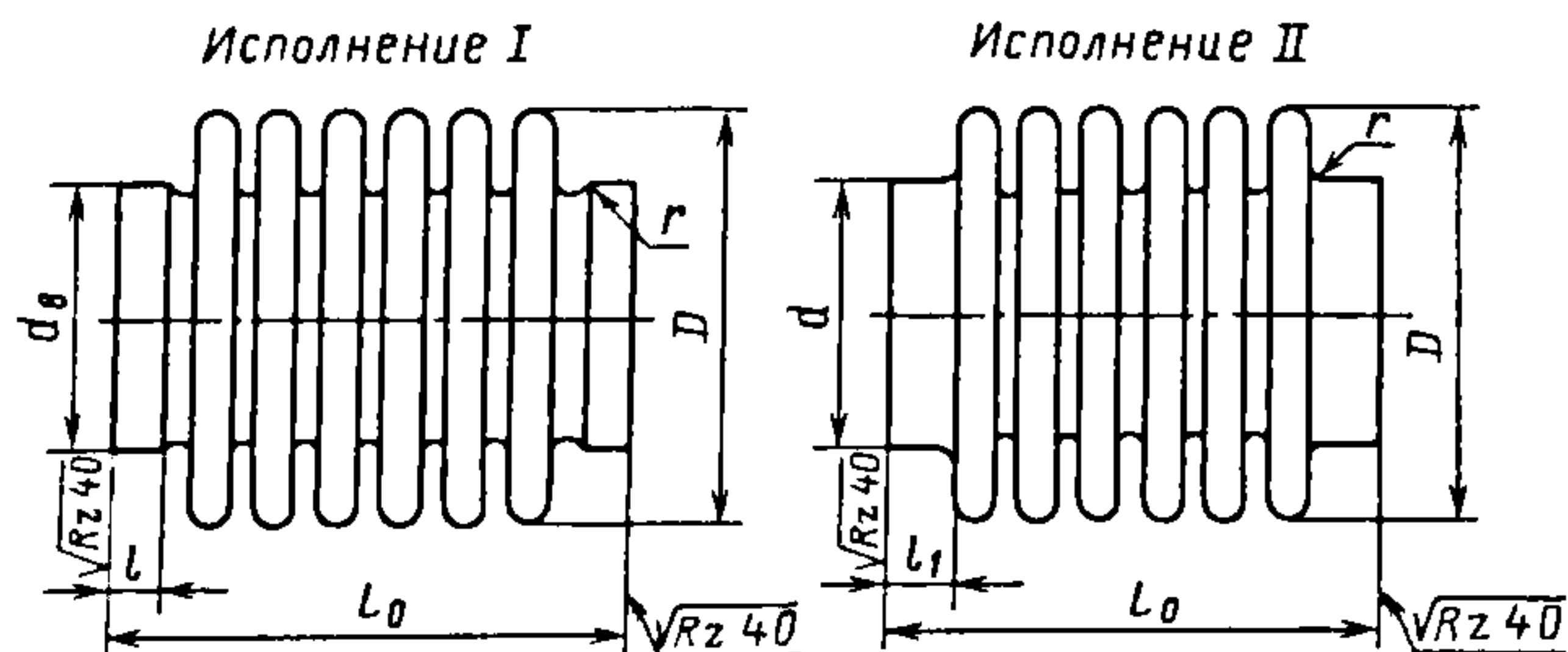


Рис. 8.45. Однослойные разделительные сильфоны



## 8.11. Параметры сильфонов (исполнение 1)

$D$	$d_b$	$L_0$ , мм (числитель – максимальный рабочий ход на сжатие, мм; знаменатель – максимальный угол изгиба, °)	$l$ , мм	Эффективная площадь, см*
мм				
$16 \pm 0,7$	$13^{+0,12}$	11,3 (0,6/0,7); 15,0 (1,1/1,3); 19,0 (1,7/2,0); 22,7 (2,2/2,6); 26,0 (2,8/3,3); 30,5 (3,4/4,0); 38,0 (4,5/5,3)	$3,5 \pm 0,3$	1,28
$18 \pm 0,7$	$14^{+0,12}$	12,2 (1,0/1,0); 16,6 (2,0/2,0); 19,0 (2,5/2,6); 19,0 (2,3/2,4); 19,0 (1,8/1,9); 20,5 (3,0/3,1); 20,5 (2,7/2,8); 20,5 (2,1/2,2); 25,4 (4,0/4,1); 30,0 (5,0/5,1); 30,0 (4,5/4,6); 47,0 (7,2/7,5); 56,5 (8,8/9,1)		1,70
$22 \pm 0,84$	$16^{+0,12}$	14,1 (1,1/1,0); 14,3 (1,0/0,9); 20,1 (2,2/2,0); 20,7 (2,0/1,8); 26,5 (3,3/2,8); 27,1 (2,6/1,9); 33,5 (3,5/2,7); 40,0 (4,4/3,2)		2,48
$28 \pm 0,84$	$20^{+0,14}$	16,0 (1,2/0,8); 22,0 (2,4/1,6); 28,7 (3,6/2,4); 35,5 (4,8/3,2); 42,0 (6,0/4,0); 48,5 (7,2/4,9)	$4,0 \pm 0,3$	4,06
$38 \pm 1,0$	$32^{+0,17}$	18,0 (1,3/0,6); 18,4 (1,5/0,7); 22,0 (2,0/1,0); 22,0 (1,8/0,9); 27,4 (3,0/1,5); 26,2 (2,6/1,3); 35,0 (3,9/1,9); 34,0 (3,6/1,8); 36,4 (4,5/2,2); 37,0 (4,2/2,4); 41,5 (4,8/2,9); 45,4 (6,0/3,0); 43,0 (5,6/2,7); 51,4 (6,5/3,2); 49,5 (6,0/3,0); 55,0 (7,5/3,7); 55,0 (7,0/3,5); 60,0 (7,8/3,8); 58,0 (7,2/3,5); 73,5 (9,6/4,7)		7,94
$40 \pm 1,0$	$35^{+0,17}$	60,0 (8,8/4,1)	$5 \pm 0,3$	9,42
$45 \pm 1,0$	$39^{+0,17}$	33,5 (5,0/2,3); 33,5 (4,8/2,0); 33,5 (4,5/1,8); 41,0 (6,0/2,4); 41,0 (6,4/2,6); 70,0 (12,0/4,8); 74,0 (12,8/5,2)		12,00
$52 \pm 1,2$	$45^{+0,17}$	25,0 (3,3/1,1); 39,0 (6,2/2,3); 52,0 (9,9/3,5); 52,0 (9,3/3,3); 75,0 (1,8/5,2); 75,0 (14,4/5,1); 88,0 (18,7/6,6)		15,80
	$38^{+0,17}$	98,0 (18,2/5,4); 99,0 (15,4/4,6)		14,40
$63 \pm 1,2$	$55^{+0,20}$	42,5 (7,2/2,1); 53,0 (8,5/2,5); 58,0 (10,8/3,1); 58,0 (9,6/2,7); 58,0 (8,1/2,3); 88,5 (18,0/5,2); 88,5 (16,0/4,6)		24,00
	$48^{+0,17}$	44,0 (7,2/2,5)		23,10
$65 \pm 1,2$	$57^{+0,20}$	36,0 (3,5/1,0)	$7 \pm 0,3$	26,10
$78 \pm 1,2$	$60^{+0,20}$	87,5 (11,8/2,8)		35,20
$125 \pm 1,6$	$104 \pm 0,46$	75,6 (7,0/1,0)	$12 \pm 0,7$	100,20
$100 \pm 1,4$	$85,5^{+0,23}$	55,5 (11,8/2,8)	$9 \pm 0,3$	65,00
$160 \pm 2,0$	$145 \pm 0,53$	42,7 (3,2/0,4); 61,9 (6,4/0,7); 81,1 (9,6/1,1); 100,3 (12,8/1,5); 119,5 (16,0/1,8); 139,0 (19,2/2,1)	$10 \pm 0,7$	165,00

Примечание. Радиус  $r = 0,5 \dots 1,0$  мм при  $D \leq 100$  мм;  $r = 2$  мм при  $D > 100$  мм.

## 8.12. Параметры сильфонов (исполнение 2)

$D$	$d$	$L_0$ , мм (числитель – максимальный рабочий ход на сжатие, мм; знаменатель – максимальный угол изгиба, °)	$l$ , мм	Эффективная площадь, см*
мм				
$29 \pm 0,7$	$22_{-0,14}$	100,0 (11,0/7,2); 168,0 (0,33/21,8)	$5 \pm 0,3$	4,71
$72 \pm 1,2$	$56_{-0,20}$	28,5 (4,0/0,8)	$6 \pm 0,3$	32,00
$78 \pm 1,2$	$60_{-0,20}$	30,0 (3,5/0,8); 56,5 (9,2/2,1); 67,5 (11,5/2,7); 51,0 (7,7/1,8); 67,5 (1,0/2,6); 78,5 (13,2/3,1)	$7 \pm 0,3$	37,20
$92 \pm 1,4$	$76_{-0,20}$	78,0 (11,0/2,2)		55,0
$100 \pm 1,4$		49,0 (8,0/1,5); 56,0 (9,6/1,7); 63,0 (11,2/2,0); 70,0 (12,8/2,3); 78,0 (13,5/2,5); 65,0 (13,5/2,5); 78,0 (14,4/2,6); 78,0 (14,0/2,5); 93,0 (17,6/3,2); 88,0 (20,8/5,1); 107,0 (20,8/5,1); 107,0 (20,1/3,8); 107,0 (20,0/3,6)		60,0
$126 \pm 1,6$	$96 \pm 0,46$	63,0 (5,9/1,8); 114,0 (13,0/1,8)	$12 \pm 0,7$	96,8
$145 \pm 1,6$	$116 \pm 0,46$	104,0 (10,0/1,2)		132,6
		119,0 (12,0/1,6)	$7 \pm 0,7$	
$157 \pm 2,0$	$127 \pm 0,53$	123,0 (14,8/1,6); 72,0 (7,3/0,8); 123,0 (14,8/1,6)	$12 \pm 0,7$	158,3
		127,0 (12,0/1,3)	$10 \pm 0,7$	
$160 \pm 2,0$	$130 \pm 0,53$	140,0 (24,7/2,7)	$12 \pm 0,7$	165,0
$165 \pm 2,5$	$138 \pm 0,53$	73,0 (9,5/0,9); 99,0 (15,2/1,6)		180,2
		110,0 (17,5/1,8)	$10 \pm 0,7$	
180	$160 \pm 0,53$	106,0 (18,3/1,7); 123,0 (22,0/2,1)	$12 \pm 0,7$	212,4
$190 \pm 2,9$	$150 \pm 0,53$	131,5 (13,7/1,2); 164,0 (21,0/1,9)	$16 \pm 0,7$	227,0
	$180,4 \pm 0,60$	78,0 (13,5/1,2)	$8 \pm 0,7$	227,5

Примечание. См. табл. 8.11.

гофрами. Толщина выступа  $a = 2d/3$  (где  $d$  – диаметр уплотнительного резинового кольца 3), толщина  $b$  выступа разрезного кольца и высота бортика сильфона должны обеспечивать необходимое сжатие уплотнительного кольца при полной затяжке винтов, крепящих разрезное кольцо к фланцу.

Гибкое звено с монтажно-поворотным фланцем представляет собой металлический сильфон 1, приваренный к фланцам 2 (рис. 8.47). Поворотный фланец 4, удерживаемый на фланце 2 проволочным кольцом 3, при монтаже системы можно поворачивать на любой угол. Сильфоны изготавливают из коррозионно-



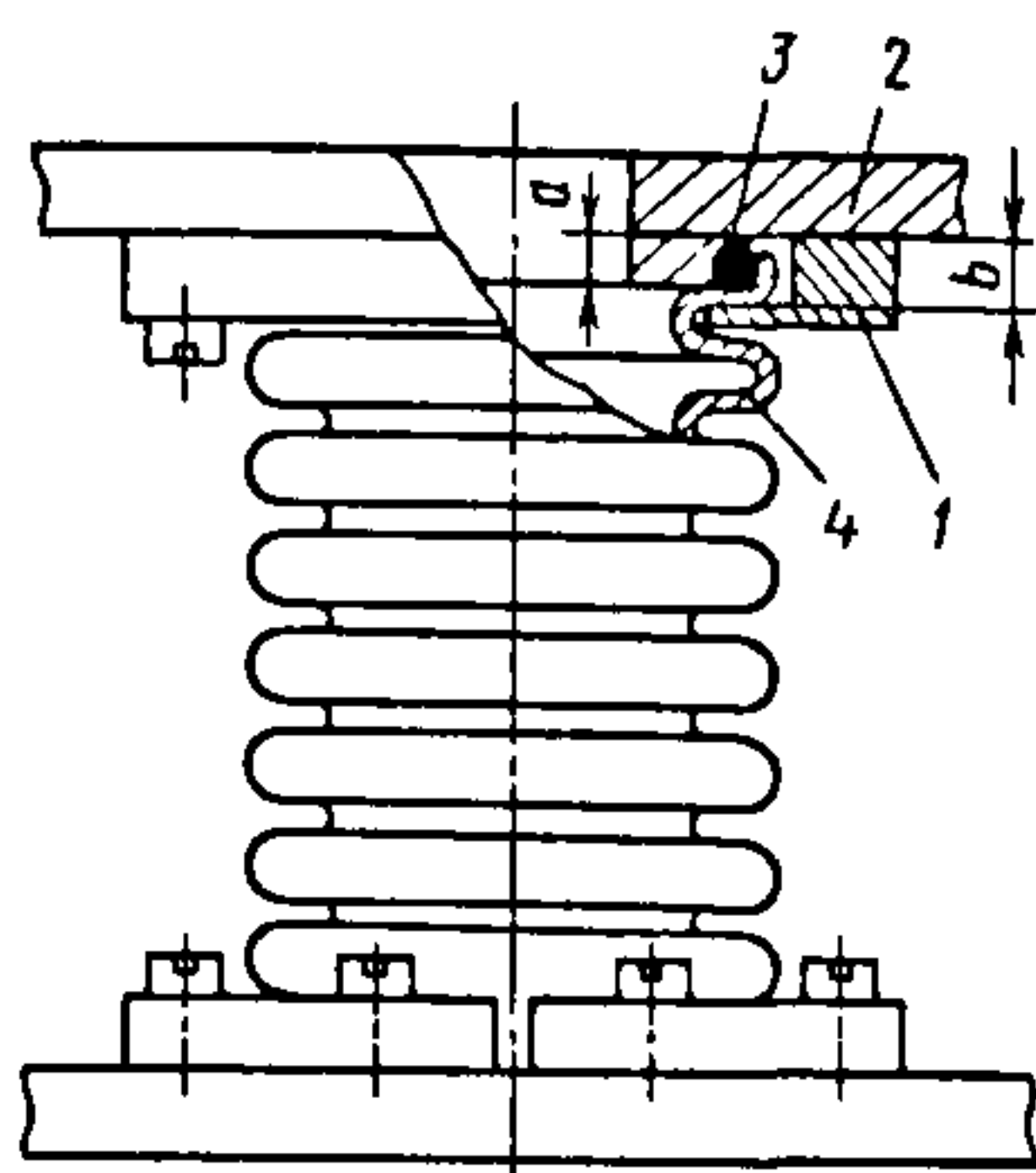


Рис. 8.46. Вариант механического соединения сильфонов

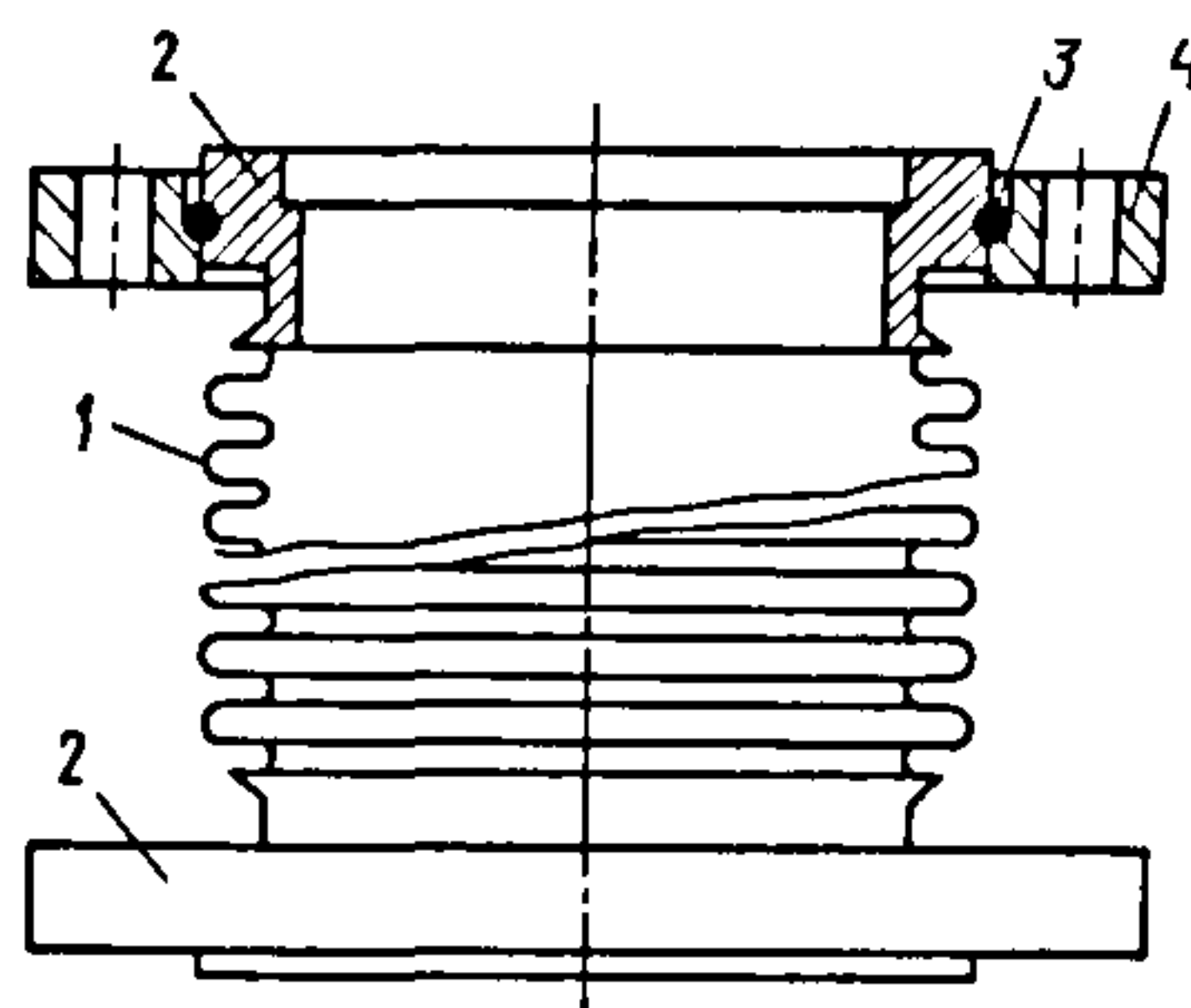


Рис. 8.47. Гибкое звено с монтажно-поворотным фланцем

стойкой стали, фланцы уплотняют медными или алюминиевыми прокладками.

В специальных случаях применяют сварные сильфоны, изготавливаемые штамповкой мембран 1 из листового материала с последующей их сваркой по внутреннему  $a$  и наружному  $b$  контурам (рис. 8.48). Поскольку при изготовлении сварных сильфонов материал не претерпевает больших пластических деформаций, выбор материала ограничен лишь эксплуатационными требованиями. Используют аустенитные коррозионно-стойкие стали, сплавы на основе хрома и никеля, титановые сплавы. Сварные сильфоны изготавливают из листов толщиной 0,05...1,00 мм.

Мембраны сильфона выполняют разнообразных конфигураций и ширины, что позволяет в широких пределах изменять их осевое перемещение и жесткость. Существенный недостаток сварных силь-

фонов – большое число сварных соединений, требующих тщательного контроля на герметичность.

## 8.7. ЗАГЛУШКИ

Для расширения технологических и диагностических возможностей установок в рабочих камерах предусматривают запасные отверстия, которые на заводе-изготовителе герметизируют заглушками или глухими фланцами. Через эти отверстия при необходимости можно монтировать механические и электрические вводы, смотровые окна, загрузочные устройства и др. При изготовлении заглушек используют коррозионно-стойкую или углеродистую сталь, алюминиевые сплавы.

Заглушка с уплотняющей гайкой, расположенной со стороны атмосферы, и уплотняющей прокладкой показана на рис. 8.49, *а*, подобная конструкция, уплотняемаяжимным барашком, – на рис. 8.49, *б*. Часто в качестве заглушек применяют глухие фланцы (рис. 8.49, *в*). Они могут быть доработаны потребителем и приспособлены для вводов, а также подсоединения вакуумметров. Заглушка грибкового вида показана на рис. 8.49, *г*.

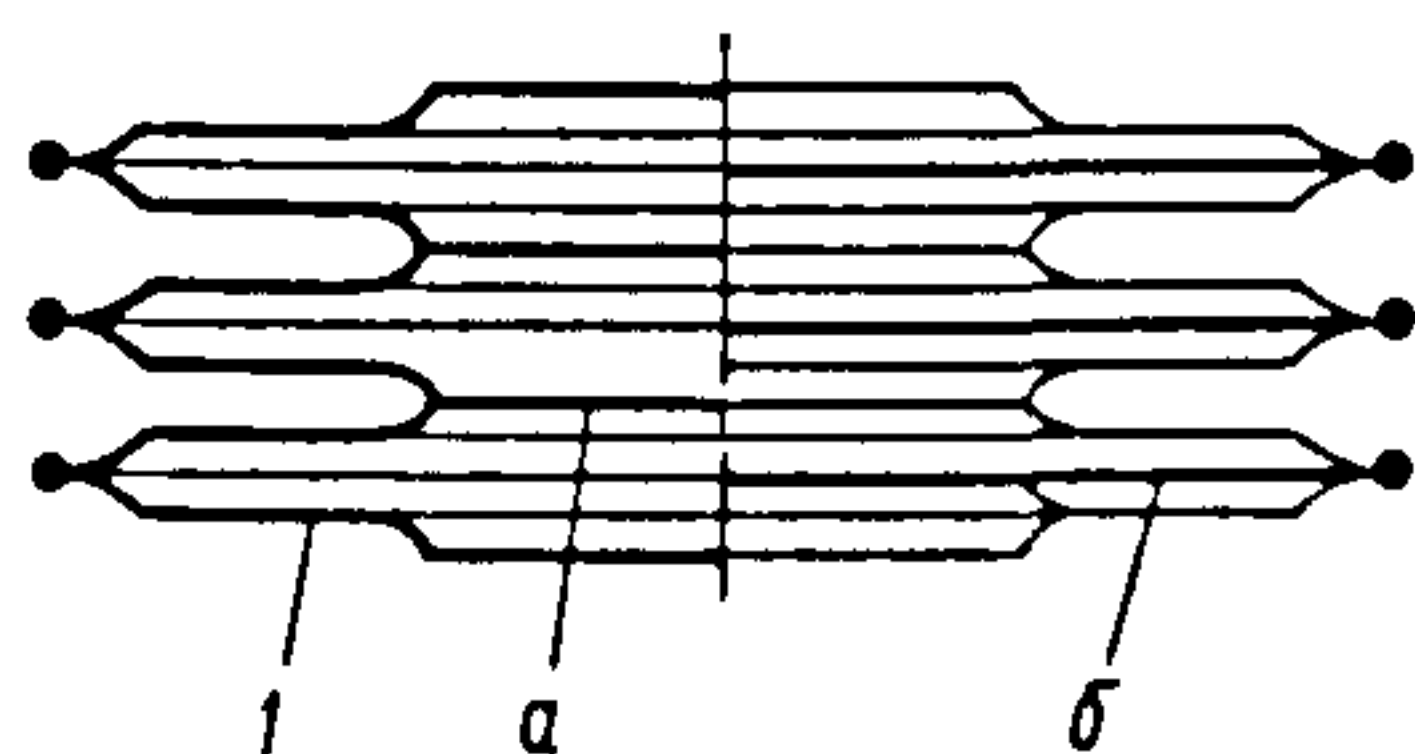


Рис. 8.48. Сварной сильфон

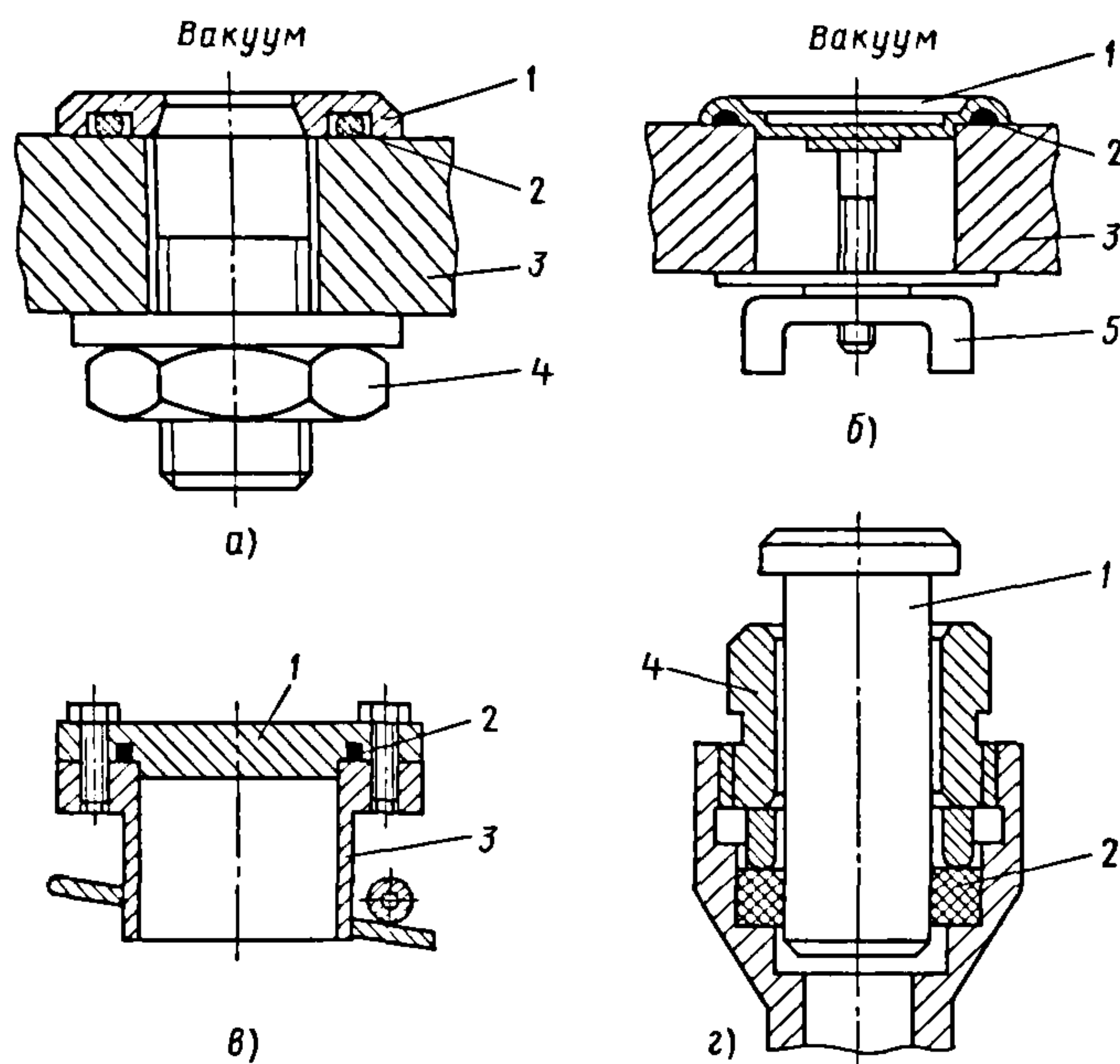


Рис. 8.49. Заглушки:  
1 – заглушка; 2 – прокладка;  
3 – стенка камеры; 4 – зажим-  
ная гайка; 5 – зажимный  
барашек

### 8.8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ И КОМПОНОВКА ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПРИВНОСИМОЙ ДЕФЕКТНОСТИ

Теория формирования и распределения потоков микродисперсных частиц (МДЧ) в вакууме дает представление о различном характере поведения пылевидных микрочастиц при атмосферном давлении, при переходе от атмосферного давления к вакууму и при высоком вакууме, определяет граничные условия действия на МДЧ аэродинамических сил при откачке и напуске газа, а также молекулярного воздействия остаточных газов. Основные положения теории заключаются в следующем.

1. По своей физической сущности потоки микрочастиц делятся на *первичные* и *вторичные*. Первичные потоки образуются из монолитных материалов и сплошных пленок, характер их взаимодействия с остаточной средой определяется случайными столкновениями с молеку-

лами газа. Вторичные потоки представляют собой оторванные от внутрикамерных поверхностей первичные частицы, перемещающиеся вместе с потоком откачиваемого или напускаемого газа при аэродинамическом характере взаимодействия.

2. Формирование привносимой дефектности в результате действия первичных потоков можно разбить на три стадии (рис. 8.50): генерацию микрочастиц, их перемещение от источника до изделия и осаждение на его поверхность. Генерация МДЧ является случайным процессом с соответствующими законами распределения числа частиц и их размеров, направления и скорости вылета, электрического заряда и магнитного момента.

При перемещении в высоком вакууме частица испытывает сопротивление среды, действие которой направлено противоположно движению частицы; сила воздействия меняется во времени, и на нее влияет давление среды. Осаждение на подложку зависит от электрического заряда или магнитного момента МДЧ и потенциала подложки, а также от силы упругости, возникающей при столкновении микрочастицы с подложкой.



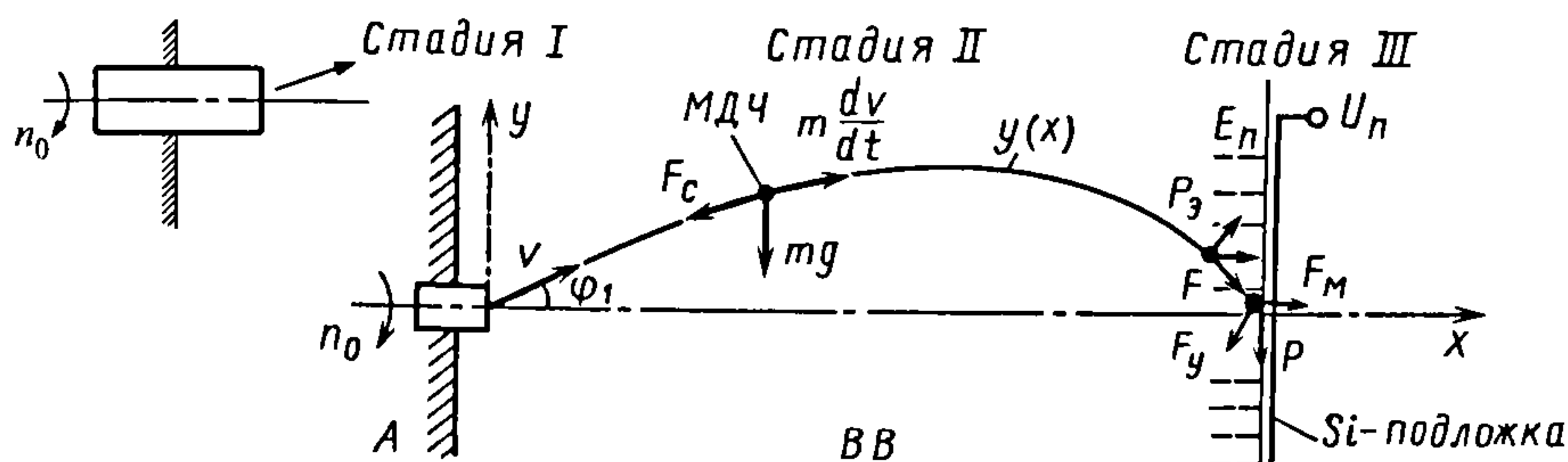


Рис. 8.50. Схема формирования привносимой дефектности в результате действия первичных потоков МДЧ:

$m$  – масса частицы;  $v$  – скорость частицы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_c$  – сила сопротивления среды;  $y(x)$  – траектория движения частицы;  $\varphi_1$  – угол вылета частицы;  $n_0$  – частота вращения генератора частиц;  $U_n$  – потенциал подложки;  $E_n$  – напряженность электрического поля у поверхности подложки;  $P_3$  – сила электростатического притяжения частицы;  $F_m$  – молекулярная сила притяжения частицы;  $F$  – сила удара частицы о поверхность подложки;  $F_y$  – сила упругого столкновения частицы с поверхностью подложки;  $P$  – вес частицы;  $A$  – атмосфера;  $BB$  – высокий вакуум

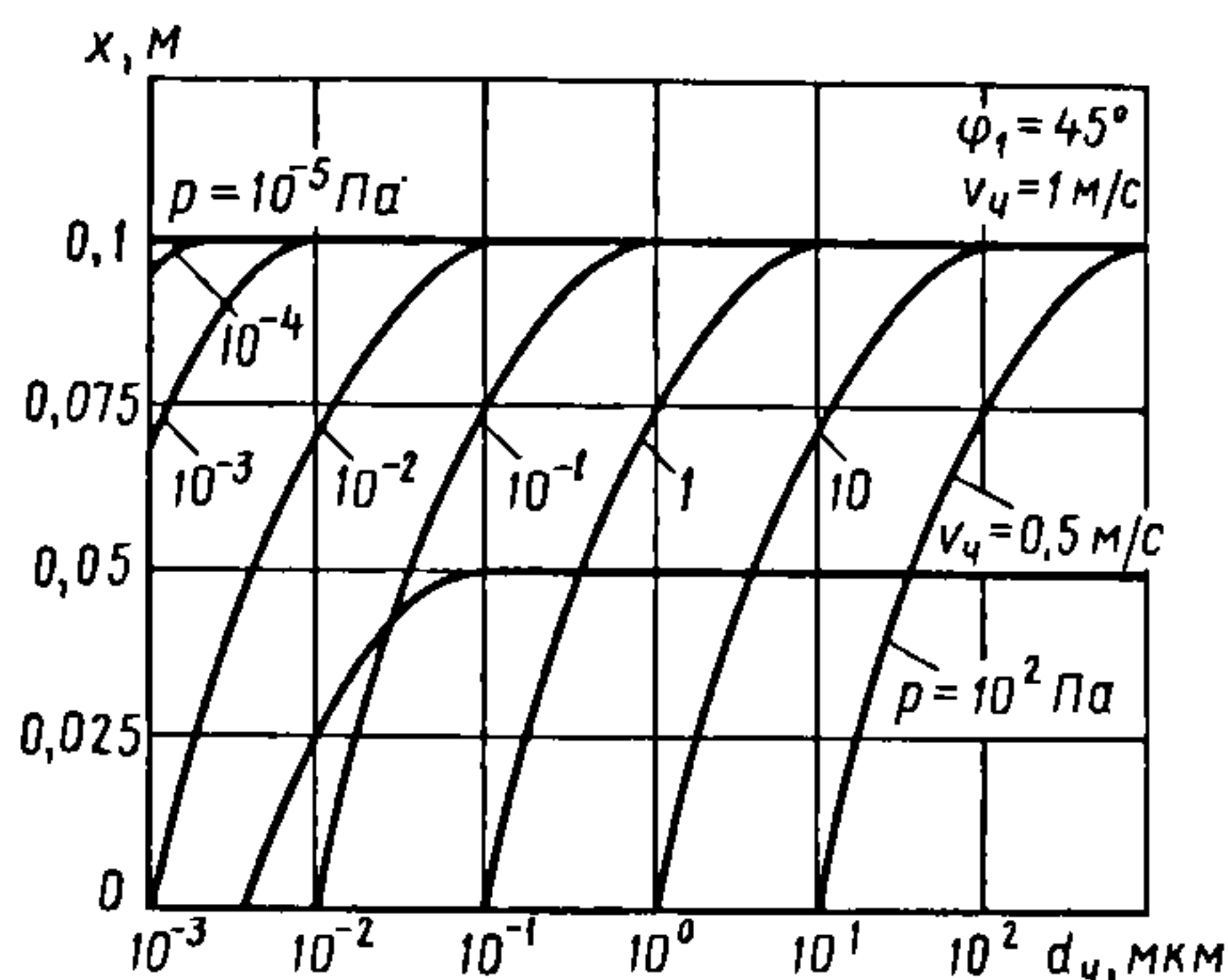


Рис. 8.51. Графики зависимости длины пролета микрочастиц в высоком вакууме от давления и размеров частицы

На рис. 8.51 в виде графика представлены результаты расчета длины  $x$  пролета микрочастиц размером  $d_q$ , генерируемых механизмом, размещенным внутри вакуумной камеры, при различных скоростях  $v_q$  вылета частиц и рабочих давлениях  $p$ .

3. Формирование привносимой дефектности в результате действия вторичных потоков МДЧ также можно разделить на три фазы (рис. 8.52, а): отрыв от поверхности, перемещение вместе с потоком газа и осаждение на подложку. На интенсивность этих явлений влияют: силы адгезионного взаимодействия микрочастиц с поверхностью твердого тела; градиент

затухания скорости движения потоков газа в вакуумной камере во время его откачки при начальном давлении, равном атмосферному; габаритные размеры, форма и размеры патрубков; эффективная быстрота откачки и др. Напуск газа с целью разгерметизации вакуумной камеры (8.52, б) оказывает большее, чем откачка, влияние на отрыв МДЧ от стенок и внутрикамерной оснастки, так как толщина пограничного слоя газа у поверхности при высоком вакууме практически равна нулю и микрочастицы не "защищены" им.

Размеры отрывающихся МДЧ ( $d_{отр}$ ) лежат в некотором диапазоне, зависящем от эффективной быстроты откачки  $S_0$  (рис. 8.53, а) или напуска  $S_n$ . С возрастанием  $S_0$  или  $S_n$  этот диапазон, а следовательно, и число отрывающихся микрочастиц  $\gamma_{отр}$  (рис. 8.53, б), увеличивается, причем нижняя граница размеров определяется условием превышения силы адгезии микрочастицы над силой лобового воздействия потока газа, а верхняя – превышения веса частицы.

Условие перемещения микрочастицы в пространстве камеры и ее удаления в вакуумную систему при откачке заключается в том, что скорость движения потока газа превышает стационарную скорость осаждения МДЧ (кривые  $d_{уд}$  и  $\gamma_{уд}$  на рис. 8.53, а, б).

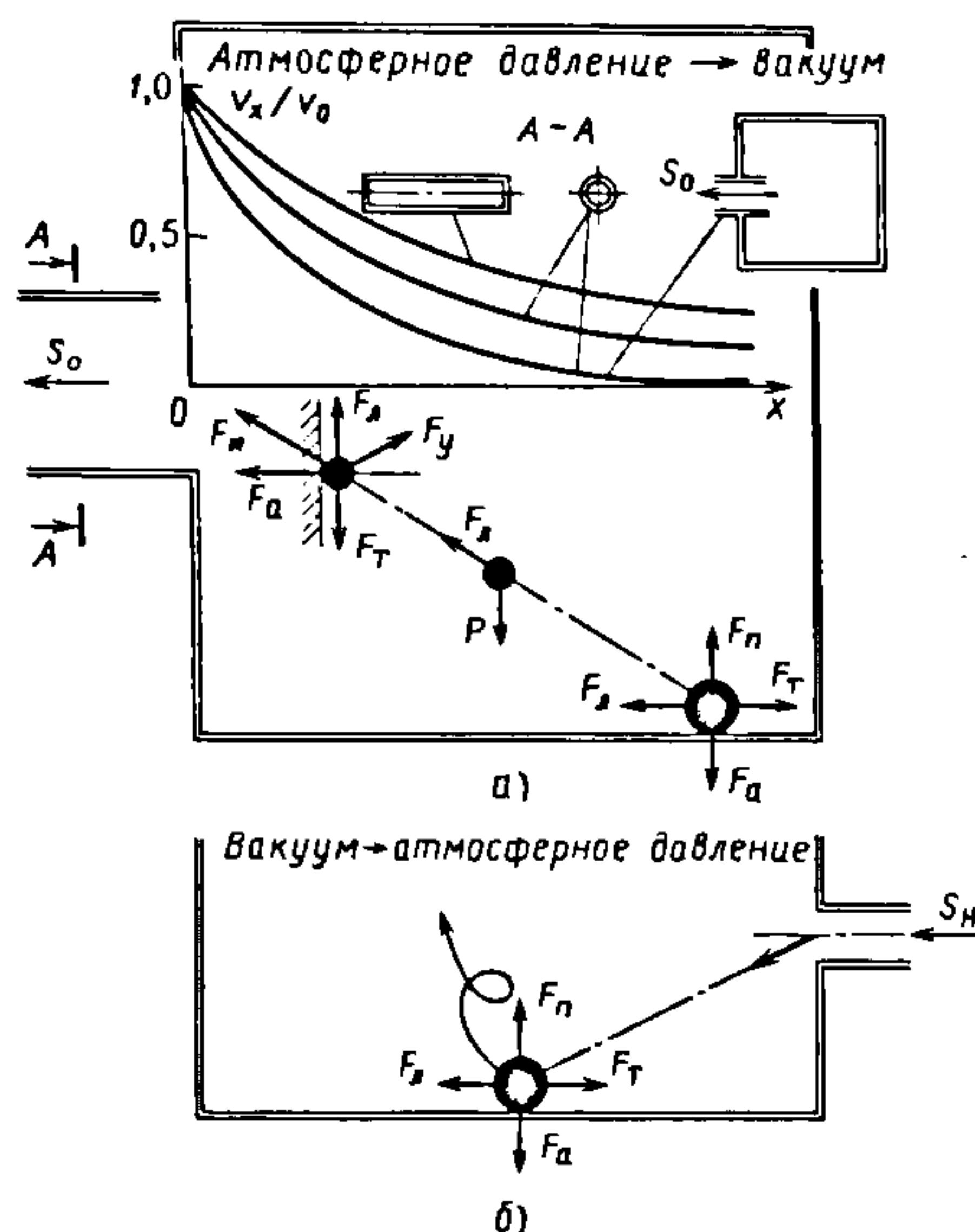


Рис. 8.52. Схема взаимодействия микрочастицы с потоком газа при откачке вакуумного объема с быстротой откачки  $S_0$  (а), при напуске газа в вакуумный объем с быстротой напуска  $S_H$  (б) и график (а) изменения отношения скоростей  $v_x/v_0$  потока газа во время его откачки при начальном давлении, равном атмосферному, при различном сечении откачного патрубка:

$v_x$  — текущее значение скорости потока газа;  
 $v_0$  — начальная скорость потока газа;  $F_a$  — сила адгезии;  $F_d$  — сила лобового сопротивления;  
 $F_T$  — сила трения;  $F_n$  — подъемная сила;  $P$  — вес частицы;  $F_y$  — сила упругого столкновения;  
 $F_{in}$  — сила инерции

Часть потока оторванных от внутрикамерных поверхностей и удаляемых с потоком газа микрочастиц, сталкиваясь с препятствием, например с полупроводниковой подложкой, может осесть на ее поверхность либо упруго отразиться. Более мелким частицам "проще" осесть на подложку, так как для них больше вероятность выполнения условия, что сила адгезии превысит силу упругости (кривая  $d_{oc}$  на рис. 8.53, а). О зависимости числа осаждающихся на препятствие микрочастиц от эффективной быстроты откачки однозначно судить нельзя, так как эта зависимость имеет экстремум (кривая  $\gamma_{oc}$  на рис. 8.53, б).

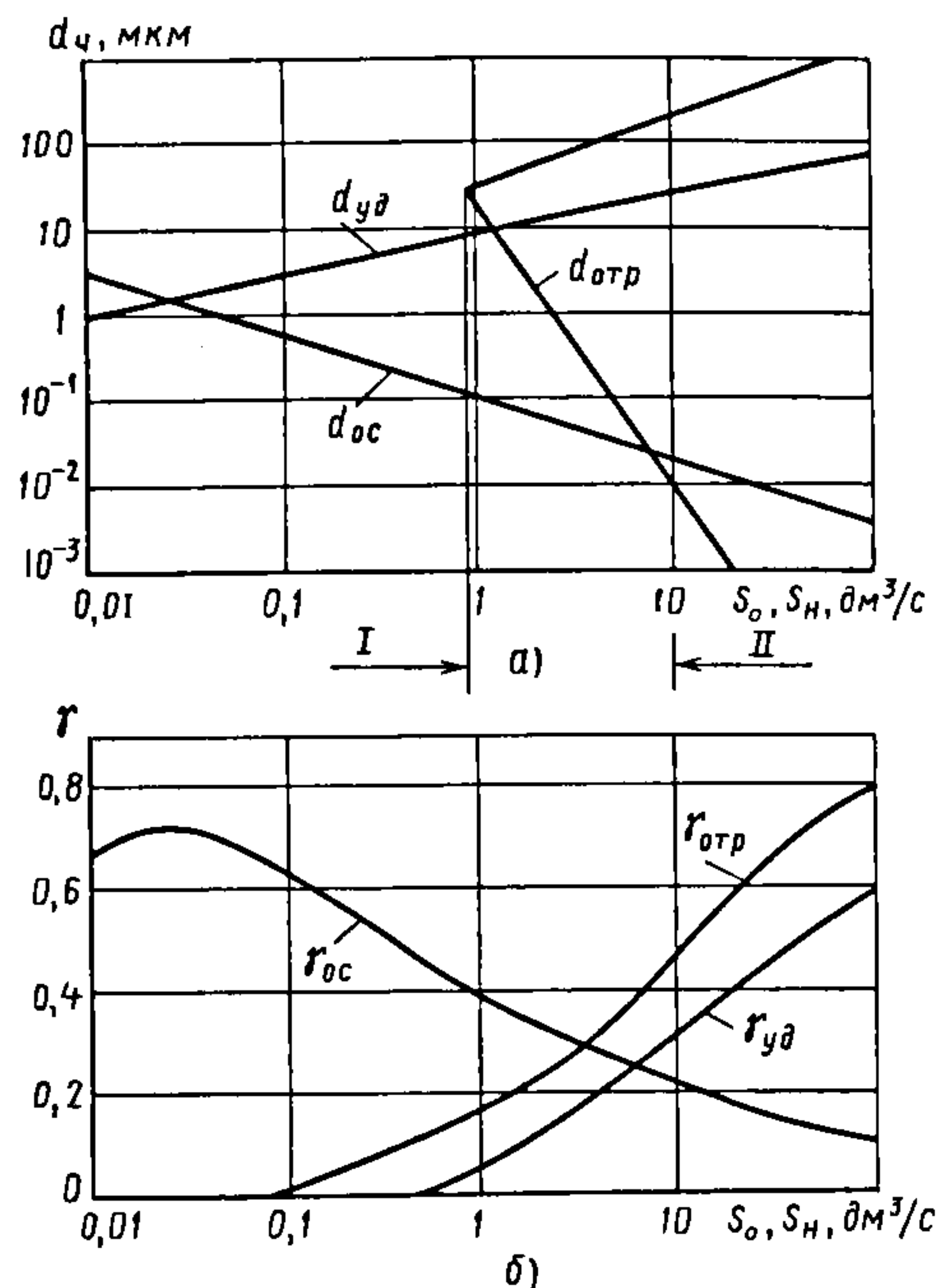


Рис. 8.53. Графики зависимости от эффективной быстроты откачки  $S_0$  (быстроты напуска  $S_H$ ):

а — размеров частиц, отрывающихся от поверхности ( $d_{отр}$ ), удаляемых из объема ( $d_{уд}$ ) и осаждаемых на препятствие ( $d_{ос}$ ); 1 — "мягкая" откачка; II — "жесткая" откачка; б — числа микрочастиц

Уменьшить генерацию микрочастиц внутрикамерными механизмами можно следующим образом: путем выбора антифрикционных и износостойких материалов; использованием специальных технологических методов обработки деталей машин; посредством разработки конструктивных решений механизмов и устройств с минимальными потоками МДЧ.

Твердосмазочные покрытия (ТСП) — ВНИИНП различных марок, Димолит-4 и другие износостойкие (нитриды, карбиды и силициды металлов) и антифрикционные материалы (фторопласт-4, полиимид и др.) широко используются в электронном машиностроении в направляющих, подшипниковых опорах качения и скольжения и т.п. Наиболее перспективным с



позиции минимальной пылегенерации является покрытие на основе дисульфида молибдена, нанесенное ионно-плазменным распылением в вакууме. Поток МДЧ из подшипника качения с таким покрытием на два–восемь порядков (в зависимости от наработки) меньше, чем у тех же подшипников без ТСП. С увеличением наработки поток микрочастиц из подшипников без покрытия возрастает, а у подшипников с ТСП уменьшается (до тех пор, пока покрытие полностью не износится).

Уменьшению потока выделяемых микрочастиц способствуют такие нетрадиционные технологические методы обработки деталей машин, как плазмохимическая модификация резин фторопластом, ионно-плазменное нанесение в вакууме ТСП на подшипники качения и скольжения, магнитно-импульсная обработка ферромагнитных порошков для получения магнитных жидкостей и др.

Кардинальным решением проблемы являются механизмы без пар трения в вакууме, например на основе управляемой упругой деформации. Однако по другим критериям (жесткости, точности, габаритных размеров и т.п.) они существенно уступают традиционным передаточным механизмам. Из унифицированных вводов движения в вакуум (манжетных, сильфонных, волновых и т.п.), а также оригинальных конструкций на основе жидких эвтектических сплавов и магнитных композиций наименьшим потоком МДЧ обладает ввод с магнитожидкостным уплотнением.

Основные рекомендации по конструированию и эксплуатации вакуумно-технологического оборудования с позиции уменьшения привносимой дефектности обрабатываемых изделий приведены ниже.

В присутствии подложек в вакуумной камере (рис. 8.54, а) необходимо проводить "мягкую" откачку или напуск с быстротой  $S_0 < S_{0\min}$  (см. рис. 8.53, а). При этом лучше использовать патрубки круглого сечения с введением их внутрь каме-

ры на глубину, равную полутора-двум диаметрам, и располагать патрубки как можно дальше от днища камеры. Стенки камеры для увеличения силы адгезии частиц к их поверхности следует охлаждать до температуры  $\sim 8...10^\circ\text{C}$ , а напускать лучше более легкий, чем воздух, газ, например азот или гелий.

По мере заполнения стенок, оснастки и днища вакуумной камеры продуктами износа, отслоениями конденсата необходимо при отсутствии подложек (рис. 8.54, б) очищать камеры посредством "жесткой" откачки с быстротой  $S_0 > S_{0\max}$  (см. рис. 8.53, а). Более эффективны патрубки щелевидной формы с соотношением сторон 1:5...1:10, располагать их следует как можно ближе к днищу камеры. Стенки камеры для уменьшения силы адгезии микрочастиц с поверхностью необходимо нагревать до  $\sim 70...80^\circ\text{C}$ , напускать надо хорошо осушенный газ и более тяжелый, чем воздух, например аргон или криптон.

Расположение внутрикамерных механизмов и других источников МДЧ должно быть таким, чтобы не было прямого попадания микрочастиц на подложку. Для этого должны быть применены экраны, лабиринты, магнитные и электростатические улавливатели. Пространственное расположение подложек предпочтительнее вертикальное (рис. 8.54, в), перемещать их следует только в верхней части камеры и механизмами с минимальным числом пар трения, например, с помощью механических рук. Непосредственно перед обработкой, если необходимо, с подложек могут быть удалены осевшие на них микрочастицы посредством механического, химического, аэродинамического, электро- и магнитно-разрядного, а также лазерного воздействия. Контроль и анализ потоков осаждающихся на подложку микрочастиц, эффективности их удаления можно вести с использованием оптических устройств, например на основе телевизионной камеры, установленной на микроскопе.

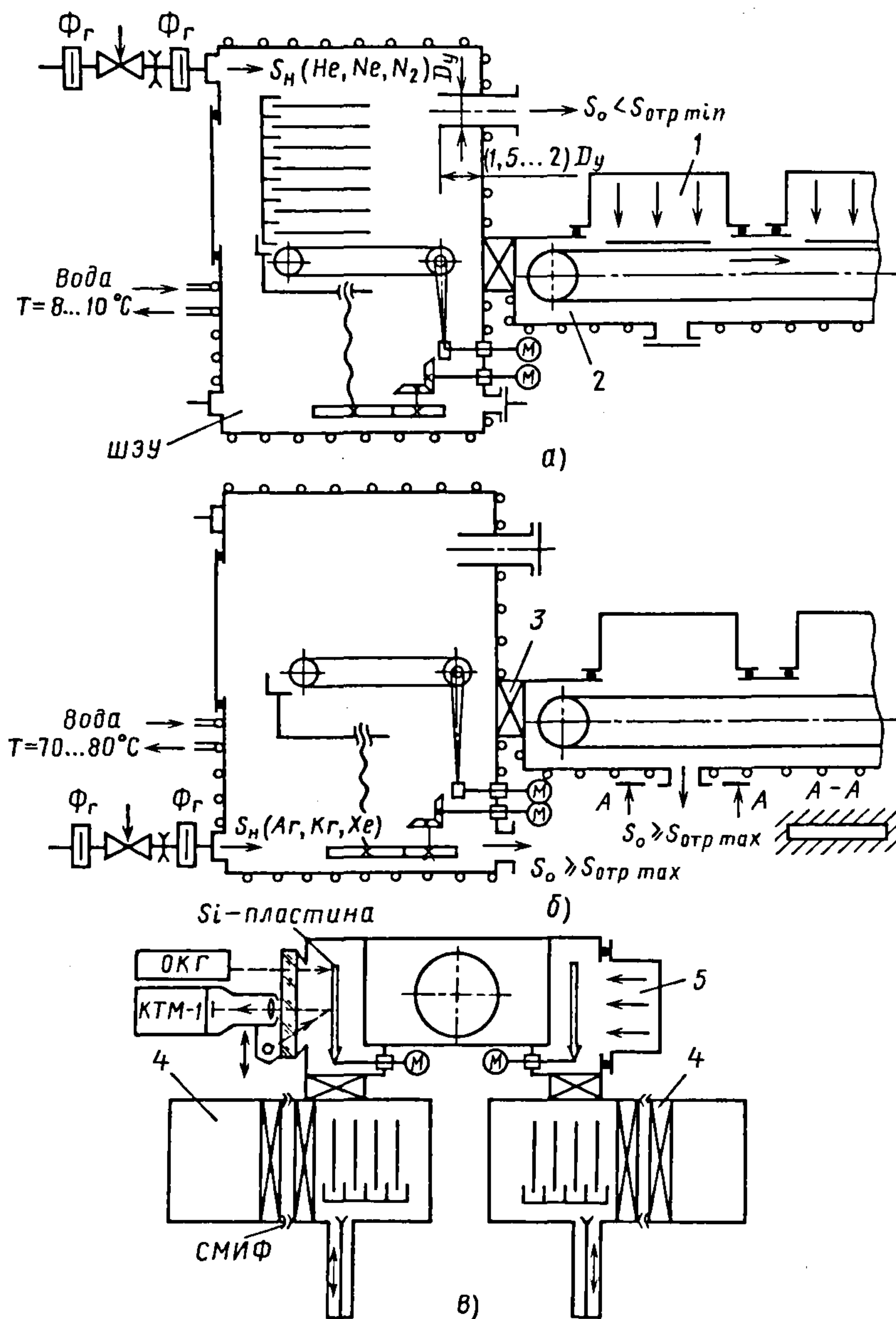


Рис. 8.54. Рекомендации по конструированию

и эксплуатации вакуумного технологического оборудования:

$D_y$  — диаметр условного прохода;  $\Phi_r$  — фильтр грубой очистки;  $\Phi_t$  — фильтр тонкой очистки;  $S_{отр min}$  — минимальная быстрота откачки, при которой происходит отрыв частицы с поверхности;  $M$  — механический привод; ШЗУ — шлюзовое загрузочное устройство;  $S_{отр max}$  — максимальная быстрота откачки, при которой происходит 100%-ный отрыв частиц с поверхности; ОКГ — оптический квантовый генератор; КТМ-1 — камера телевизионная матричная; СМIF — стандартный механический интерфейс; 1 — рабочий источник; 2 — вакуумно-транспортная система; 3 — вакуумный затвор; 4 — вакуумный контейнер; 5 — рабочий источник



При создании вакуумных многокамерных установок кластерного типа для производства сверхбольших интегральных схем важное значение имеет выбор схем расположения рабочих модулей и межоперационного транспорта, обеспечивающих уровень дефектности изделий, не превышающий допустимого. Это требование может быть выполнено двумя способами: 1) традиционным, заимствованным из машиностроения, который заключается в последовательном расположении вакуумных технологических модулей и

транспортных систем; 2) нетрадиционным, состоящим в использовании стыкуемых вакуумных контейнеров, снабженных стандартными механическими интерфейсами (СМИФ).

Если традиционные конструкторские решения установок позволяют лишь снизить привносимую дефектность, то применение вакуумных СМИФ-контейнеров обеспечивает радикальное уменьшение дефектности, так как, во-первых, полностью исключает попадание на изделие вторичных потоков МДЧ вследствие того,

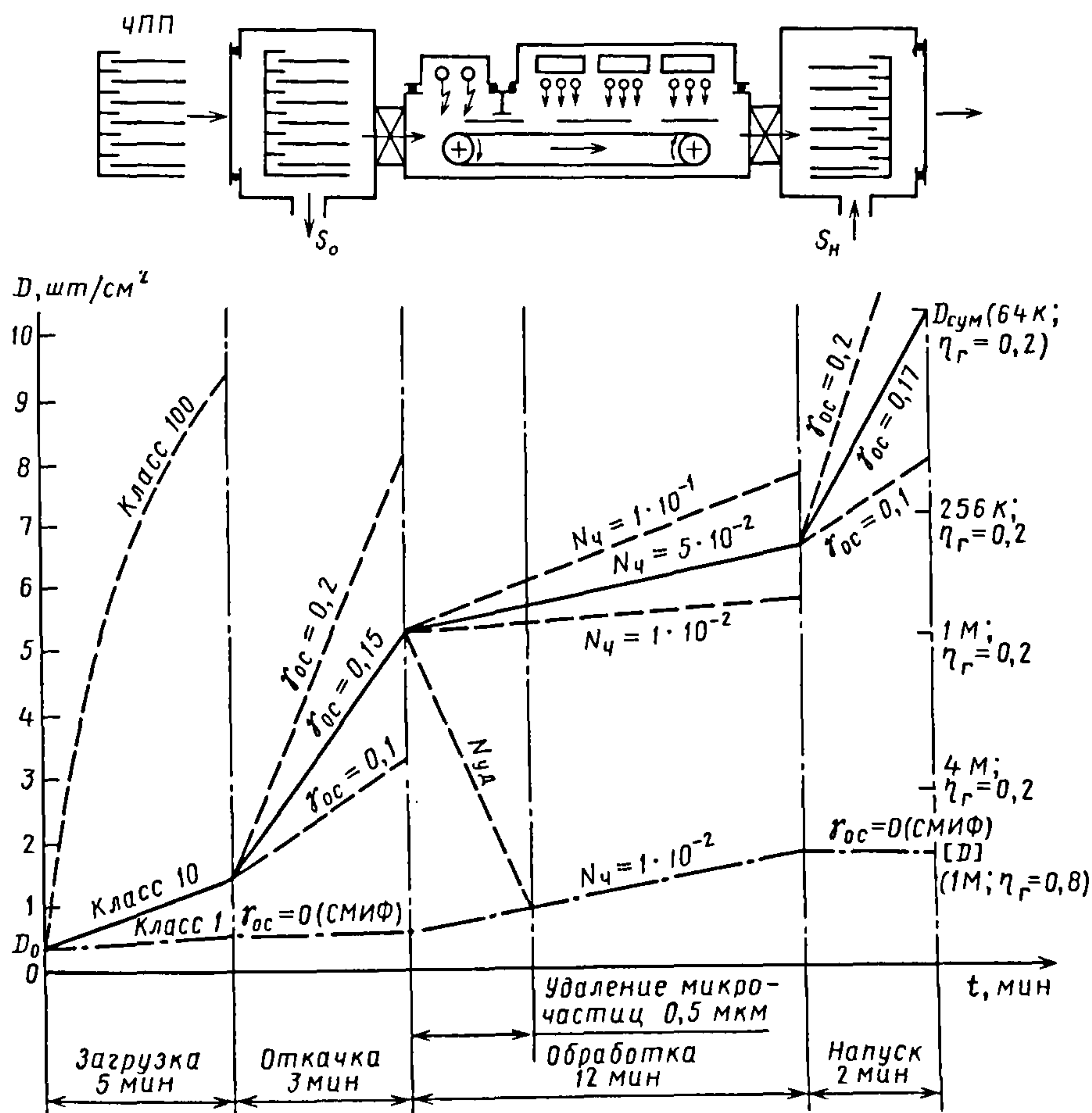


Рис. 8.55. Схема управления процессом набора критической дозы микродефектности обрабатываемых изделий:

ЧПП – чистое производственное помещение;  $D$  – доза привнесенной дефектности;  $N_{\text{ч}}$  – поток микрочастиц; 64 К; 256 К; 1 М; 4 М; 1 М – информационная емкость микросхемы;  $\eta_r$  – коэффициент выхода годных

что давление в контейнере и камере практически одинаково; во-вторых, такой способ характеризуется минимальными вспомогательными ходами и достаточно высокой надежностью функционирования.

Кроме того, контейнер можно использовать и в качестве межоперационного накопителя с практически неограниченной вместимостью, и в качестве межоперационного транспортного средства. При этом значительно снижаются требования к чистоте производственного помещения, т.е. "чистую комнату", по существу, можно уменьшить до размеров контейнера.

Влиять на процесс набора дозы привносимой дефектности (рис. 8.55) можно путем выбора класса чистоты производственного помещения, способа транспортирования и загрузки изделий в оборудование, типа вакуумной транс-

портной системы и структуры машины, отвечающих требованиям по качеству и выходу годных микросхем различной сложности, а также с помощью устройств удаления микрочастиц, попавших на рабочую поверхность подложек.

Понимание физической сущности и наличие инструмента для расчета составляют основу методики проведения экспертизы по уровню привносимой дефектности обрабатываемых изделий как уже существующего, так и только проектируемого вакуумного технологического оборудования. С помощью этой методики выбирается наилучший по критерию минимума привносимой дефектности компоновочный вариант оборудования, а также рассчитывается доза привносимой дефектности обрабатываемых изделий.



## Раздел 3

### ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

#### Глава 9

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

#### 9.1. ПОРШНЕВЫЕ НАСОСЫ

*Поршневые вакуумные насосы (ПВН)* представляют собой обычные поршневые компрессоры, к которым предъявляются повышенные требования в отношении размеров мертвого пространства и герметичности. Они широко применяются в промышленности для откачки сухих газов и газов с примесью капельной жидкости.

Преимущества ПВН – высокие КПД и надежность работы, возможность длительной эксплуатации; недостатки – значительная металлоемкость, большие габаритные размеры, потребность в фундаментах или специальных опорных конструкциях вследствие наличия неуравновешенных сил.

Насосы этого типа применяют при номинальном давлении всасывания  $\sim 30$  кПа в одноступенчатом исполнении и при  $10 \dots 15$  кПа в двухступенчатом.

В целях снижения давления всасывания в ПВН используют перепуск газа высокого давления, оставшегося в мертвом объеме А (рис. 9.1) после процесса нагнетания, в полость В цилиндра, в которой закончился процесс всасывания. Для этого в цилиндре или теле золотника выполняют перепускные каналы Б. По ним газ перетекает из полости А в полость В, и давление в этих полостях выравнивается.

Таким образом, обратное расширение газа в полости А начинается с более низкого давления; ход поршня, соответ-

ствующий обратному расширению, уменьшается, в результате чего быстрота действия насоса при определенном отношении давления на нагнетании и давления на всасывании увеличивается, а предельное остаточное давление на всасывании насоса уменьшается. Перепуск газа приводит к увеличению затрат мощности, так как энергия расширения газа, выделяемая в процессе выравнивания давления, не может быть возвращена при обратном расширении. Введение перепускных каналов в ПВН с распределением самодействующих клапанами позволяет снизить предельное давление всасывания до  $2 \dots 1$  кПа.

Применение золотника поршневого типа с уплотнением поршневыми кольцами повышает среднюю скорость поршня, которая ограничивается допустимыми скоростями газа в окнах всасывания и перепускных каналах, а также неуравновешенными инерционными силами.

Допустимая средняя скорость поршня в таких ПВН выше, чем в ПВН с золотниковым распределением других типов, поэтому удельная металлоемкость и габаритные размеры этих насосов значительно меньше.

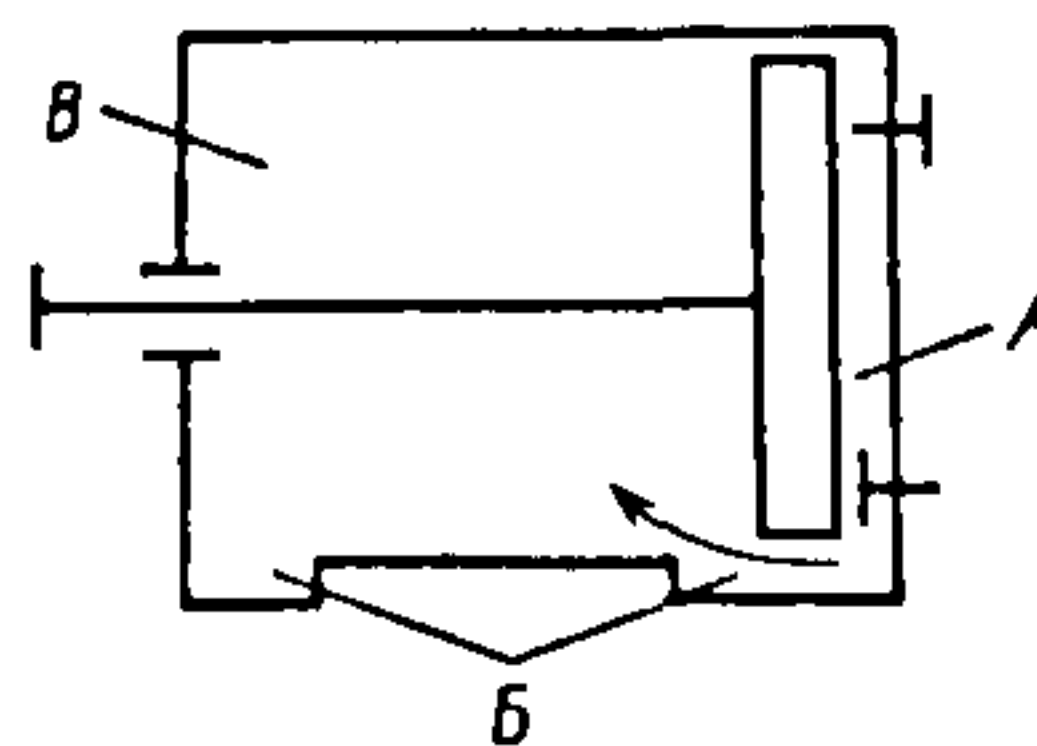


Рис. 9.1. Схема перепуска газа по каналу на зеркале цилиндра:  
А, В – полости цилиндра; Б – перепускные каналы

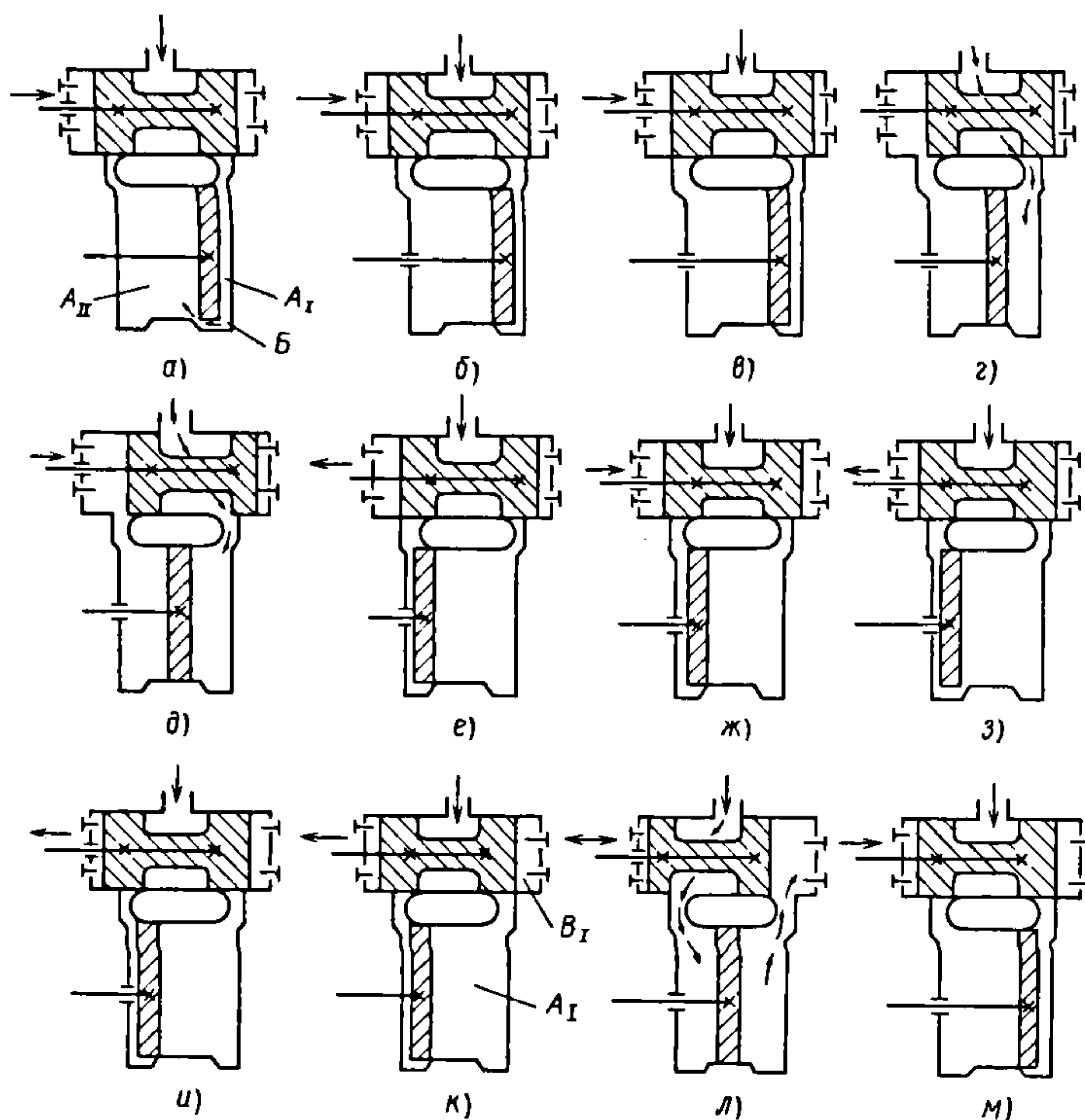


Рис. 9.2. Схемы, иллюстрирующие принцип действия ПВН с поршневым золотником:  
 $A_I$ ,  $A_{II}$  – полости цилиндра;  $B_I$  – полость золотника;  $B$  – перепускные каналы

Принцип действия и теоретические индикаторные диаграммы ПВН с поршневым золотником показаны на рис. 9.2 и 9.3. Когда поршень находится в правой мертвой точке, золотник от среднего положения движется вправо (см. рис. 9.2, а), так как угол между коленом вала, к которому крепится шатун поршня, и эксцентрик золотника равен  $90^\circ$ , причем эксцентрик золотника отстает. Перепускной канал  $B$  в это время открыт. Происходит перепуск газа высокого давления из полости  $A_I$  в полость  $A_{II}$ , где закончился процесс всасывания. Перепуск уменьшает давление газа в мертвом пространстве полости  $A_I$  и таким образом увеличивает быстроту действия насоса. Перепуск продолжается до тех пор, пока поршень, перемещаясь влево, не перекроет перепускные каналы, расположенные на зеркале цилиндра (рис. 9.2, б).

При движении поршня объем замкнутой полости  $A_I$  увеличивается. Происходит процесс расширения  $1-2-M$  (см. рис. 9.3). При этом золотник движется вправо, перекрывая цилиндрический канал, так как необходимо исключить возможность одновременного протекания перепуска и всасывания.

Схема на рис. 9.2, в соответствует моменту окончания расширения газа в замкнутой полости  $A_I$ . С этого момента золотник, продолжая двигаться вправо, начнет открывать цилиндрический канал, через который полость  $A_I$  сообщается с полостью всасывания. Происходит всасывание газа (рис. 9.2, г). При этом золотник достигает мертвой точки (рис. 9.2, д) и начинает двигаться влево. Процесс всасывания завершается в момент, когда золотник перекрывает цилиндрический канал (рис. 9.2, е).



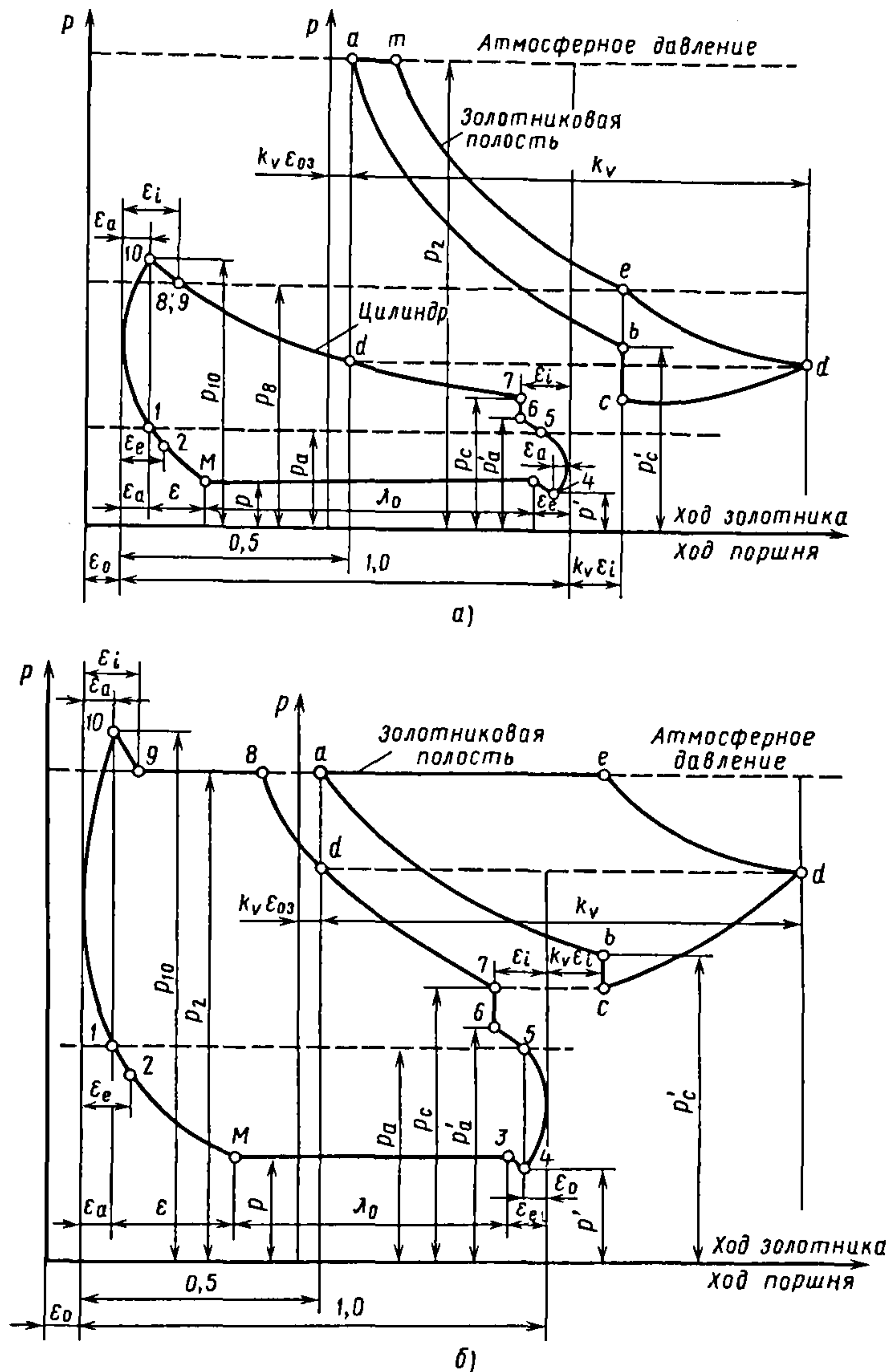


Рис. 9.3. Теоретические индикаторные диаграммы ПВН с поршневым золотником при двух- (а) и одноступенчатом режиме (б):

$\epsilon_0$  ( $\epsilon_{03}$ ) – относительный мертвый объем цилиндра (золотника);  $\epsilon_a$  – относительный ход поршня при перепуске;  $\epsilon_i$  – относительный ход поршня после отсечения нагнетания;  $\epsilon_e$  – относительный ход поршня после отсечения всасывания;  $\lambda_0$  – объемный коэффициент откачки;  $k_v$  – относительный ход золотника;  $p$  – давление всасывания;  $p'$  – давление в полости всасывания цилиндра перед перепуском;  $p_a$  – давление в полостях цилиндра после перепуска;  $p'_a$  – давление в полости цилиндра при сжатии в момент соединения с золотником;  $p_c$  – давление смешения;  $p'_c$  – давление в полости золотника в момент соединения с цилиндром;  $p_8$  – давление в полости нагнетания цилиндра после отсечения нагнетания;  $p_{10}$  – давление в полости нагнетания цилиндра перед перепуском;  $p_2$  – давление нагнетания

На индикаторной диаграмме (см. рис. 9.3) процессу всасывания соответствует кривая  $M-3$ .

Всасывание заканчивается немного раньше начала перепуска, поскольку необходимо гарантированно исключить возможность одновременного протекания процессов всасывания и перепуска. С момента перекрытия золотником цилиндрического канала до момента, когда поршень начнет открывать перепускной канал (см. рис. 9.2, ж), происходит расширение газа в замкнутой полости цилиндра  $A_1$  [кривая 3–4 (см. рис. 9.3)]. Во время перепуска, который начинается с момента открытия поршнем перепускного канала, поршень достигает левой мертвой точки (см. рис. 9.2, з) и движется вправо. Цилиндровые каналы во время перепуска закрыты. Процесс перепуска (см. рис. 9.3, кривая 4–5) продолжается до тех пор, пока поршень не закроет перепускной канал (см. рис. 9.2, и).

Золотник откроет цилиндрический канал, двигаясь влево от положения, изображенного на рис. 9.2, к, лишь через некоторый период после закрытия перепускного канала. В это время идет процесс поджатия (см. рис. 9.3, кривая 5–6). После открытия цилиндрического канала (см. рис. 9.2, к) полости цилиндра  $A_1$  и золотника  $B_1$  объединяются, давление в них выравнивается (см. рис. 9.3, кривые 6–7 и  $b-c$ ). Газ, сжимаясь, переходит в золотниковую полость.

Сжатие газа в объеме полостей цилиндра и золотника протекает в два этапа. На первом этапе (см. рис. 9.2, к) объем полости  $B_1$  увеличивается, а полости  $A_1$  уменьшается, причем возрастание объема полости  $B_1$  идет со снижающейся скоростью, так как золотник подходит к мертвой точке, а скорость уменьшения полости  $A_1$  повышается по мере приближения поршня к среднему положению. Первый этап длится до момента достижения золотником мертвой точки (см. рис. 9.2, л). Этому этапу сжатия соответствуют кривые 7– $d$  и  $c-d$  на индикаторной диаграмме (см. рис. 9.3).

При движении золотника вправо происходит второй этап сжатия, отличительная особенность которого – одновременное сжатие в полостях цилиндра и золотника. Этот этап сжатия (кривые  $d-8$  и  $d-e$ ) завершается, когда газ из полости цилиндра переходит в золотниковую полость и золотник перекрывает цилиндрические каналы (см. рис. 9.2, м).

Затем в цилиндре осуществляется поджатие (см. рис. 9.3, кривые 9–10), после чего мертвое пространство цилиндра соединяется через перепускные каналы с другой полостью цилиндра, в которой только что закончился процесс всасывания (см. рис. 9.2, а). На индикаторной диаграмме (см. рис. 9.3, а) перепуску соответствуют кривые 10–1 и 4–5. После того как золотник, перекрыв цилиндрические каналы, отделит золотниковую полость от цилиндра, в ней последовательно протекают процессы дополнительного сжатия и нагнетания (кривые соответственно  $e-m$  и  $m-a$  на рис. 9.3, а). По окончании процесса нагнетания в золотниковой полости начинается обратное расширение газа мертвого пространства золотника (кривая  $a-b$ ).

В рассмотренном случае золотник служит дожимающей (второй) ступенью, поэтому такой режим работы называют *двухступенчатым*.

В *одноступенчатом* режиме работы вакуумного насоса (см. рис. 9.3, б) сжимаемый газ достигает давления нагнетания уже при сжатии в объединенном объеме полостей золотника и цилиндра. Поршень нагнетает сжатый газ (8–9) в нагнетательный трубопровод до момента, которому соответствует схема на рис. 9.2, м. После этого золотник выталкивает газ из золотниковой полости ( $e-a$ ). Одноступенчатый режим сжатия в вакуумном насосе возможен при большом давлении всасывания.

Использование золотника поршневого типа в роли дополнительного сжимающего органа улучшает объемные характеристики и уменьшает предельное остаточное давление.



В связи с тем что ПВН работают при различном давлении всасывания, от которого зависит их быстрота действия, характеристику задают быстротой действия при номинальном давлении всасывания и предельным остаточным давлением (при закрытом всасывающем патрубке).

Геометрическая быстрота действия ПВН двойного действия

$$S_r = 0,25\pi D_n^2 S_n^n \left( 2 - \frac{d_{шт}^2}{D_n^2} \right), \quad (9.1)$$

где  $D_n$  — диаметр цилиндра (поршня);  $S_n$  — полный ход поршня;  $n$  — частота вращения коленчатого вала;  $d_{шт}$  — диаметр штока.

Идеальный вакуумный насос не имеет энергетических потерь, и работа, затраченная им на сжатие и перемещение газа, равна изотермической работе сжатия от давления всасывания  $p$  до давления нагнетания  $p_n$ .

Мощность идеального ПВН

$$N_{ид} = p S_r \ln (p_n / p). \quad (9.2)$$

Таким образом, работа и мощность идеального ПВН равны нулю при  $p = 0$  и  $\ln (p_n / p) = 0$ , т.е. при  $p = p_n$ , и максимальны при  $\tau = p_n / p = 2,71$ .

По быстроте действия реальный ПВН уступает идеальному вследствие потерь, обусловленных мертвым объемом, подогревом и дросселированием газа при всасывании, наличием перепускных каналов и перекрытий, неполнотой процесса перепуска, внутренними перетеканиями и внешними натеками через неплотности рабочей полости, а также парообразованием.

Уменьшение быстроты действия  $S$  реального ПВН по сравнению с быстротой действия  $S_r$  идеального ПВН оценивают коэффициентом откачки

$$\lambda = S / S_r. \quad (9.3)$$

Наиболее существенны потери быстроты действия из-за подогрева и дросселирования газа при всасывании, внутреннего перетекания, а также наличия мертвого объема и перекрытий, поэтому коэффициент откачки упрощенно можно определить по формуле

$$\lambda = \lambda_{др} \lambda_m - \lambda'_0 - \lambda'_n, \quad (9.4)$$

где  $\lambda_{др} = p_3 / p_{вс}$  — отношение давления газа в цилиндре в конце процесса всасывания к давлению во всасывающем патрубке, учитывающее уменьшение быстроты действия реального ПВН вследствие дросселирования газа при всасывании;  $\lambda_m = T_{вс} / T_3$  — отношение температуры газа во всасывающем патрубке к температуре газа в цилиндре в конце процесса всасывания реального насоса, учитывающее уменьшение быстроты действия ПВН в результате подогрева газа при всасывании;  $\lambda'_0$  — относительные потери быстроты действия, обусловленные наличием мертвого объема и перекрытий;  $\lambda'_n$  — относительные потери быстроты действия, обусловленные внутренними перетеканиями.

Коэффициент  $\lambda$  и распределение потерь между составляющими зависят от отношения  $\tau$  давлений всасывания и нагнетания и частоты вращения  $n$  вала (рис. 9.4).

Коэффициент откачки  $\lambda$  можно рассчитать с достаточной точностью на базе экспериментальных данных в зависимости от отношения  $\tau$  и средней скорости поршня  $c_m$ , м/с, по эмпирической формуле

$$\lambda = 0,94 - 2 \cdot 10^{-3} \tau - 0,09 c_m.$$

Теоретические индикаторные диаграммы ПВН (см. рис. 9.3) строят в предположении изотермичности процессов сжатия и расширения, полноты выравнивания давления при сообщении двух полостей, герметичности рабочих полостей (газообмен возможен только через всасывающие окна, перепускные каналы и нагнетательные каналы без потерь).

Давление всасывания  $p^*$ , при котором происходит переход с одноступенчатого режима работы ПВН с поршневым золотником на двухступенчатый,

$$p^* = p_n (1 - D) / C,$$

где  $C$  и  $D$  — коэффициенты, определяемые из конструкции насоса.

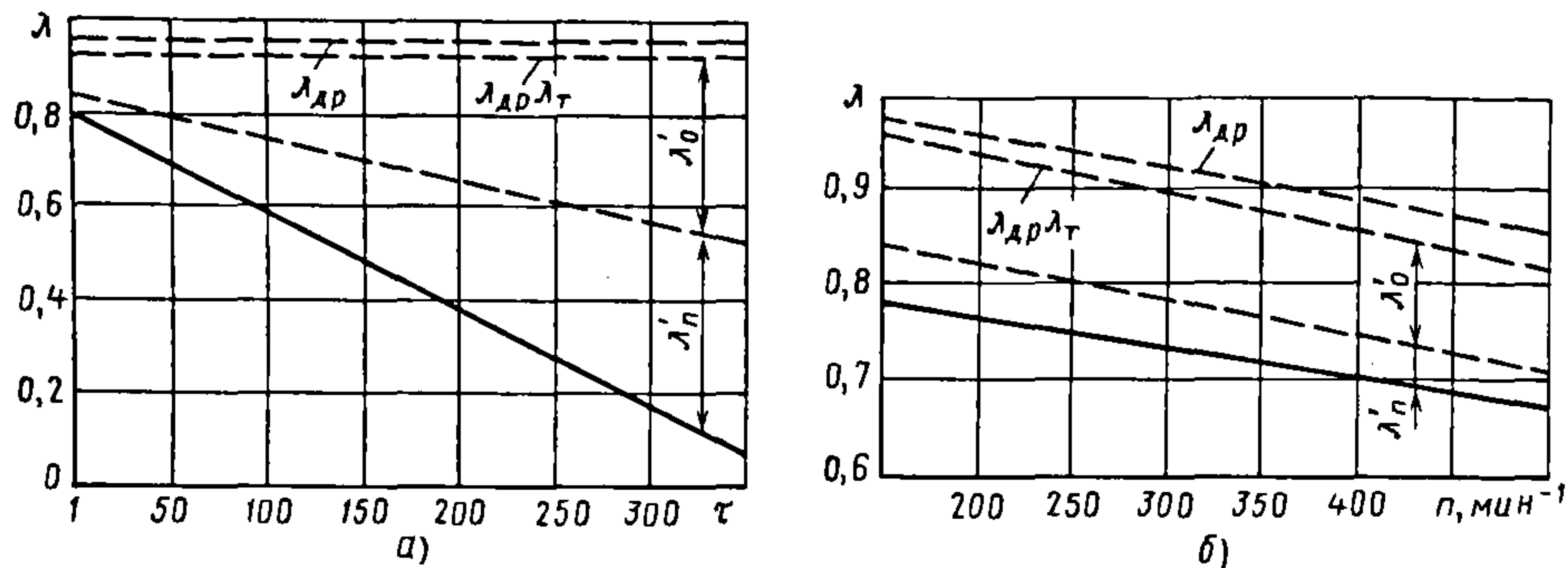


Рис. 9.4. Зависимость коэффициента откачки и его составляющих для ЗВП-3 от отношения давлений  $\tau$  при  $n = 320 \text{ мин}^{-1}$  (а) и от частоты вращения  $n$  при  $\tau = 20$  (б):

$\lambda_{др}$  — отношение давления газа в цилиндре в конце процесса всасывания к давлению во всасывающем патрубке;  $\lambda_t$  — отношение температуры газа во всасывающем патрубке к температуре газа в цилиндре в конце процесса всасывания;  $\lambda'_0$  — относительные потери производительности, обусловленные наличием мертвого объема и перекрытий;  $\lambda'_п$  — относительные потери производительности, обусловленные внутренними перетеканиями

Основные размеры ПВН устанавливают по геометрическому объему. Так, для определения размеров насоса необходимо задаваться следующими параметрами в указанных пределах:

- средней скоростью поршня  $c_m = 2 \dots 3 \text{ м/с}$ ;
- отношением хода поршня к его диаметру  $\psi = S_p/D_p = 0,4 \dots 0,6$ ;
- отношением хода золотника к его диаметру  $\psi_3 = S_3/D_3 = 0,8 \dots 1,0$ ;
- отношением геометрических размеров золотника и поршня  $k_v = S_3/S_r = 0,15 \dots 0,20$ ;
- относительным диаметром штока  $\alpha_{шт} = d_{шт}/D_p = 0,1$ , где  $d_{шт}$  — диаметр штока;  $D_p$  — диаметр поршня.

Остальные основные размеры и параметры определяют по следующим формулам:

диаметр поршня

$$D_p = \sqrt{\frac{8S_r}{\pi c_m (2 - d_{шт}^2)}};$$

ход поршня  $S_p = \psi D_p$ ;

радиус кривошипа поршневой линии

$$R = 0,5 S_p;$$

частоту вращения коленчатого вала

$$n = 0,5 c_m / S_p;$$

геометрический объем золотника в единицу времени  $S_3 = k_v S_r$ ;

диаметр золотника

$$D_3 = \sqrt[3]{2S_3 / (\pi \psi_3 n)};$$

ход золотника  $S_3 = \psi_3 D_3$ ;

радиус кривошипа золотниковой линии  $r_3 = \psi_3 D_3$ .

Диаметры поршня и золотника округляют до стандартных. Площадь поперечного сечения перепускных каналов вычисляют по упрощенному соотношению

$$F_u = (c_m / c_u) F_p,$$

где  $c_u = 150 \dots 200$  — условная скорость газа в перепускном канале, м/с;  $F_p$  — площадь сечения поршня основного цилиндра.

Число перепускных каналов обычно больше шести. Способ выполнения перепускных каналов на зеркале цилиндра, как и конструкция поршня, влияет на проходимость этих каналов.

Нагнетательные клапаны подбирают по необходимой эквивалентной площади

$$F_{кл} = 0,25 \pi D_3^2 c_{мз} / c_{кл},$$

где  $c_{мз}$  — средняя скорость золотника, м/с;  $c_{кл} = M_n c_{зв.н}$  — допускаемая средняя скорость газа в клапане, м/с ( $M_n = 0,07 \dots 0,09$  —



критерий скорости газа в клапане;  $c_{зв.н}$  — скорость звука в газе в условиях нагнетания).

В ПВН чаще выполняют кольцевые нагнетательные клапаны.

Индикаторную мощность ПВН определяют по упрощенным индикаторным диаграммам, исходя из мгновенности и полноты процессов перепуска и смешения, отсутствия мертвого объема и перекрытий, изотермичности всех процессов расширения, политропности основного процесса сжатия, отсутствия перетеканий и гидравлических потерь.

При работе ПВН системы МВТУ в режиме максимальной мощности среднее индикаторное давление

$$p_{i\max} = A_0 p_{c0}^{1/n} - B_0 p_{c0} - C_0,$$

где  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$  — коэффициенты, определяемые из конструкции насоса,  $p_{c0}$  — давление смешения;  $n$  — показатель политропы, принимаемый равным показателю адиабаты.

В режиме максимальной мощности давления смешения и всасывания соответственно:

$$p_{c0} = \left( \frac{A_0}{B_0 n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \text{ и } p_{вс0} = \frac{1}{\alpha} p_{c0} - \frac{\beta}{\alpha} p_n.$$

Индикаторная мощность

$$N_i = p_{i\max} S_r.$$

Мощность на валу

$$N_e = N_i / \eta_{\text{мех}},$$

где  $\eta_{\text{мех}} = 0,70 \dots 0,75$  — механический КПД.

Характеристики ПВН, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 9.1.

ПВН типов 3ВНП-3, ВНП-6 и 2ДВНП-6 унифицированы, т.е. имеют одинаковые механизм движения, станину, смазочную систему и цилиндровую группу. Насосы 3ВНП-3 и ВНП-6 унифицированы полностью (рис. 9.5 и 9.6) и отличаются только конструкцией приводного

### 9.1. Характеристика ПВН производства России

Параметр	Значение параметра для насоса			
	3ВНП-3	ВНП-6	2ДВНП-6	ВН-120
Число: ступеней сжатия цилиндров	1	1	2	1
Быстрота действия номинальная, м/мин	3,7±6 %	6±10 %		120
Давление, кПа: всасывания при номинальной быстроте действия	5,0		1,0	8,0
предельное остаточное	0,4			—
Диаметр цилиндра, мм	300			1150
Ход поршня, мм	150			500
Частота вращения, с <sup>-1</sup> : насоса	3,6	7,2		2,33
электродвигателя	12,5	25		9,75
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /с	0,14	0,22	0,25	9,35
Мощность, кВт: номинальная	3,2	6,3	3,7	104
электродвигателя	5,5	11		200
Общая масса агрегата, кг	840		900	1940

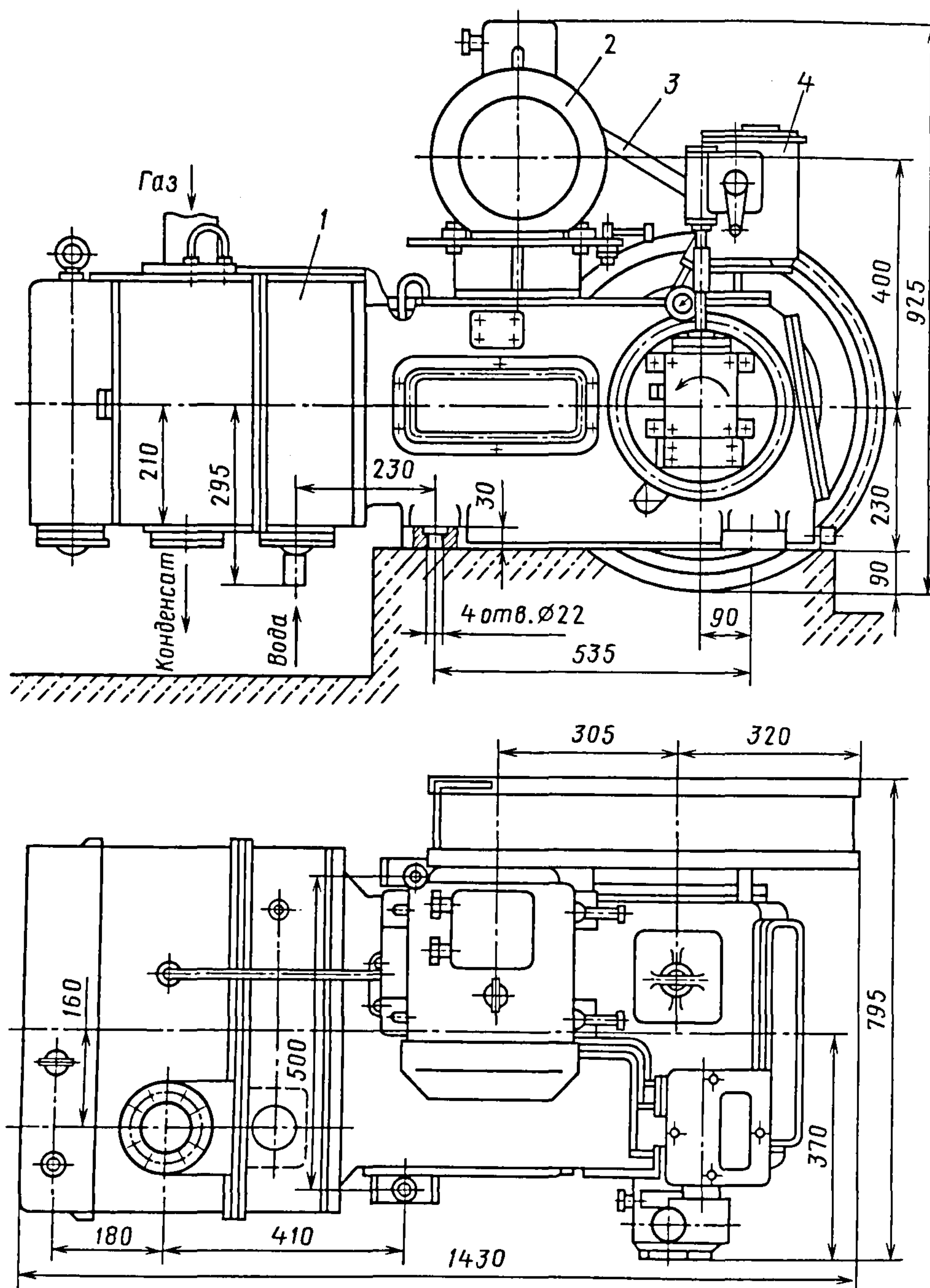


Рис. 9.5. Вакуумная установка с насосом 3ВНП-3 (ВНП-6):  
1 – насос; 2 – электродвигатель; 3 – клиновые ремни; 4 – масляный насос



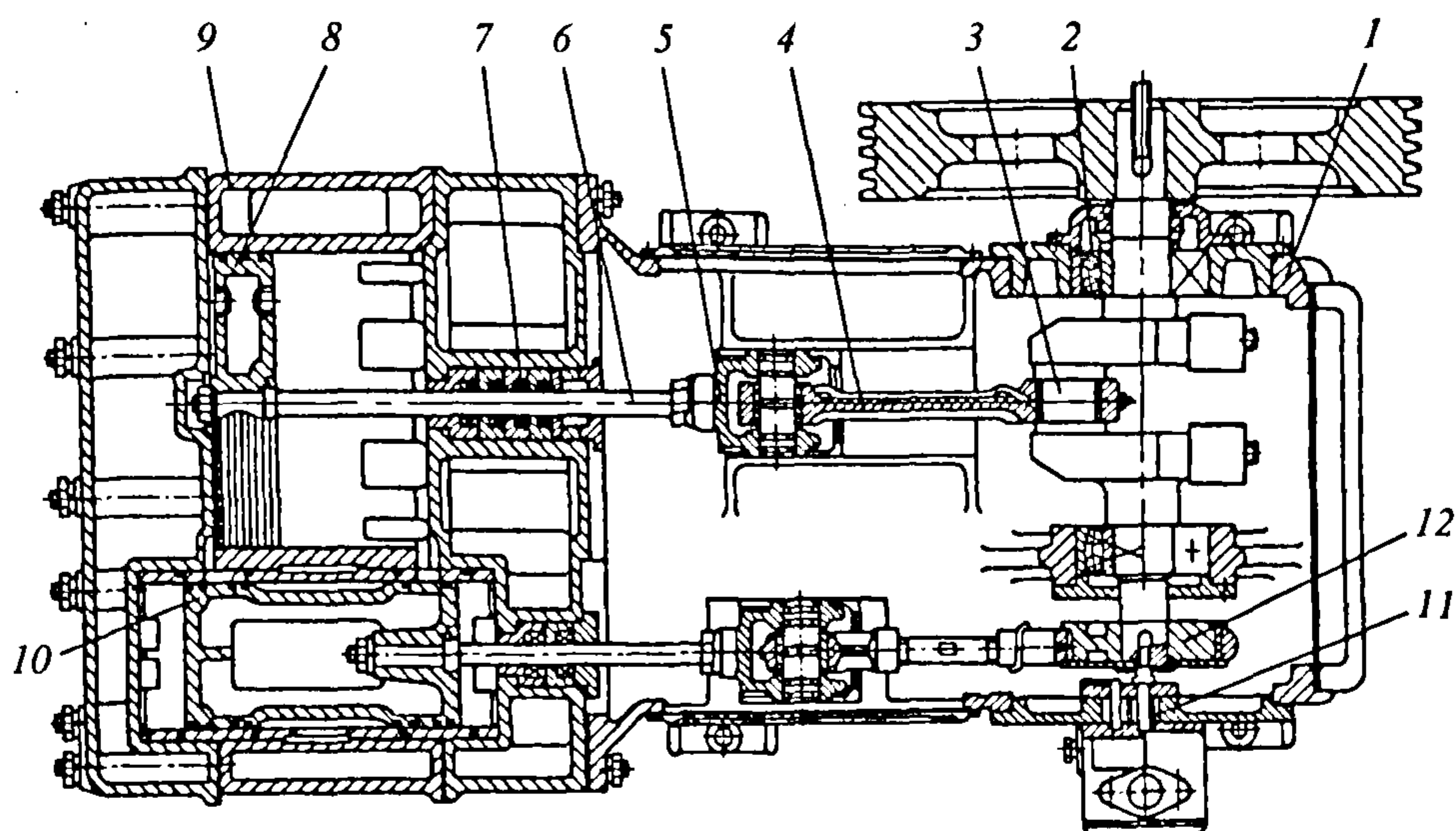


Рис. 9.6. Вакуумный насос 3ВНП-3 (ВНП-6):

1 – станнина; 2 – шариковый подшипник; 3 – коленчатый вал; 4 – шатун; 5 – ползун; 6 – шток; 7 – сальниковое уплотнение; 8 – поршень; 9 – цилиндр; 10 – золотник; 11 – насос для подачи масла в механизм движения; 12 – эксцентрик

двигателя и частотой вращения коленчатого вала. В насос 2ДВНП-6 в отличие от первых добавлен цилиндр простого действия второй ступени. В крышке цилиндра второй ступени имеются два кольцевых клапана, один из которых – байпасный, другой – нагнетательный второй ступени. Байпасный клапан служит для выпуска газа на нагнетание при режиме работы, когда не требуется сжатие газа во второй ступени.

Насосы 3ВНП-3, ВНП-6 и 2ДВНП-6 предназначены для откачки неагрессивных по отношению к чугуну, стали и бронзе взрывобезопасных газов и воздуха, не содержащих капельной влаги и механических примесей, т.е. для создания вакуума в различных технологических процессах химической, пищевой и других отраслях промышленности.

## 9.2. ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВЫЕ НАСОСЫ

Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (ЖКВН) различают по числу рабочих циклов, типу подвода и отвода газа

и по используемой в жидкостном кольце жидкости.

В настоящее время для вакуумных насосов применяются ЖКВН простого действия с осевым подводом и отводом газа.

В ЖКВН простого действия (рис. 9.7) рабочее колесо 1, состоящее из ступицы и отлитых заодно с ней лопаток, эксцентрично расположено в цилиндрическом корпусе 2. Рабочая жидкость залита в корпус до оси колеса. При вращении колеса жидкость центробежной силой отбрасывается к корпусу и между ступицей колеса 1 и внутренней поверхностью жидкостного кольца образуется серпообразная полость, которая лопатками делится на отдельные рабочие ячейки. При увеличении объема рабочих ячеек в них через всасывающее окно в поступает откачиваемый газ.

Во время уменьшения объема рабочих ячеек, происходящего от момента прохождения сечения II–II осью ячейки до соединения ячеек с нагнетательным окном 2, газ в рабочих ячейках сжимается, т.е. происходит процесс внутреннего сжа-

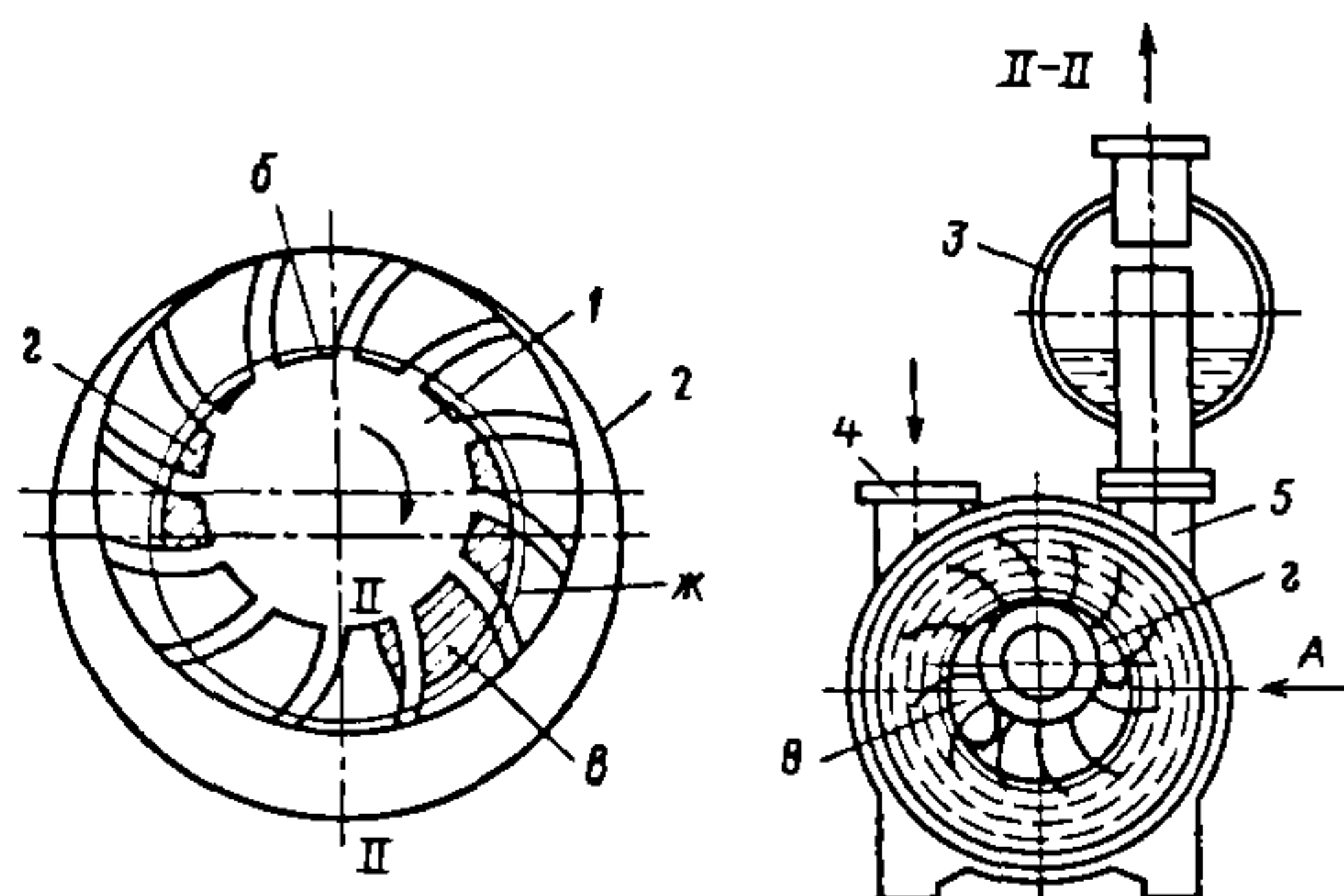


Рис. 9.7. Схема ЖКВН простого действия

тия. Когда рабочие ячейки проходят мимо нагнетательного окна  $z$ , газ из них поступает в нагнетательное окно, так как объем рабочих ячеек продолжает уменьшаться. Часть газа, оставшегося в мертвом объеме, возвращается через зазор  $b$  с нагнетания на всасывание.

При осевом подводе газа в торцовых крышках  $6$  (рис. 9.8, вариант 1) или центральном корпусе  $7$  (вариант 2) выполняют всасывающие окна  $e$ . Откачиваемый газ подается в рабочие ячейки в осевом направлении через окна всасывания. В окна газ поступает через всасывающий патрубок  $4$ , полости  $e$  в крышках  $6$  или корпусе  $7$ . После сжатия газ выбрасывается в осевом направлении через нагнетательные окна  $z$ , крышки  $6$  или корпуса  $7$  в нагнетательный патрубок  $5$ .

Насосы данного типа делят на *водокольцевые* (ВВН) и *жидкостно-кольцевые*

(ЖКВН). В ВВН в качестве рабочей жидкости используют воду, в ЖКВН – кислоты, щелочи, органические жидкости и др.

Благодаря наличию жидкостного кольца и большой поверхности теплообмена между газом и жидкостным кольцом процесс сжатия газа в ЖКВН близок к изотермическому и показатель политропы сжатия в ВВН  $n = 1,1 \dots 1,15$ . Температура жидкости в жидкостном кольце поддерживается в заданных пределах путем подвода охлажденной жидкости и отводу нагретой. Рабочая жидкость обычно поступает через торцовые зазоры  $d$  (см. рис. 9.8) или всасывающее окно.

Реже рабочую жидкость подводят через отверстия в корпусе ЖКВН. Эти отверстия обычно выполняют непосредственно за нагнетательным окном, чтобы большую часть газа выбросить в нагнетательное окно и подать в область всасывающего окна наиболее холодную жидкость. Однако намного чаще жидкость подают в торцовые зазоры, что приводит к их уплотнению и уменьшению перетеканий газа.

Жидкость отводится из жидкостного кольца через нагнетательное окно. Для того чтобы отделить откачиваемый газ от жидкости, за нагнетательным патрубком  $5$  установлен сборник  $3$  жидкости (см. рис. 9.7).

ЖКВН просты конструктивно, надежны в эксплуатации и отличаются низким уровнем шума при работе.

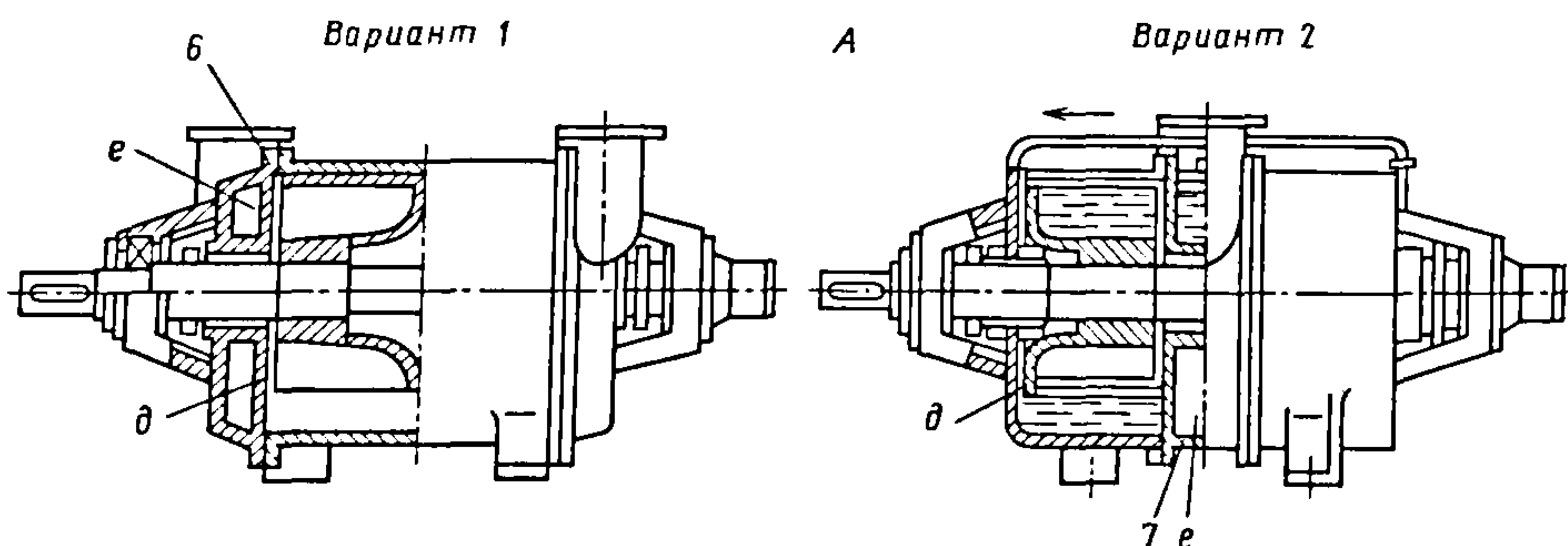


Рис. 9.8. ЖКВН с осевым подводом и отводом газа



Процесс сжатия происходит с интенсивным теплообменом. Это позволяет откачивать с помощью ЖКВН легкоразлагающиеся, полимеризующиеся, воспламеняющиеся и взрывоопасные газы и смеси. Наличие жидкостного кольца дает возможность откачивать газы, содержащие пары, капельную жидкость, твердые инородные включения типа пыли и даже абразивных частиц. Соответствующий подбор рабочей жидкости обеспечивает откачку агрессивных газов (например, для перекачки хлора используют серную кислоту концентрацией 97...98 %), исключает загрязнение откачиваемых газов и объемов парами масел.

Недостатки ЖКВН:

высокие затраты мощности на вращение жидкостного кольца и, как следствие этого, относительно низкий КПД;

высокое предельное остаточное давление (2,66...9,31 кПа для одноступенчатых вакуумных насосов и 0,133...0,665 кПа для двухступенчатых);

небольшая окружная скорость на периферии рабочего колеса, что приводит к увеличению габаритных размеров (например, по сравнению с пластинчатороторными, двухроторными вакуумными насосами).

ЖКВН применяют в химической, целлюлозно-бумажной, горнодобывающей, текстильной, пищевой, металлургической, машиностроительной, фармацевтической, энергетической промышленности, в коммунальном и сельском хозяйстве.

При расчете ЖКВН принимают следующие допущения: движение жидкости в ЖКВН установившееся; расход жидкости в любом сечении кольца постоянен вследствие неразрывности потока; давление газа на внутреннюю поверхность жидкостного кольца на стороне всасывания ( $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ ) постоянно и равно давлению всасывания ( $\theta$  – угол поворота ротора ЖКВН – рис. 9.9);

давление газа на внутреннюю поверхность жидкостного кольца в пределах

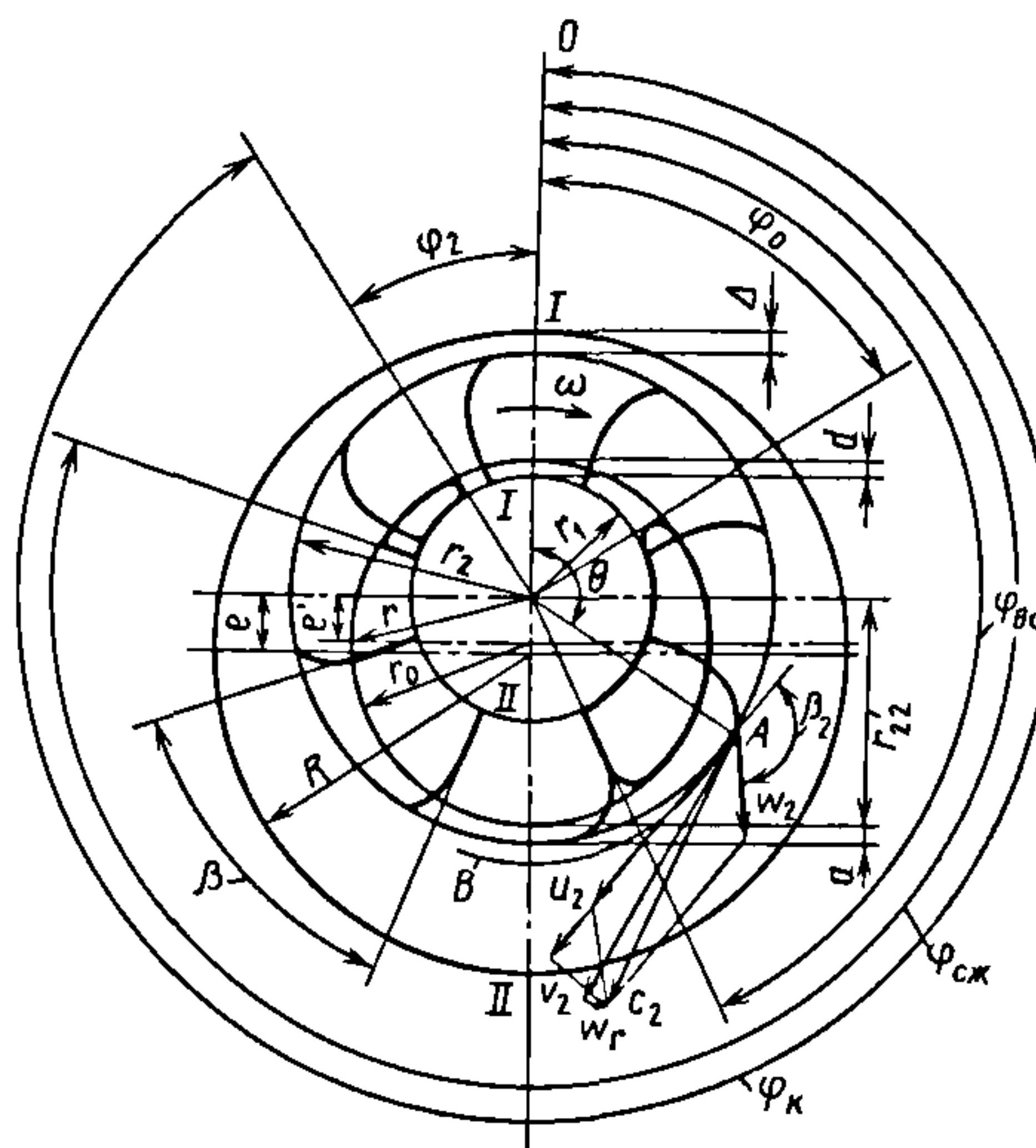


Рис. 9.9. Принципиальная схема ЖКВН

нагнетательного окна ( $\varphi_k \dots \varphi_{сж}$ ) постоянно и равно давлению нагнетания;

при движении жидкость не отрывается от внутренней поверхности корпуса и не образуются обратные потоки;

лопатки рабочего колеса погружаются в жидкостное кольцо или касаются его при любом угле поворота рабочего колеса;

осевая составляющая скорости потока жидкости в безлопаточном пространстве мала по величине, локализована в пограничном слое возле торцовых стенок и не влияет существенно на характер течения жидкости.

Быстроту действия ЖКВН определяют по формуле

$$S = \lambda S_r. \quad (9.5)$$

Геометрическая быстрота действия ЖКВН, у которого угол всасывания  $\varphi_{вс} = \pi - 0,5\beta$  ( $\beta$  – угол между лопатками рабочего колеса), с радиальными лопатками колеса и с лопатками, загнутыми вперед, или назад, или наклонными:

$$S_r = f_{\max} z b_0 \psi n = \pi r_2^2 b_0 \psi (1 - v^2) n, \quad (9.6)$$

где  $f_{\max}$  – максимальная площадь рабочей ячейки колеса,  $m^2$ ;  $z$  – число лопаток колеса;  $b_0$  – ширина колеса,  $m$ ;  $\psi$  – коэффициент, учитывающий влияние толщины лопаток;  $n$  – частота вращения колеса,  $s^{-1}$ ;

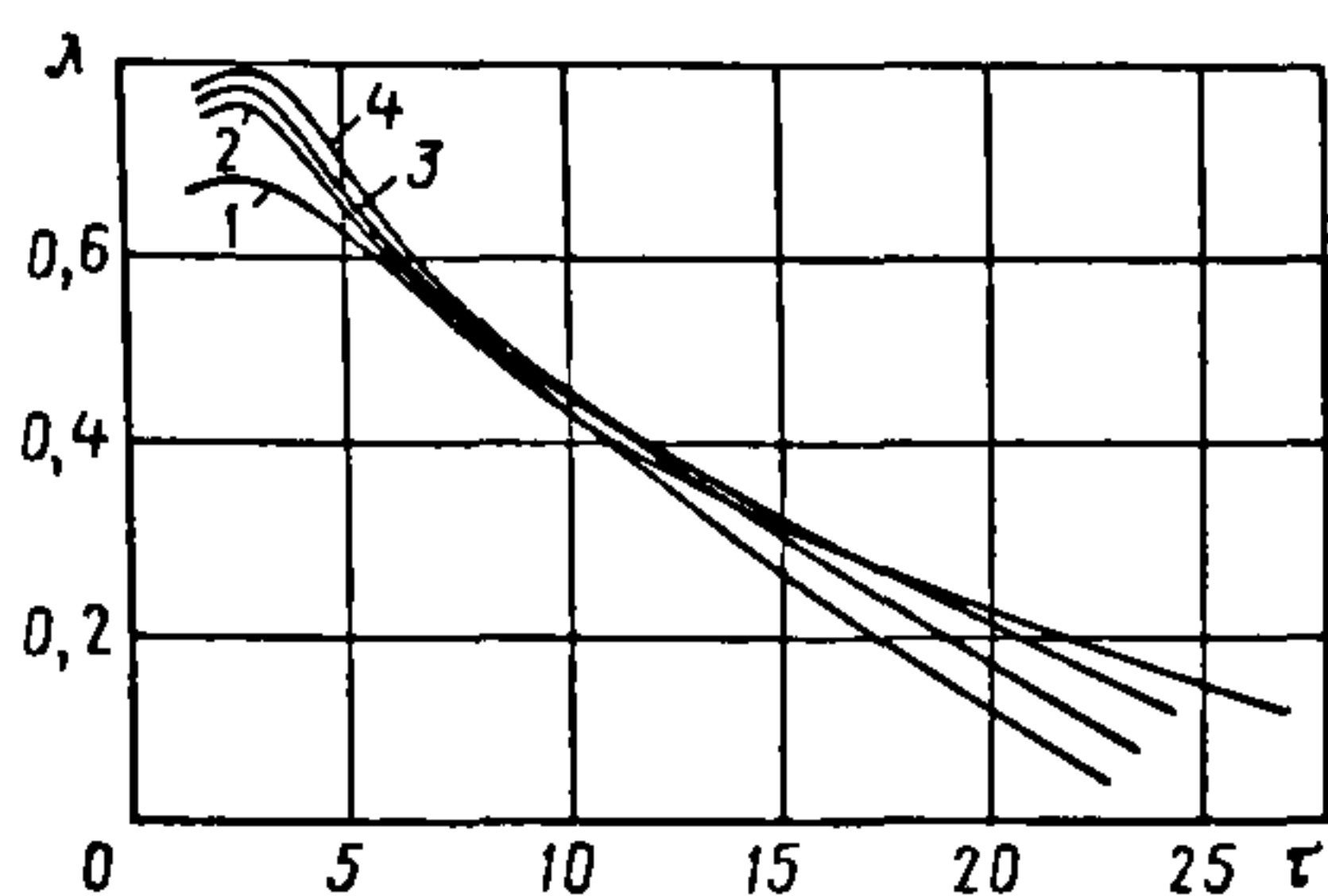


Рис. 9.10. Зависимость коэффициента откачки  $\lambda$  от отношения давлений  $\tau$ :  
1, 2, 3 и 4 – при  $n$  соответственно  
12,5; 14,17; 18,33 и 15,83  $\text{с}^{-1}$

$r_2$  – наружный радиус колеса, м;  $v = r_1/r_2$  ( $r_1$  – средний радиус ступицы колеса, м).

Формула (9.6) получена в предположении, что в пределах рабочей ячейки максимальной площади внутренняя поверхность жидкостного кольца цилиндрическая и описана радиусом  $r_2$ .

Коэффициент откачки  $\lambda$  учитывает уменьшение быстроты действия вакуумного насоса по сравнению с его геометрической быстротой действия, вызванное:

погружением лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо на величину  $a$  в сечении II – II;

перетеканием газа из ячеек сжатия и нагнетания в ячейки всасывания;

натеканием газа в ЖКВН через сальники;

обратным расширением газа, оставшегося в зазоре  $b$  (см. рис. 9.7);

испарением рабочей жидкости в рабочей ячейке на стороне всасывания;

потерей давления во всасывающем тракте ЖКВН;

подогревом газа на всасывании [73].

Для ЖКВН обычно коэффициент откачки  $\lambda = 0,4 \dots 0,8$ . На рис. 9.10 приведена зависимость коэффициента откачки  $\lambda$  вакуумного насоса ВВН1-12 от отношения  $\tau$  давления нагнетания  $p_n$  к давлению всасывания  $p$  для различной частоты вращения  $n$  вала.

При расчете ЖКВН геометрические размеры необходимо подбирать таким

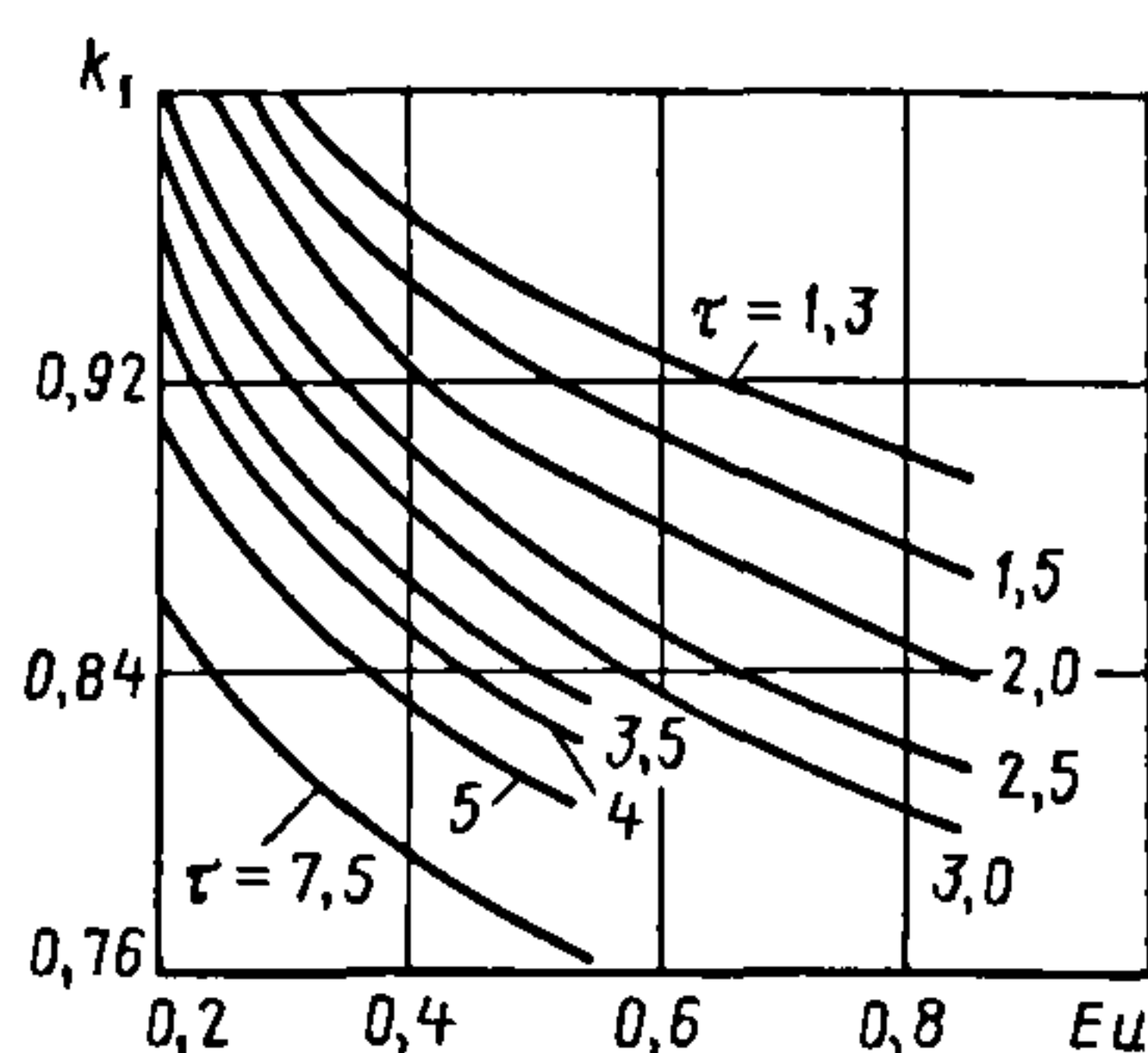


Рис. 9.11. Зависимость коэффициента  $k_1$  от критерия  $Eu$

образом, чтобы они обеспечивали не только заданную быстроту действия, но и погружение лопаток в жидкостное кольцо на глубину  $a = r_2 - r_{22}$  (см. рис. 9.9), где  $r_{22}$  – радиус-вектор жидкостного кольца в сечении II–II. Значение  $a$  выбирают в пределах  $(0,01 \dots 0,015)r_2$ , что для ЖКВН составляет 1...7 мм. В противном случае возможен выход лопаток из жидкостного кольца при падении давления рабочей жидкости в сети. Это ведет к увеличению мощности и шума при работе ЖКВН.

$$r_{22} = r_2 [v^2/k_1^2 + 4\zeta\epsilon k_2/\psi + 2\zeta\delta(k_2 - 0,5)/\psi]^{0,5}, \quad (9.7)$$

где  $k_1 = r_1/(r_1 + d)$  (здесь  $d$  – зазор между ступицей колеса и внутренней поверхностью жидкостного кольца в сечении I–I, м);  $\zeta = b_0/b$  ( $b$  – ширина корпуса ЖКВН, м);  $\epsilon = e/r_2$  ( $e$  – эксцентриситет, м);  $k_2 = v_{II-II \text{ ср}}/u_2$  ( $v_{II-II \text{ ср}}$  – средняя скорость течения жидкости в безлопаточном пространстве сечения II – II, м/с;  $u_2 = 2\pi r_2 n$  – окружная скорость на периферии колеса, м/с);  $\delta = \Delta/r_2$  ( $\Delta$  – минимальный зазор между корпусом и колесом ЖКВН, м).

Выражение (9.7) имеет физический смысл в интервале  $r_1 \leq r_{22} \leq r_2$ . Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  определяют экспериментально [73].

Зависимость коэффициента  $k_1$  от критерия Эйлера  $Eu = (p_n - p)/\rho_j u_2^2$  (где  $\rho_j$  – плотность рабочей жидкости при температуре жидкостного кольца,  $\text{кг/м}^3$ ) приведена на рис. 9.11.



Зависимость получена на вакуумном насосе, имеющем колесо с цилиндрической ступицей; выходные углы наклона лопаток колеса  $\beta_2 = 90, 135$  и  $150^\circ$ , относительные геометрические размеры:  $v = 0,5$ ;  $\delta = 0,0083$ ;  $\varepsilon = 0,153$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\psi = 0,75$ . При рабочих температурах плотность рабочей жидкости изменялась от 980 до 1043 кг/м<sup>3</sup>, вязкость – от 1,002 до 37,8 мПа·с. Частоту вращения вала поддерживали в пределах 20...32,5 с<sup>-1</sup>, что соответствовало окружной скорости на периферии колеса  $u_2 = 11,3...18,37$  м/с.

Скоростной коэффициент

$$k_2 = \{[(1 - v^2 + \zeta\delta/\psi)\psi]/[2\zeta(2\varepsilon + \delta)]\} \times \{[(8,37 - 0,465 \operatorname{ctg} \beta_2)\varepsilon - 0,485] - 3,59 \mu_{ж}\}, \quad (9.8)$$

где  $\mu_{ж}$  – динамическая вязкость, Па·с, рабочей жидкости при температуре жидкостного кольца.

Эта эмпирическая зависимость справедлива при  $\mu_{ж} = 1,002...78,5$  мПа·с и  $\rho_{ж} = 980...1050$  кг/м<sup>3</sup>.

При расчете коэффициента  $k_2$  вязкость рабочей жидкости определяют по температуре  $T_{ж.к}$  жидкости в жидкостном кольце.

Температуру  $T_{ж.к}$  находят из уравнения

$$N_1 = N_{II} + N_{III} + N_{IV},$$

где  $N_1$  – мощность, подводимая к ЖКВН;  $N_{II}$  – мощность, отводимая от ЖКВН рабочей жидкостью;  $N_{III}$  – мощность, отводимая от ЖКВН газом;  $N_{IV}$  – мощность, отводимая от ЖКВН в результате теплообмена между поверхностью вакуумного насоса и окружающей средой.

Экспериментально показано, что сумма  $N_{III} + N_{IV}$  составляет 10 % от мощности  $N_e$  на валу ЖКВН, а  $N_1$  с достаточной точностью можно принять равной  $N_e$ . Мощность, отводимая от ЖКВН рабочей жидкостью, кВт:

$$N_{II} = G_{ж} c_{ж} (T_{ж.к} - T_{ж.в}),$$

где  $G_{ж}$  – массовый расход жидкости через жидкостное кольцо, кг/с;  $c_{ж}$  – средняя удельная теплоемкость рабочей жидкости,

Дж/(кг·К);  $T_{ж.в}$  – температура рабочей жидкости на входе в жидкостное кольцо, К.

Тогда

$$T_{ж.к} = (0,9N_e + G_{ж} c_{ж} T_{ж.в}) / G_{ж} c_{ж}. \quad (9.9)$$

На глубину  $a$  погружения лопатки наибольшее влияние оказывает относительный эксцентриситет  $\varepsilon$ : при увеличении  $\varepsilon$  погружение лопаток в жидкостное кольцо уменьшается, при уменьшении  $\varepsilon$  глубина  $a$  увеличивается.

Эффективная мощность на валу ЖКВН определяется мощностью, затрачиваемой на сжатие; мощностью, затрачиваемой на перемещение жидкостного кольца (мощность гидродинамических потерь), и мощностью, затрачиваемой на преодоление трения в сальниках и подшипниках. Для определения степени энергетического совершенства ЖКВН используют изотермический КПД, так как процесс сжатия газа в ЖКВН близок к изотермическому. Эффективная мощность на валу ЖКВН

$$N_e = N_{из} / \eta_{из}, \quad (9.10)$$

где  $N_{из} = p S_f \ln \tau$  – изотермическая мощность сжатия газа;  $\eta_{из}$  – изотермический КПД.

Для ЖКВН  $\eta_{из} = 0,30...0,5$ . Такие низкие значения КПД объясняются тем, что мощность, затрачиваемая на вращение жидкостного кольца, составляет 50...60 % от эффективной мощности [73]. На рис. 9.12 приведены экспериментальные зависимости  $\eta_{из}$  от отношения давлений  $\tau$  для вакуумного насоса ВВН1-12 при различной частоте вращения вала.

Основные геометрические размеры ЖКВН определяют по формуле (9.6), предварительно задавшись коэффициентом откачки  $\lambda$ , основными конструктивными соотношениями: значениями  $v$  и  $\zeta$ , окружной скоростью на периферии рабочего колеса  $u_2$  и коэффициентом  $\psi$ . Для литых колес  $\psi = 0,65...0,85$ , для сварных колес с лопатками из листовой стали значение  $\psi$  обычно больше. Определив  $r_2$ ,  $b_0$ ,  $r_1$ ,  $n$ , рассчитывают радиус  $r_{22}$  по формуле (9.7).

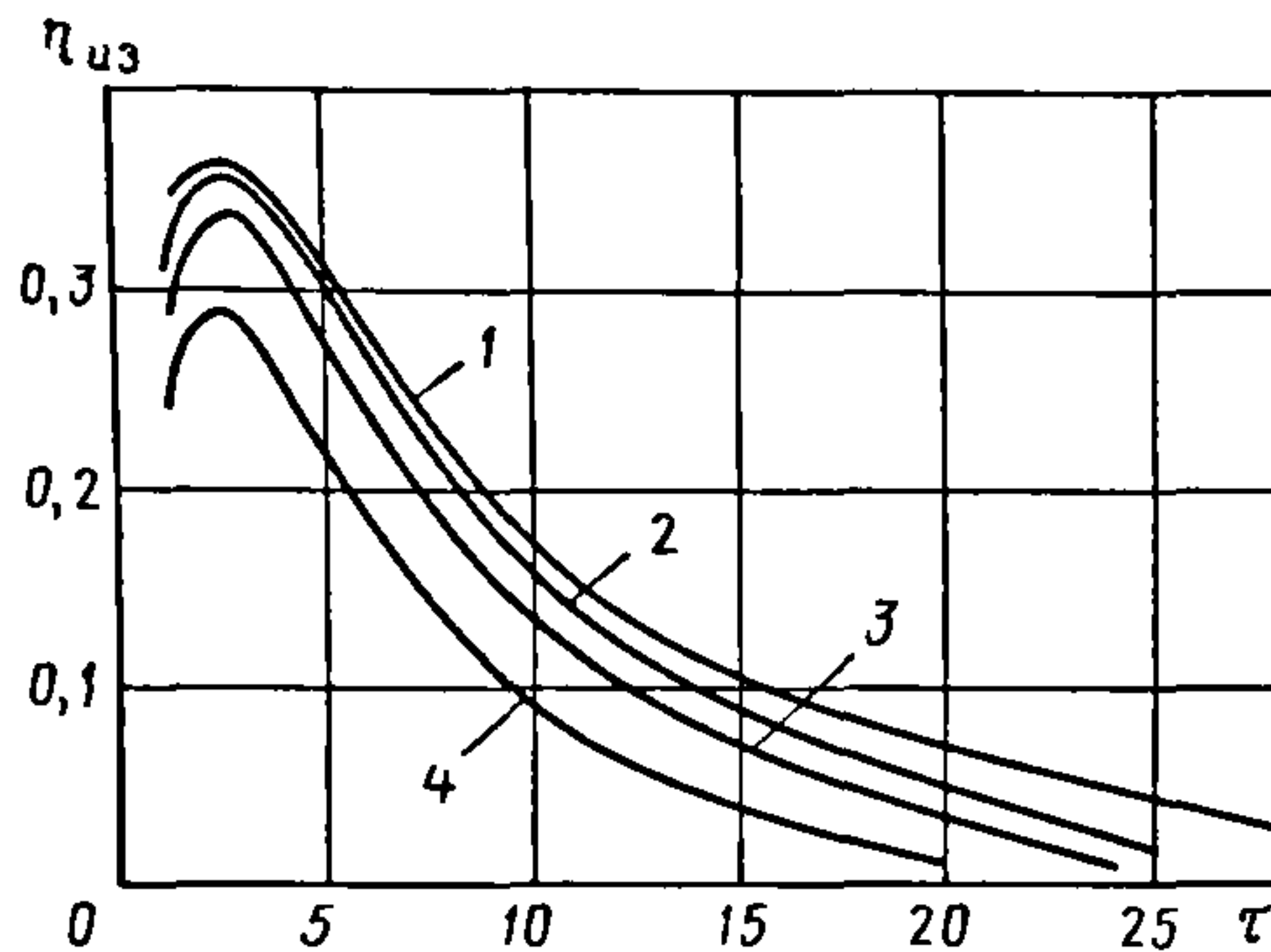


Рис. 9.12. Зависимость изотермического КПД  $\eta_{из}$  от отношения давлений  $\tau$ :  
1, 2, 3 и 4 — при  $n$  соответственно 12,5; 14,17; 15,83 18,33  $\text{с}^{-1}$

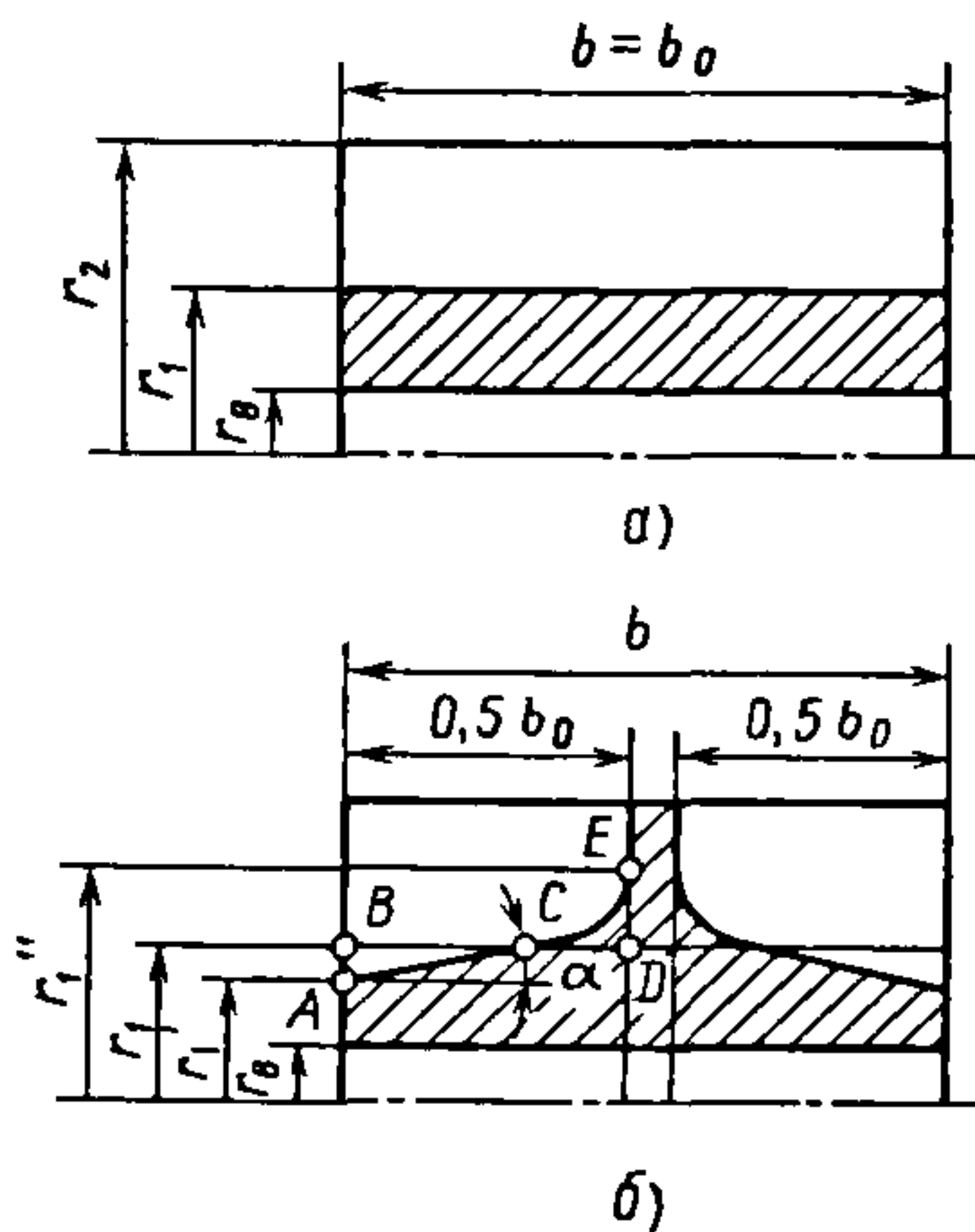


Рис. 9.13. Рабочее колесо без ребра жесткости (а) и с ребром жесткости (б)

При этом необходимо задаться следующими основными конструктивными соотношениями: относительным эксцентриситетом  $\epsilon = e/r_2$ , выходным углом наклона лопаток рабочего колеса  $\beta_2$  и относительной шириной  $\zeta = b/b_0$ . Для колес без ребра жесткости (рис. 9.13, а)  $\zeta = 1$ , для колес с ребром жесткости (рис. 9.13, б)  $\zeta = 1,03 \dots 1,04$ .

Если при расчете не достигнуто требуемое погружение лопаток в жидкостное кольцо в сечении II–II,  $a = 1 \dots 7$  мм (см. рис. 9.9), то изменяют относительный экс-

центриситет  $\epsilon$ , относительный радиус ступицы колеса  $v$  или относительный зазор  $\delta$ .

Относительный эксцентриситет  $\epsilon = e/r_2$  значительно влияет на изотермический КПД  $\eta_{из}$  и удельную мощность  $N_{уд} = N_e/S$ .

При уменьшении относительного эксцентриситета из-за увеличения погружения лопаток в кольцо в сечении II – II производительность и, следовательно, эффективная мощность уменьшаются. Но так как последняя уменьшается значительно медленнее, чем производительность, то удельная мощность возрастает, а изотермический КПД снижается.

При увеличении относительного эксцентриситета в результате выхода лопаток из жидкостного кольца  $N_{уд}$  растет, а  $\eta_{из}$  уменьшается вследствие не только снижения производительности, но и возрастания эффективной мощности, что связано с затратами мощности на удар при входе лопаток в кольцо.

Из этого следует, что существует оптимальное значение относительного эксцентриситета, при котором удельная мощность минимальна, а КПД максимален. Теоретически это возможно, когда глубина  $a$  погружения лопаток в жидкостное кольцо и зазор  $d$  равны нулю. Однако при проектировании ЖКВН стремятся обеспечить гарантированное погружение лопаток в жидкостное кольцо, чтобы при возможных колебаниях давления жидкости в сети лопатки из него не выходили.

При предварительных расчетах принимают относительный эксцентриситет  $\epsilon = 0,15 \dots 0,125$ . Окончательно  $\epsilon$  рассчитывают из условия соблюдения глубины  $a$  погружения лопаток в жидкостное кольцо.

Относительный зазор  $\delta = \Delta/r_2$  выбирают на основе экспериментальных данных в пределах  $0,011 \dots 0,03$ . При уменьшении относительного зазора возрастают гидравлические потери в зазоре между корпусом и ротором. Увеличение относительного зазора при неизменном относительном эксцентриситете может привести к выходу лопаток из жидкостного кольца.



Относительный радиус  $v = r_1/r_2$  ступицы колеса принимают в пределах 0,4...0,55. При  $v \geq 0,5$  увеличиваются размеры насоса, при  $v < 0,4$  возникает трудность размещения вала необходимого диаметра в ступице колеса.

Относительную длину колеса  $\chi = b_0/r_2$  на основе экспериментальных исследований выбирают в пределах 1,3...2,2.

Угол наклона ступицы колеса  $\alpha$  (рис. 9.13, б) принимают в пределах 7...10°, так как расстояние между жидкостным кольцом и ступицей в центре колеса больше, чем у торцов. При такой форме внутренней поверхности жидкостного кольца выполнение ступицы наклонной приводит к тому, что в зазоре  $b$  (см. рис. 9.7) остается меньше газа, а следовательно, увеличивается производительность по сравнению с ее значением для ЖКВН, имеющего рабочее колесо с цилиндрической ступицей (см. рис. 9.13, а).

Выходной угол  $\beta_2$  наклона лопаток колеса выбирают в пределах 135...150°, что объясняется рядом причин.

Газ в ЖКВН сжимается и выталкивается в нагнетательное окно благодаря энергии, которую получает от жидкостного кольца. К последнему энергия подводится от колеса на стороне всасывания ( $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ ) в виде кинетической энергии, которая пропорциональна квадрату абсолютной скорости жидкости на выходе из колеса  $c_2$ . Абсолютная скорость  $c_2$  максимальна при лопатках, загнутых вперед ( $\beta_2 > 90^\circ$ ) (рис. 9.14).

Такие лопатки можно выполнять прямыми и плавно изогнутыми по радиусу. Как показывают результаты экспериментальных исследований, ЖКВН с колесами, имеющими плавно изогнутые по радиусу лопатки, при прочих равных размерах обладают большей производительностью и большим изотермическим КПД.

В лопаточном пространстве жидкостного кольца жидкость совершает сложное движение. При выходе с лопатки колеса она движется в переносном движении со скоростью  $u_2$  (см. рис. 9.9),

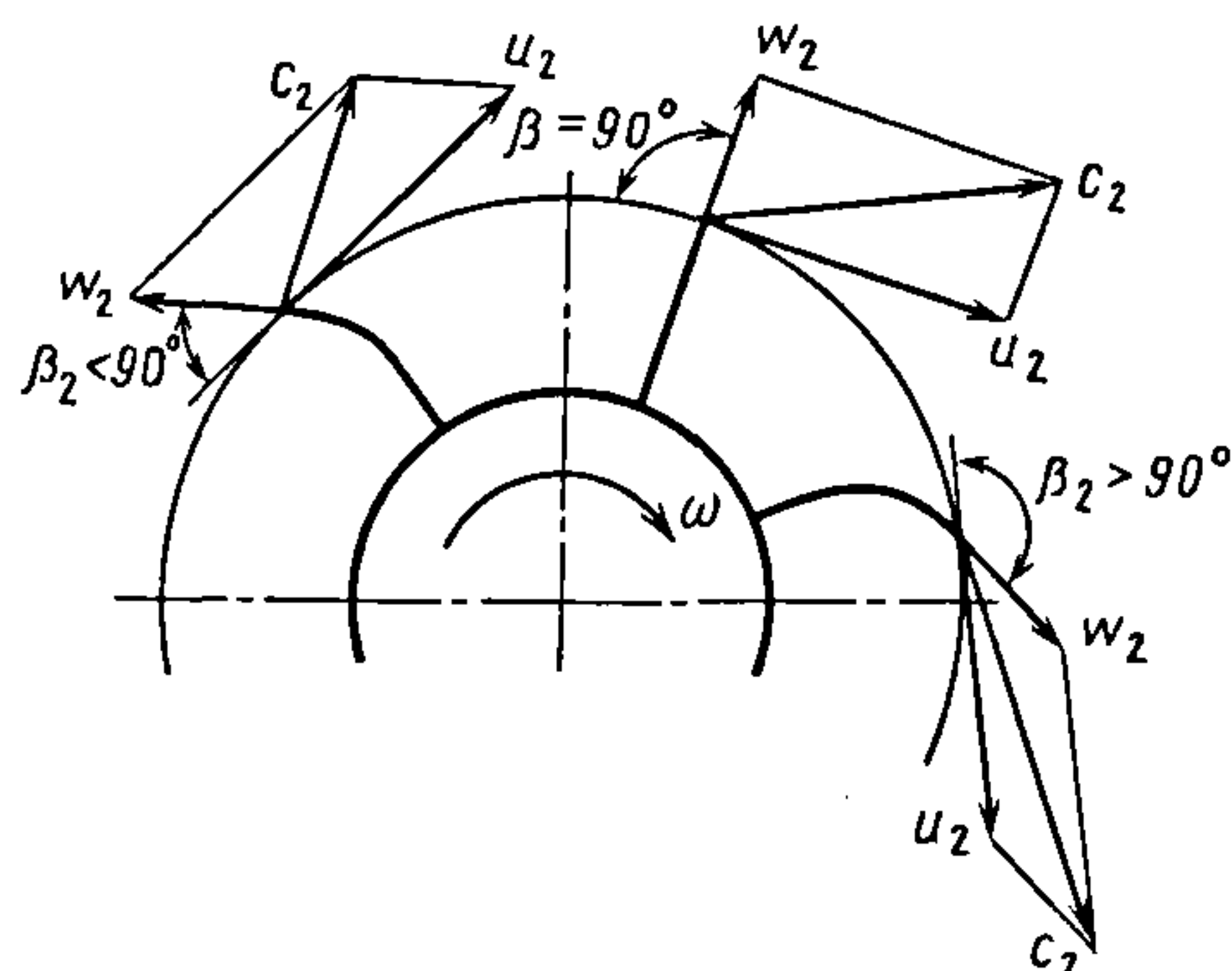


Рис. 9.14. Схема определения абсолютной скорости жидкости  $c$  при различном выходном угле  $\beta_2$  наклона лопаток рабочего колеса

в относительном — со скоростью  $w_2$ ; абсолютная скорость жидкости равна  $c_2$ . Траектории  $B$  движения жидкости в безлопаточном пространстве в первом приближении можно принять эквидистантными радиусу  $R$  корпуса. Тогда в той же точке  $A$  жидкостного пространства жидкость должна иметь скорость  $v_2$ , направленную по касательной к траектории  $B$  своего движения. Разность скоростей  $c_2$  и  $v_2$  дает скорость  $w_r$ . Наличие радиальной скорости  $w_r$  приводит к образованию вихрей и пены при выходе жидкости с лопаток в безлопаточное пространство, что увеличивает потери мощности. На стороне всасывания ( $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ ) скорость  $w_r$  минимальна при  $\beta_2 = 135...150^\circ$ , что уменьшает мощность гидродинамических потерь, эффективную и удельную мощности (рис. 9.15).

Окружная скорость  $u_2 = 2\pi r_2 n$  на периферии рабочего колеса ограничена устойчивостью жидкостного кольца, а также возникновением кавитационных явлений. Минимальная скорость  $u_{2\min}$ , при которой образуется устойчивое жидкостное кольцо, находится из уравнения

$$(p_n - p)10^{-4} = K_c \left[ (u_{2\min}^2 / g) - 2\omega^2 e' r_0 / (\pi g \operatorname{tg} \beta_2) \right], \quad (9.11)$$

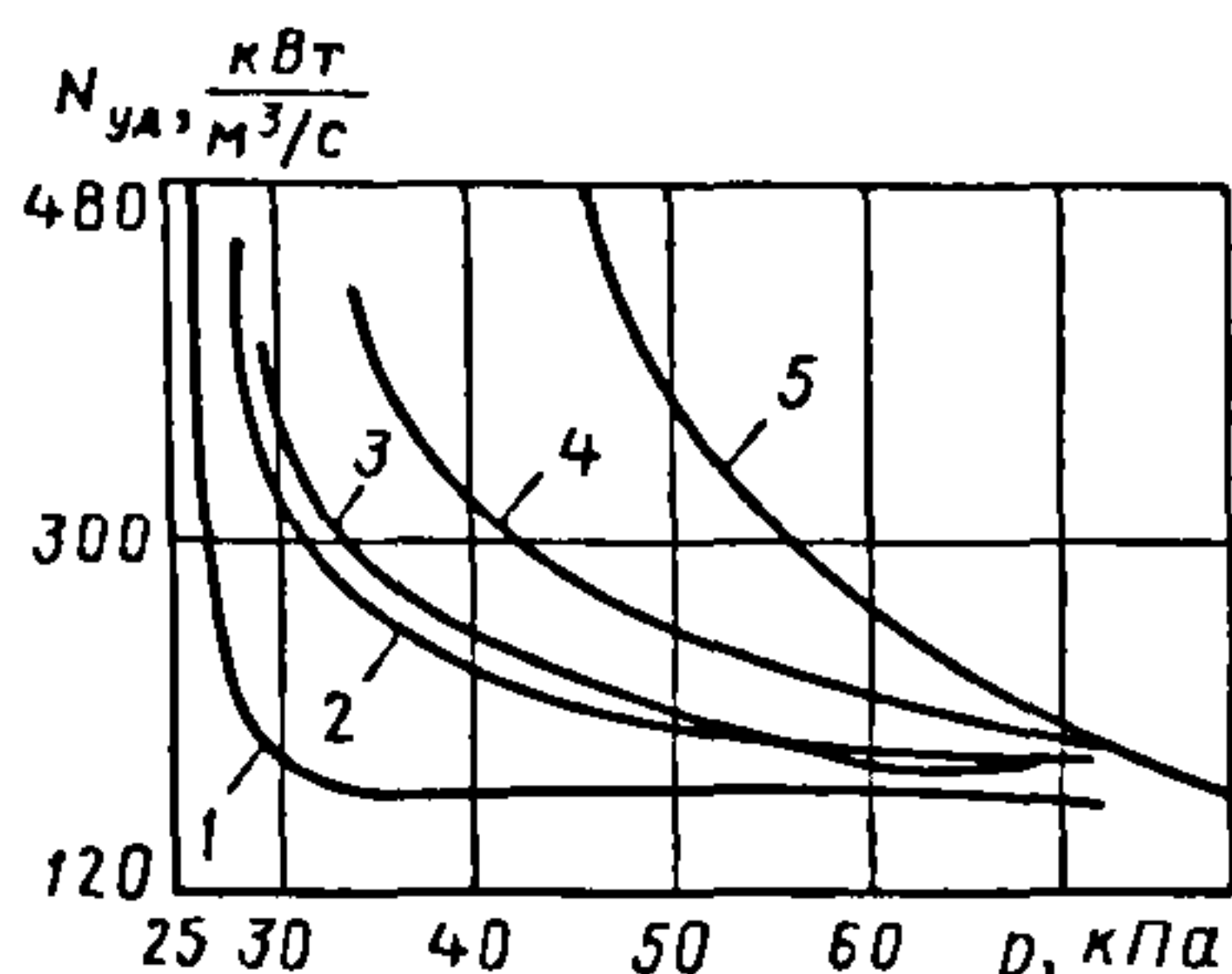


Рис. 9.15. Зависимость удельной мощности  $N_{уд}$  ЖКВН ( $p_n = 96$  кПа; рабочая жидкость — вода) от давления всасывания  $p$  при различном выходном угле  $\beta_2$  наклона лопаток рабочего колеса:

1, 2, 3, 4 и 5 — при  $\beta_2$ , соответственно равном 150; 135; 90; 168 и 45°.

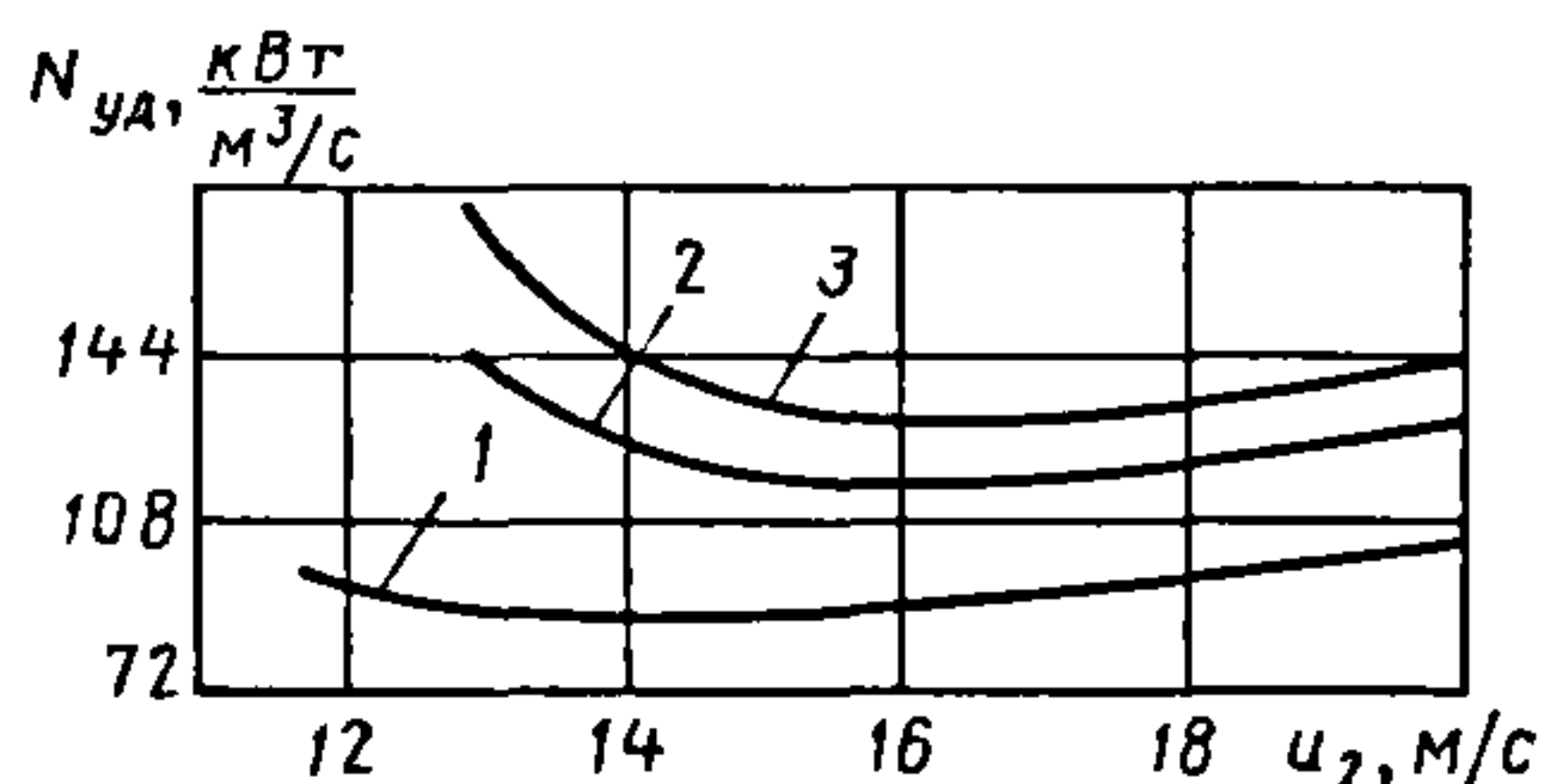


Рис. 9.16. Зависимость удельной мощности  $N_{уд}$  ЖКВН ( $p = 26,6$  кПа;  $p_n = 98$  кПа) от окружной скорости  $u_2$  на периферии рабочего колеса для рабочих жидкостей с различной вязкостью:

1 — воды; 2 — дибутилфталата; 3 — масла ВМ-4

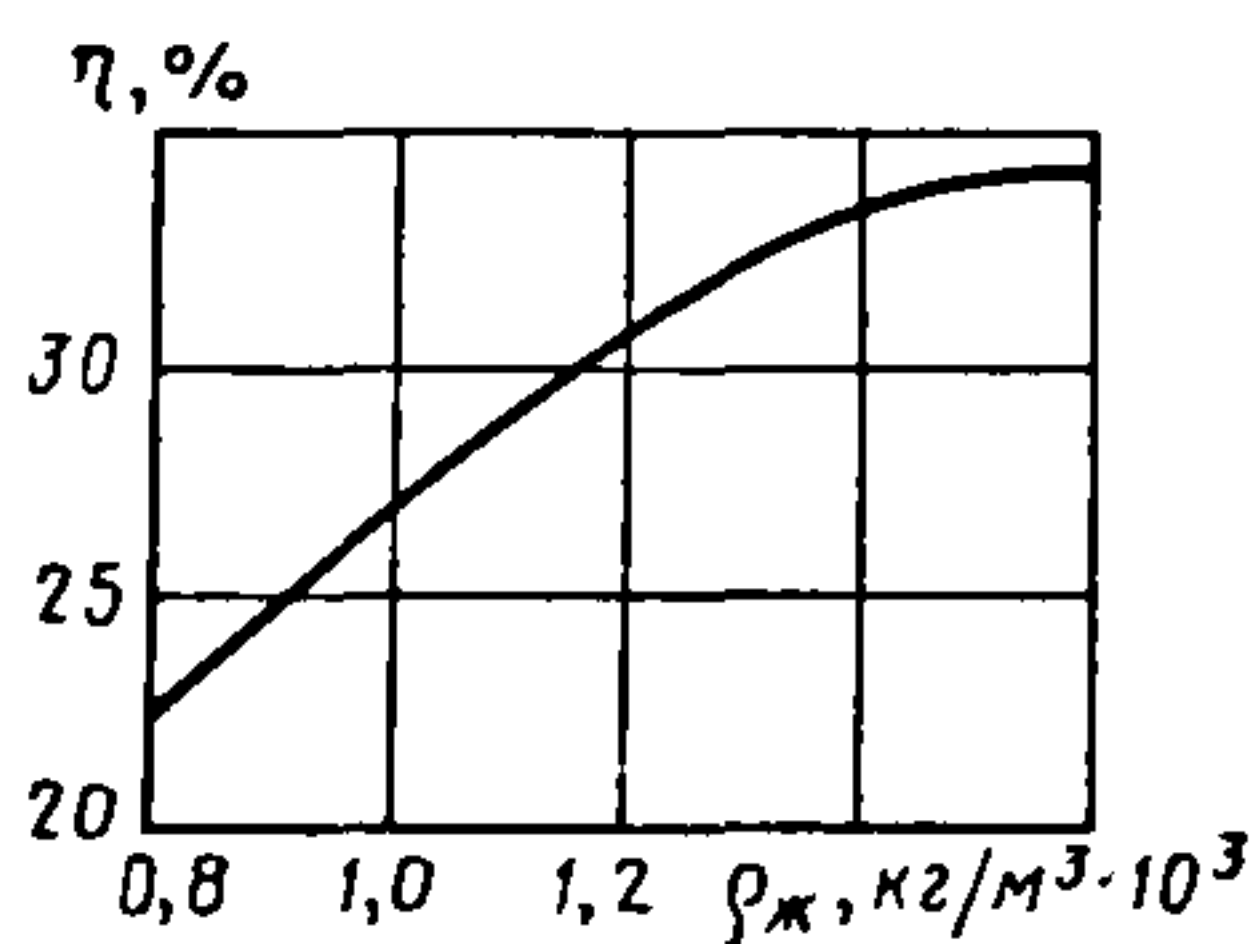


Рис. 9.17. Зависимость КПД ЖКВН от плотности рабочей жидкости

где  $p_n$  и  $p$  — соответственно давление на нагнетании и на всасывании, Па;  $K_c = 0,6 \dots 0,65$  — коэффициент;  $g = 9,81$  — ускорение свободного падения, м/с²;  $\omega = 2\pi n$  — угловая скорость колеса, с⁻¹;  $e' = [r_{22} - (r_1 + d)]/2$ , м;  $r_o = [r_{22} + (r_1 + d)]/2$ , м.

Зависимость удельной мощности  $N_{уд}$  от скорости  $u_2$  имеет минимум. Оптимальные значения  $u_2$  (когда удельная мощность минимальна) зависят от режима работы вакуумного насоса (давлений  $p$  и  $p_n$ ), угла  $\beta_2$  и вязкости рабочей жидкости.

При увеличении вязкости рабочей жидкости (масло ВМ-4 —  $\mu_{ж} = 37,8$  мПа·с,  $\rho_{ж} = 980$  кг/м³; дибутилфталат  $\mu_{ж} = 10,02$  мПа·с,  $\rho_{ж} = 1043$  кг/м³; вода —  $\mu_{ж} = 1,002$  мПа·с,  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м³) удельная мощность увеличивается (рис. 9.16).

С увеличением вязкости оптимальное значение скорости  $u_2$ , м/с, возрастает от 13,5 для воды до 15,5 для дибутилфталата и 16,5 м/с для масла ВМ-4 при  $\tau = p_n/p = 3,7$ .

Аналогичная зависимость сохраняется и для других  $\tau$ . В то же время при постоянном угле  $\beta_2$  и постоянной вязкости  $\mu_{ж}$  с увеличением  $\tau$  оптимальное значение скорости  $u_2$  возрастает. Так, например, по экспериментальным данным, для  $\beta_2 = 150^\circ$  и  $\mu_{ж} = 10,02$  мПа с увеличением  $\tau$  от 1,8 до 2,5 оптимальное значение скорости  $u_2$  повышается от 14 до 15,5 м/с [73].

**Физические свойства и температура жидкости.** Такие свойства рабочей жидкости, как плотность и вязкость, значительно влияют на характеристики ЖКВН. Увеличение плотности рабочей жидкости дает повышение производительности и мощности. Однако рост производительности опережает рост мощности, а это приводит к тому, что при увеличении плотности КПД возрастает, хотя и незначительно (рис. 9.17).

Использование рабочих жидкостей с вязкостью больше вязкости воды вызывает уменьшение производительности и увеличение эффективной мощности; в результате возрастает удельная мощность (см. рис. 9.16) и уменьшается КПД ЖКВН.

Для уменьшения влияния вязкости на КПД необходимо при ее повышении увеличивать относительный эксцентриситет так, чтобы глубина погружения лопаток в жидкостное кольцо не превышала 2...7 мм; окружную скорость на периферии



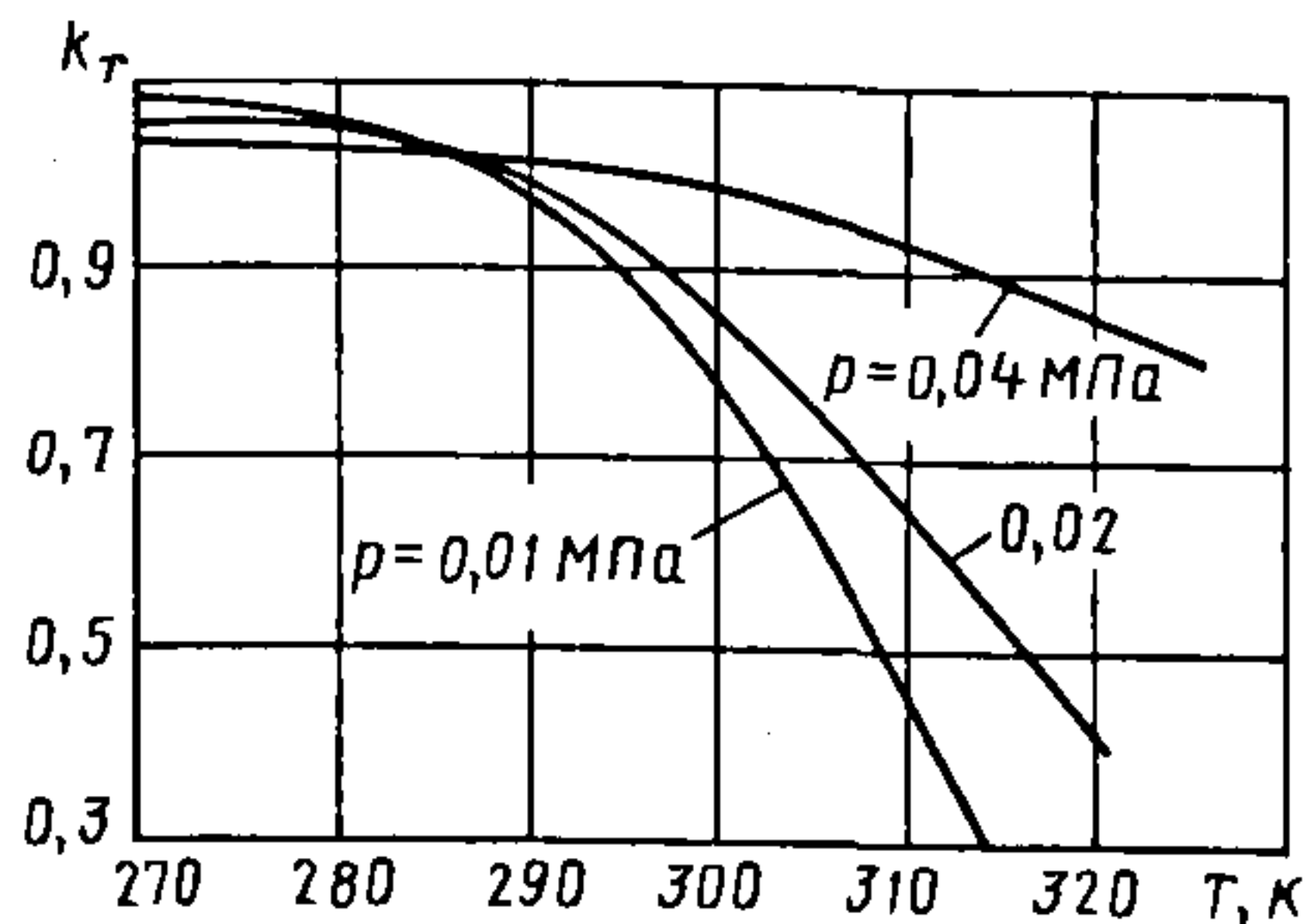


Рис. 9.18. Зависимость температурного фактора  $k_T$  от температуры  $T$  рабочей жидкости на входе в ЖКВН

рабочего колеса повышать от 12...16 м/с для воды до 15...20 м/с для рабочей жидкости с вязкостью порядка 40 мПа·с.

С понижением температуры рабочей жидкости производительность увеличивается, а давление всасывания уменьшается. На рис. 9.18 приведена зависимость температурного фактора  $k_T$  (необходимого для пересчета быстроты действия одноступенчатых вакуумных насосов) от температуры воды, подводимой в ЖКВН.

Быстрота действия

$$S = S_{288} k_T, \quad (9.12)$$

где  $S_{288}$  – быстрота действия ЖКВН при температуре 288 К;  $k_T$  – температурный фактор.

Зависимость остаточного давления  $p_0$  от температуры воды на входе  $T_{ж.в}$  для одноступенчатых (кривая 1) и двухступенчатых (кривая 2) ЖКВН дана на рис. 9.19 (по данным фирмы ChamVac Pumps, Великобритания).

Внутренняя кромка всасывающих и нагнетательных окон описывается радиусом  $r$  (см. рис. 9.13, а) в насосах, имеющих колеса с цилиндрической ступицей, или радиусом  $r_1$  (рис. 9.13, б) в насосах с колесами с наклонной ступицей. Радиус  $r_1$  определяется из условия равенства площадей треугольников  $ABC$  и  $CED$ . В первом приближении внешняя кромка окон может быть описана (см. рис. 9.9) радиусом

$$r_0 = 0,5 [(r_1 + d) + (r_2 - a)], \quad (9.13)$$

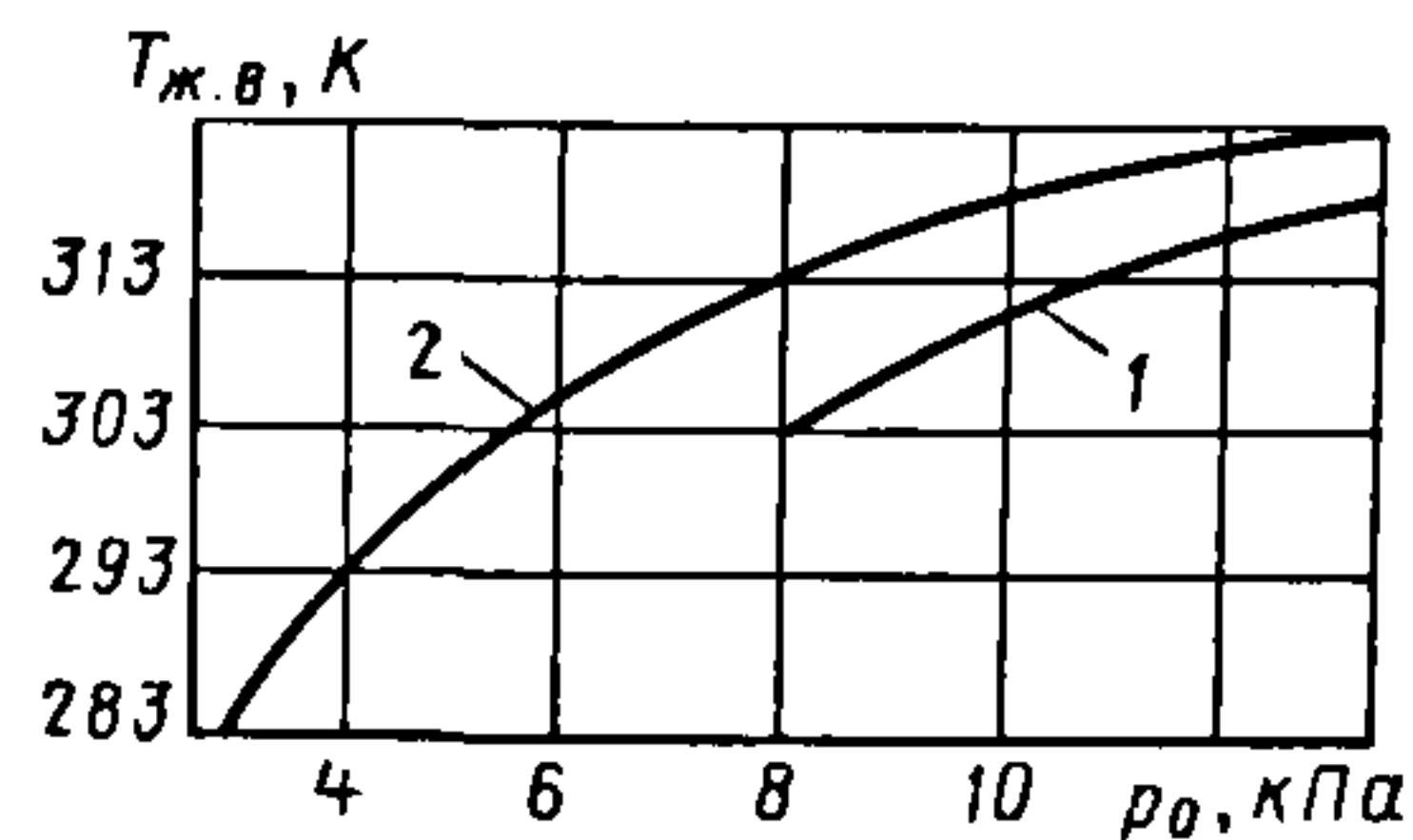


Рис. 9.19. График к определению остаточного давления  $p_0$  по температуре  $T_{ж.в}$  воды на входе одноступенчатых (кривая 1) и двухступенчатых (кривая 2) ЖКВН

определяющим усредненную форму внутренней поверхности жидкостного кольца, эксцентриситет которой  $e' = 0,5 [(r_2 - a) - (r_1 + d)]$ . Угол открытия всасывающего окна  $\phi_0$  выбирают в пределах  $(2...3)\beta$ , а его угол закрытия равен  $\phi_{вс} = 180^\circ - 0,5\beta$ . Угол закрытия нагнетательного окна принимают  $\phi_2 = (1,0...1,5)\beta$ . Угол  $\phi_{сж}$  открытия нагнетательного окна зависит от отношения давлений  $\tau$  ( $\phi_{сж}$  рассчитывают таким образом, чтобы давление в рабочей ячейке, которая в следующее мгновение раскроется в нагнетательное окно, было равно давлению нагнетания). Тогда, предположив, что форма внутренней поверхности жидкостного кольца цилиндрическая и описана радиусом

$$\rho = e' \cos(\theta - \pi) + [r_0^2 - (e')^2 \sin^2(\theta - \pi)]^{0,5},$$

можно рассчитать площадь текущей рабочей ячейки  $f_\theta = \pi[(\rho)^2 - r_1^2]/2$  и определить отношение  $\tau$  давления в текущей рабочей ячейке к давлению всасывания как  $\tau = f_{\max}/f_\theta$ .

Далее строится зависимость  $\tau$  от угла поворота колеса  $\theta$  и находится угол  $\phi'_{сж}$  (рис. 9.20). Угол  $\phi_{сж} = (\pi + \phi'_{сж}) + \beta/2$ .

При давлении всасывания  $p = 15,5...2,5$  кПа, если требуется откачивать агрессивные, взрывоопасные, запыленные, легковоспламеняющиеся и разлагающиеся газы или исключается загрязнение откачиваемых объемов парами масла, целесообразно применять двухступенчатые ЖКВН, при создании которых важно правильно выбрать промежуточное давление.

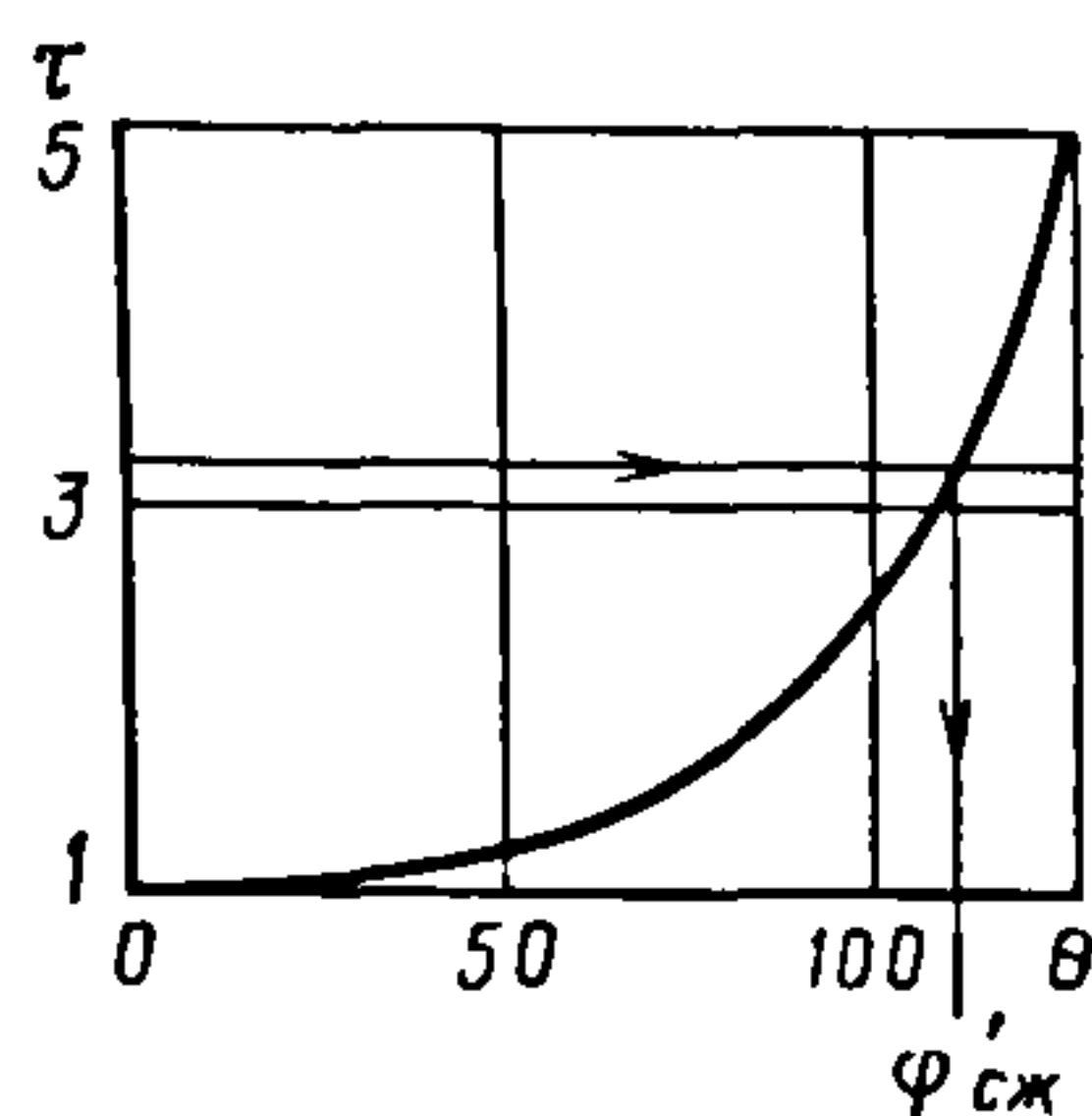


Рис 9.20. Зависимость отношения давлений  $\tau$  от угла поворота колеса  $\varphi'_{сж}$

Промежуточное давление можно приблизительно рассчитать по формуле

$$\tau_1 = 4,19 + 0,07\tau_{уст}, \quad (9.14)$$

где  $\tau_1$  — отношение давления нагнетания к давлению всасывания первой ступени;  $\tau_{уст}$  — отношение давления нагнетания двухступенчатого ЖКВН к его давлению всасывания.

Используя экспериментальные данные, можно оценить коэффициент откачки первой ступени по зависимости

$$\lambda = 0,9941 - 0,0124u_2 + 0,0069p - 0,0251\tau$$

и изотермический КПД первой ступени по зависимости

$$\eta_{из1} = e^{-1,816u_2^{-1,196}p^{0,942}\tau^{0,656}}.$$

Максимальная ошибка при расчете по этим формулам не превышает 10 %.

После определения отношения давлений в каждой ступени их рассчитывают

отдельно по методике расчета одноступенчатых ЖКВН. При этом, если обе ступени выполнены в одном корпусе, рекомендуется из конструктивных соображений радиусы  $r_2$  колес первой и второй ступеней выбирать одинаковыми.

Однако если стремятся получить максимальный КПД, скорость  $u_2$  на периферии колеса первой ступени следует выбирать меньше скорости  $u_2$  на периферии колеса второй ступени приблизительно в 1,2–1,25 раза [73].

**Конструкции и характеристики вакуумных насосов и установок.** Технические характеристики ВВН, выпускаемых в РФ, приведены в табл. 9.2 [14; 15].

Условное обозначение водокольцевых вакуумных насосов (ВВН) расшифровывают следующим образом: В — водокольцевой, В — вакуумный, Н — насос. Цифры перед буквами обозначают номер модификации. Цифры после букв перед дефисом — это исполнение насоса, которое определяет абсолютное давление всасывания при номинальной производительности: 1 — давление всасывания 0,04 МПа, 2 — давление всасывания 0,02 МПа. Цифры после дефиса определяют производительность вакуумного насоса в кубических метрах в минуту.

## 9.2. Технические характеристики ВВН, выпускаемых в России

Параметр	ВВН-0,3	ВВН-2	3ВВН1-3	2ВВН1-6	2ВВН1-12	2ВВН1-25	2ВВН2-50
Производительность, м <sup>3</sup> /мин, приведенная к температуре 288 К и начальному давлению:							
40 кПа (300 мм рт.ст.)	0,3	1,8	3	6	12	25	45
20 кПа (150 мм рт.ст.)	—	—	—	—	—	—	—
Мощность электродвигателя, кВт	1,1	5,5	5,5	11	22	55	110
Расход воды, дм <sup>3</sup> /мин	2	6	8	12	35	45	75
Масса, кг	20	80	135	400	900	2100	2750



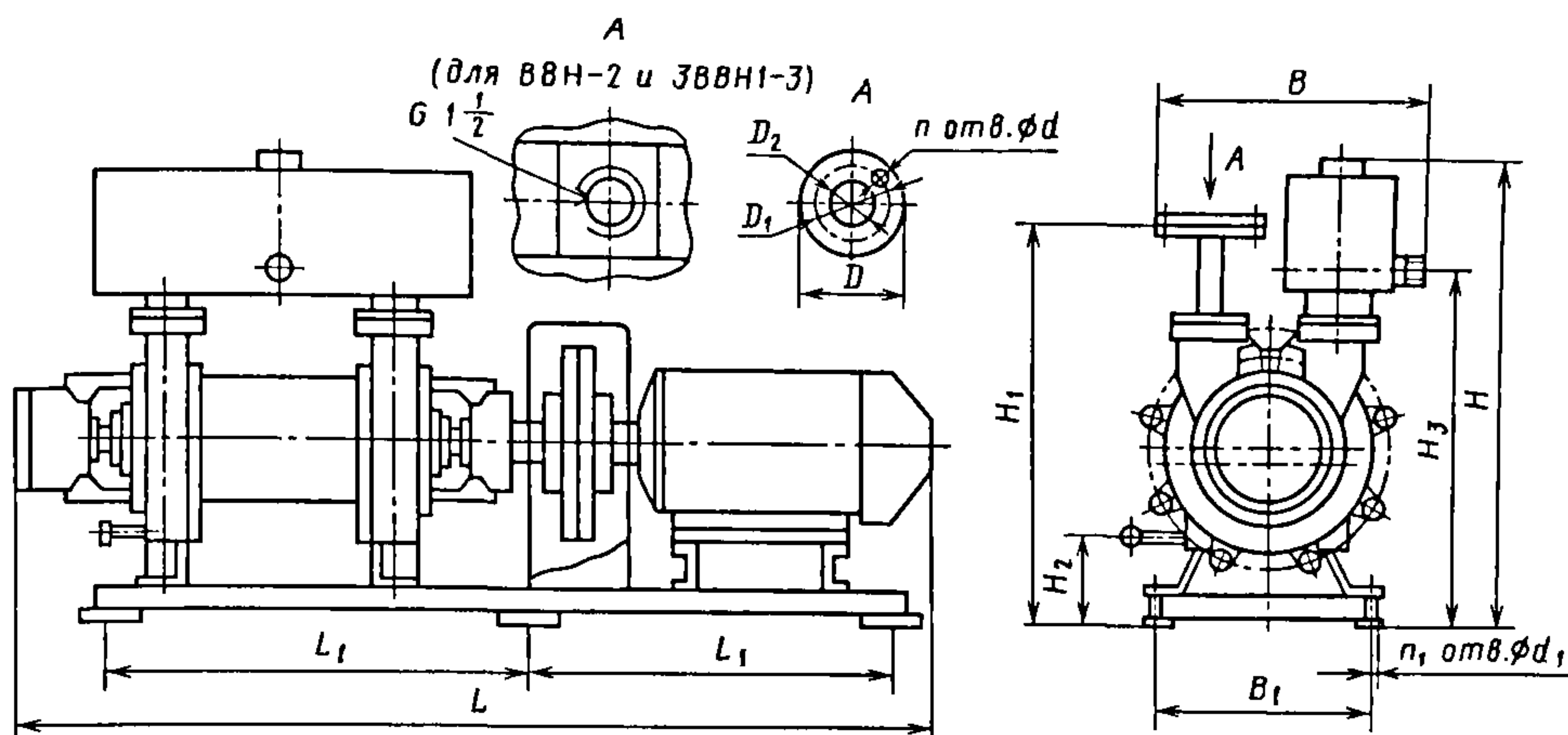


Рис. 9.21. Насосы ВВН-2, 3ВВН1-3, 2ВВН1-6, 2ВВН1-12, 2ВВН1-25

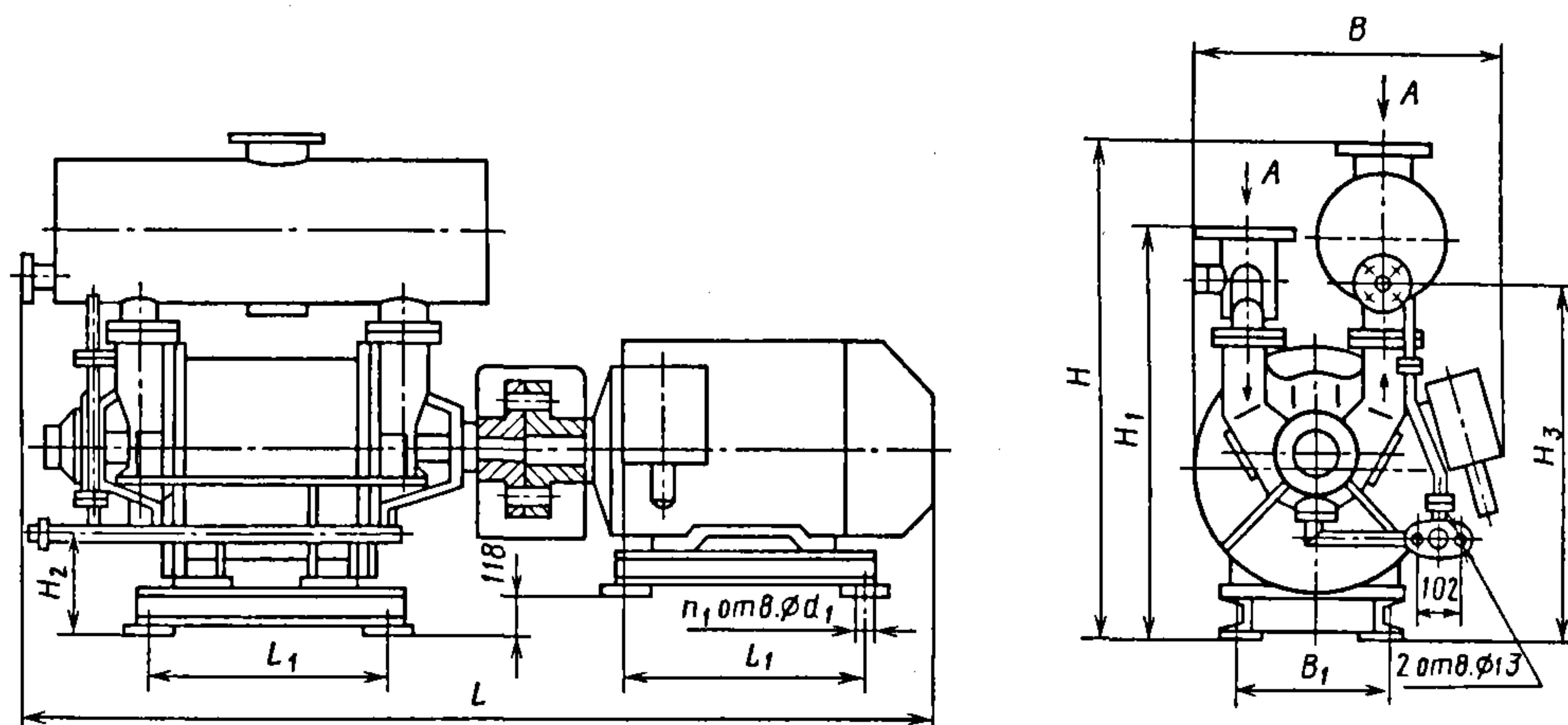


Рис. 9.22. Насос 2ВВН2-50

Вакуумные насосы, кроме насоса ВВН-0,3, имеют одинаковые конструктивные схемы.

Все вакуумные насосы, за исключением ВВН-0,3, соединены с электродвигателем через муфту и содержат отделители жидкости, смонтированные на нагнетательных патрубках (рис. 9.21 и 9.22).

Насос ВВН-0,3 – консольного типа (рис. 9.23).

Жидкостно-кольцевые вакуумные агрегаты различают по системе подачи жидкости на открытые, с частичной рециркуляцией и рециркуляционные.

При открытой системе подачи вода подается в уплотнение и жидкостное кольцо из водяной сети и сливается в канализацию. При этом методе достигается наиболее интенсивное охлаждение насоса и откачиваемого газа, что важно для получения низкого давления всасывания.

В системах с частичной рециркуляцией в жидкостное кольцо и уплотнения вода поступает из водяной сети и отделителя жидкости. Оба водяных потока смешиваются перед вакуумным насосом для выравнивания температуры. Этот способ позволяет экономить воду и уменьшать эксплуатационные затраты.

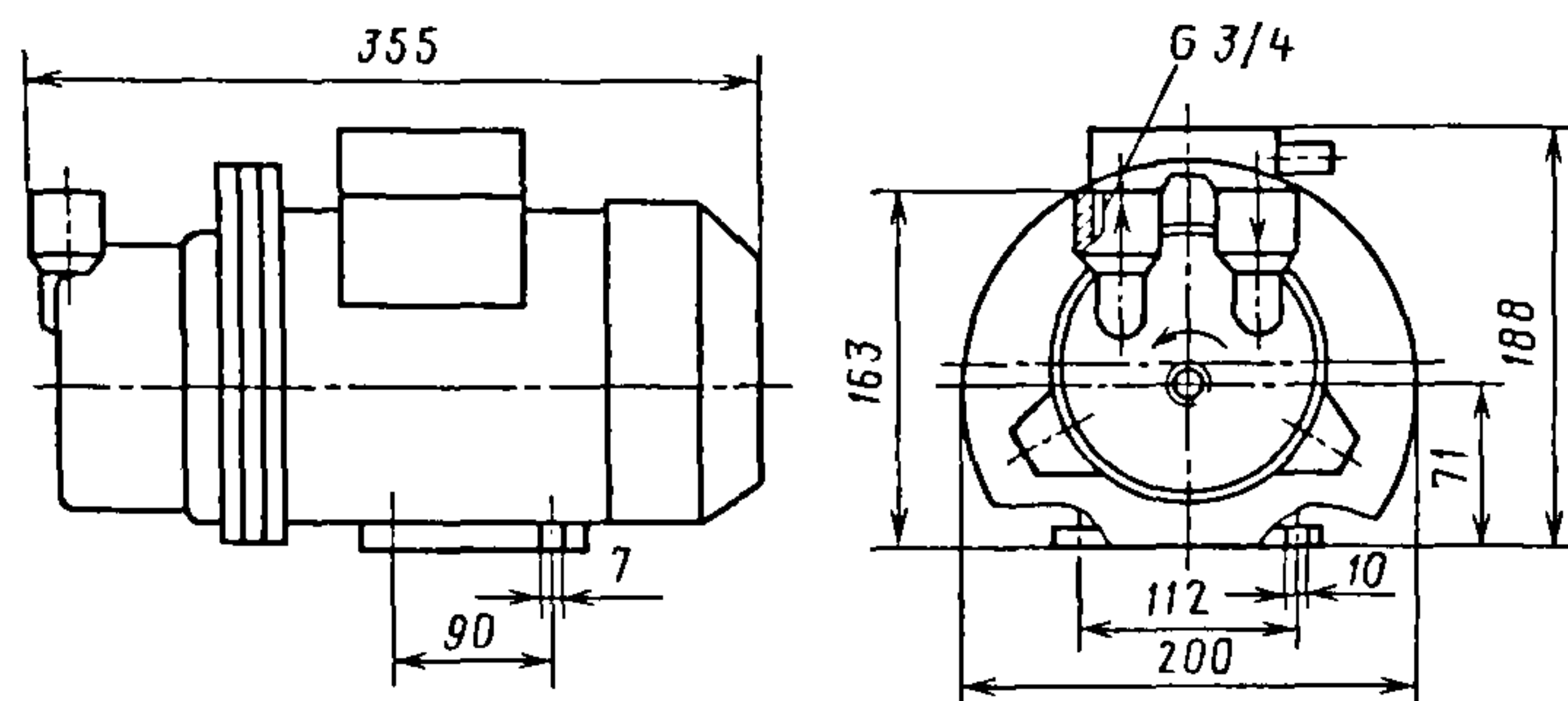


Рис. 9.23. Насос ВВН-0,3

В рециркуляционной системе подачи вся жидкость, подводимая в вакуумный насос, поступает из отделителя жидкости. Перед подачей в вакуумный насос она охлаждается в теплообменнике, встроенном в отделитель жидкости или смонтированном отдельно на раме.

В настоящее время рекомендуется применять только рециркуляционную (оборотную) систему подачи жидкости. Рециркуляционная система подачи жидкости безальтернативно используется в случаях:

- применения в качестве рабочей жидкости химических веществ;

- конденсации и попадания в жидкость или растворение в ней паров откачиваемых химических веществ;

- необходимости подачи в жидкостное кольцо жидкости с низкой температурой.

Циркуляцию жидкости обеспечивает ЖКВН или специальный жидкостный насос.

При использовании жидкостей высокотоксичных, взрывоопасных, агрессивных, канцерогенных или с твердыми включениями рекомендуются сдвоенные механические уплотнения, в которые подается вода из водяной системы только для отвода теплоты трения. Давление воды должно быть таким, чтобы она не проникла между поверхностями трения уплотнения. Уплотнительные кольца, соприкасающиеся с рабочей жидкостью, следует выполнять из химически стойких материалов (графита, керамики, коррозионно-стойкой стали).

В системах с частичной рециркуляцией и рециркуляционных уровень жидкости в отделителе не должен быть ниже осевой линии вакуумного насоса; поэтому в отделителе жидкости, смонтированном рядом с вакуумным насосом на фундаменте или раме, для поддержания уровня жидкости рекомендуется устанавливать регулятор уровня, а для контроля – указатель уровня.

В ЖКВН ограничивают расход жидкости и ее температуру. Повышение температуры жидкости обычно задают  $\leq 2...5$  К. Расход жидкости возрастает с увеличением быстроты действия, частоты вращения вала и температуры подводимой в вакуумный насос жидкости. В системах с частичной рециркуляцией расход воды, подаваемой из водяной магистрали, и расход рециркуляционной воды зависят от разности их температур.

В РФ выпускают также агрегаты на базе ВВН с эжекторной ступенью и агрегаты ЖКА на базе ЖКВН для технологических процессов в нефтяной, газовой и химической промышленности [14, 15].

В агрегатах АВВ на базе ВВН с эжекторной ступенью эжектор крепится на всасывающем патрубке ВВН и предназначен для повышения производительности при давлении всасывания  $< 20$  кПа и для получения более низкого давления по сравнению с тем, которое дает ВВН. Характеристики агрегатов представлены на рис. 9.24.



Агрегат ЖКА-6, принципиальная схема которого представлена на рис. 9.25, создает и поддерживает вакуум при откачке паров углеводородов. Основные детали агрегата выполнены из стали 12Х18Н10Т. Система подачи жидкости рециркуляционная, благодаря чему в атмосферу не попадают загрязняющие вещества.

#### Техническая характеристика агрегата ЖКА-6

Производительность агрегата, приведенная к начальным условиям при начальном давлении 0,04 МПа (300 мм рт.ст.), м<sup>3</sup>/мин ..... 6  
 Мощность электродвигателя насоса НВЖК-6, кВт ..... 11,5  
 Частота вращения, синхронная, мин<sup>-1</sup> ..... 1500  
 Объем отделителя рабочей жидкости, м<sup>3</sup> ..... 1

Подача насоса ЦГ 6,3/20, м<sup>3</sup> ..... 6,3  
 Напор насоса ЦГ 6,3/20, м ..... 20  
 Мощность электродвигателя насоса ЦГ 6,3/20, кВт ..... 1,1  
 Частота вращения, синхронная, мин<sup>-1</sup> ..... 3000  
 Габаритные размеры агрегата, мм ..... 2900×2700×1800

Масса агрегата, кг, не более ..... 1800

**Пример расчета.** Исходные данные: быстрота действия  $S = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ; давление всасывания  $p = 0,02 \text{ МПа}$ ; давление нагнетания  $p_n = 0,1013 \text{ МПа}$ ; откачиваемый газ – воздух; температура  $T = 293 \text{ К}$ ; рабочая жидкость – вода; температура воды на входе в ЖКВН 288 К, расход воды  $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Определить геометрические размеры и мощность ЖКВН.

Данные расчета сведены в табл. 9.3.

Рис. 9.24. Характеристики водокольцевых насосов и агрегатов АВВ с эжекторами

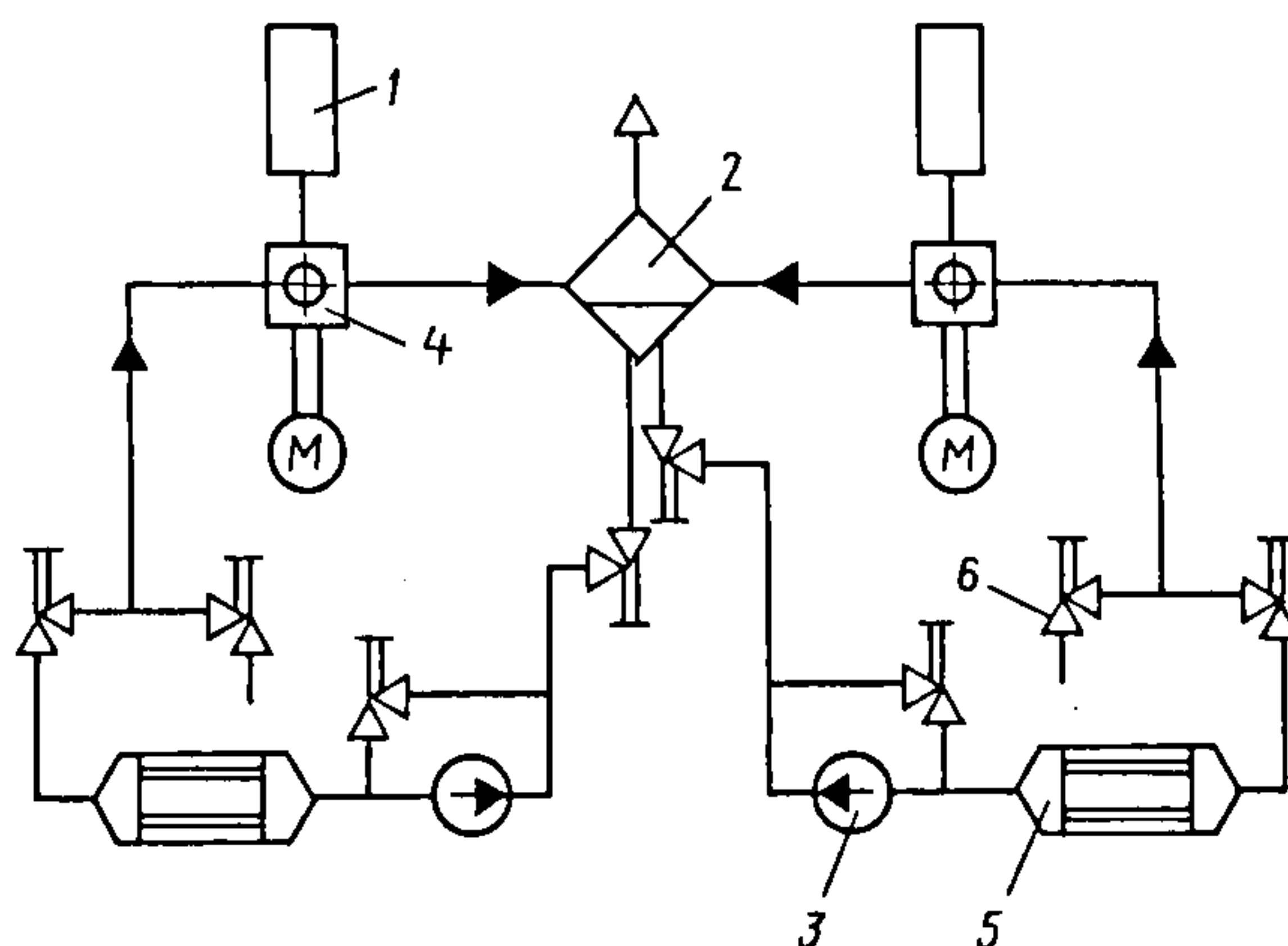
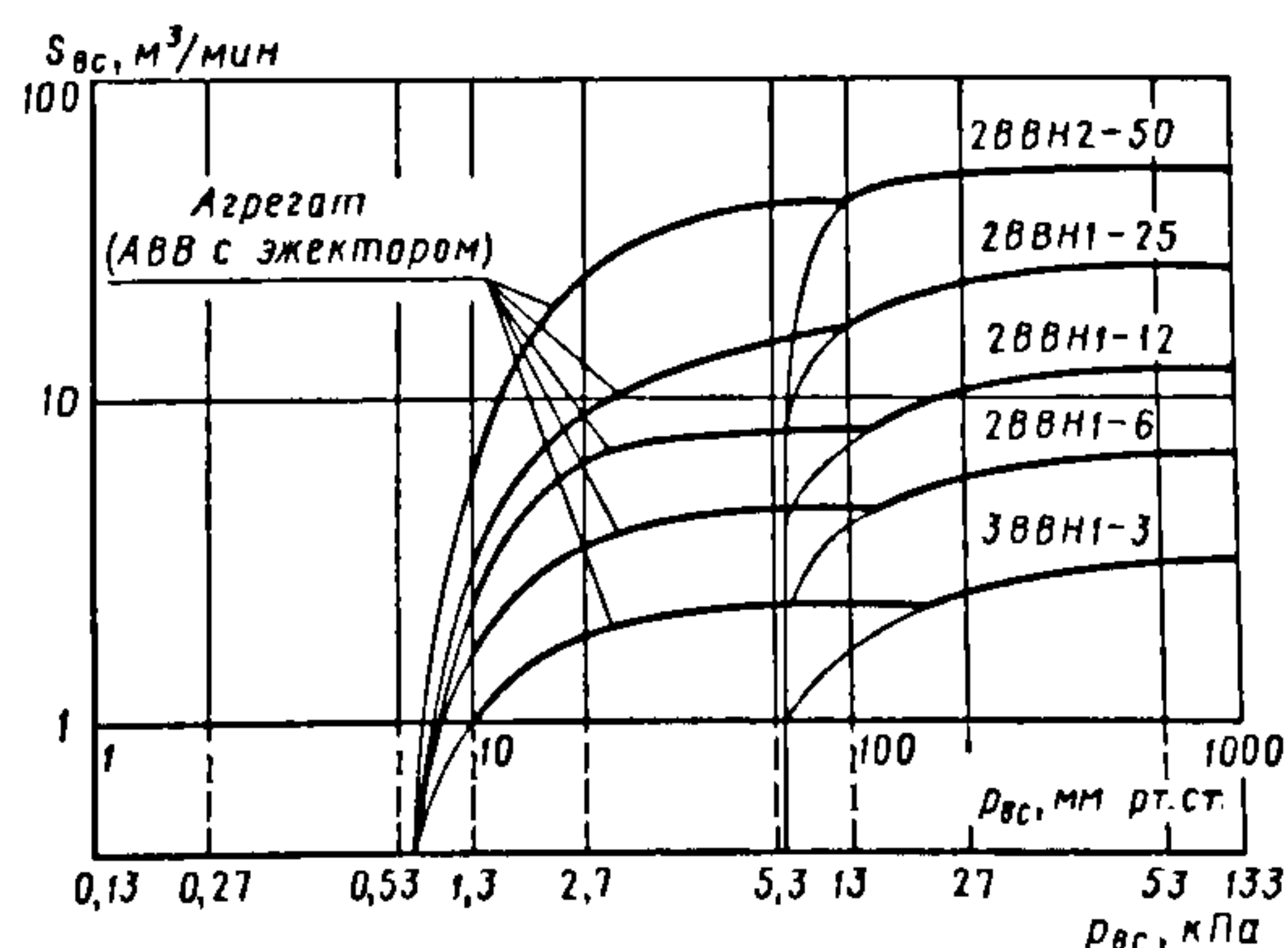


Рис. 9.25. Принципиальная схема агрегата ЖКА-6:

- 1 – откачиваемые объемы; 2 – отделитель рабочей жидкости; 3 – герметичные, взрывозащищенные жидкостные насосы ЦГ 6,3/20;
- 4 – жидкостно-кольцевые насосы НВЖК-6;
- 5 – охладители жидкости;
- 6 – запорные клапаны



## 9.3. Данные расчета

Параметр	Способ определения	Результат
Быстрота действия $S$ , м <sup>3</sup> /с	Исходные данные	0,2
Давление, МПа:		
всасывания $p$		0,02
нагнетания $p_n$		0,1013
Температура воздуха на всасывании $T$ , К		293
Отношение давления нагнетания к давлению всасывания	$\tau = p_n/p$	5,1
Коэффициент откачки $\lambda$	Принимают (см. рис. 9.10)	0,75
Геометрическая быстрота действия $S_r$ , м/с	Формула (9.5)	0,267
Относительная ширина колеса $\chi$	Принимают	2
Коэффициент $\psi$ , учитывающий влияние ширины лопаток		0,75
Отношение $v$ среднего радиуса ступицы к наружному радиусу колеса		0,4
Окружная скорость на периферии колеса $u_2$ , м/с		16
Расчетный наружный радиус колеса $r_2$ , м	$r_2 = \sqrt{\frac{2S_r}{\psi u_2 \chi (1 - v^2)}}$	0,163
Наружный радиус колеса $r_2$ , м	Принимают	0,16
Расчетная частота вращения вала насоса $n_p$ , с <sup>-1</sup>	$n_p = u_2/(2\pi r_2)$	15,92
Частота вращения вала насоса $n$ , с <sup>-1</sup>	Принимают равной частоте вращения вала двигателя	16,7
Изотермическая мощность $N_{из}$ , кВт	$N_{из} = p S_r \ln \tau$	8,7
Изотермический КПД $\eta_{из}$	Принимают (см. рис. 9.12)	0,275
Эффективная мощность на валу насоса $N_e$ , кВт	Формула (9.10)	31,6
Средний радиус ступицы колеса $r_1$ , м	$r_1 = v r_2$	0,64
Окружная скорость на периферии колеса $u_2$ , м/с	$u_2 = 2\pi r_2 n$	16,78



Окончание табл. 9.3

Параметр	Способ определения	Результат
Относительный зазор $\delta$	Принимают	0,0125
Относительная длина колеса $\xi$		1,04
Относительный эксцентриситета $\epsilon$		0,145
Выходной угол наклона лопатки колеса $\beta_2, ^\circ$		150
Плотность рабочей жидкости $\rho_{\text{ж}}, \text{кг/м}^3$	Исходные данные	$10^3$
Вязкость рабочей жидкости $\mu_{\text{ж}}, \text{Па}\cdot\text{с}$		$10^{-3}$
Критерий Эйлера $Eu$	$Eu = (p_n - p)/(\rho_{\text{ж}} u_2^2)$	0,29
Коэффициент $k_1$	Принимают (см. рис. 9.11)	0,86
Коэффициент $k_2$	Формула (9.8)	0,86
Радиус $r_{22}, \text{м}$	Формула (9.7)	0,1535
Глубина погружения лопатки в жидкостное кольцо $a, \text{м}$	$a = r_2 - r_{22}$	0,0065
Расчетный эксцентриситет $e_p, \text{м}$	$e_p = \epsilon r_2$	0,0232
Эксцентриситет $e, \text{м}$	Принимают	0,023
Относительный эксцентриситет $\epsilon$	$\epsilon = e/r_2$	0,1437
<i>Проводится уточнение основных размеров</i>		
Радиус $r_{22}, \text{м}$	Формула (9.7)	0,153
Глубина погружения лопатки в жидкостное кольцо $a, \text{м}$	$a = r_2 - r_{22}$	0,007
Внутренний радиус корпуса $R, \text{м}$	$R = 0,5(2r_2 + \Delta + 2e)$	0,184
Ширина колеса $b_0, \text{м}$	$b_0 = \chi r_2$	0,320
Удельная мощность $N_{\text{уд}}, \text{кВт}\cdot\text{с/м}^3$	$N_{\text{уд}} = N_e/S$	158
Геометрическая быстрота действия $S_{\text{г.р}}, \text{м}^3/\text{с}$	Формула (9.6)	0,270
$(S_r - S_{\text{г.р}})/S_{\text{г}}, \%$	—	4

### 9.3. ДВУХРОТОРНЫЕ НАСОСЫ

#### 9.3.1. Двухроторные насосы с внешним сжатием (типа Рутс)

**Принцип действия.** Двухроторный вакуумный насос (ДВН) типа Рутс – бесконтактная машина, в которой рабочий процесс складывается из прямой объемной откачки (за счет переноса роторами газа в отсеченных объемах со входа на выход) и обратных перетеканий газа через зазоры роторного механизма с выхода на вход. Наибольшее распространение в вакуумной технике получили машины с прямозубыми роторами, спрофилированными в виде восьмерок (рис. 9.26, а). Реже применяются конструкции с трех- (рис. 9.26, б) и четырехлепестковым (рис. 9.26, в) профилем роторов.

Роторы 1 (рис. 9.27) расположены с гарантированными зазорами и при вращении не касаются друг друга и корпуса. Синхронное вращение роторов обеспечивается парой шестерен 3, расположенных на концах валов. Масло в рабочей полости

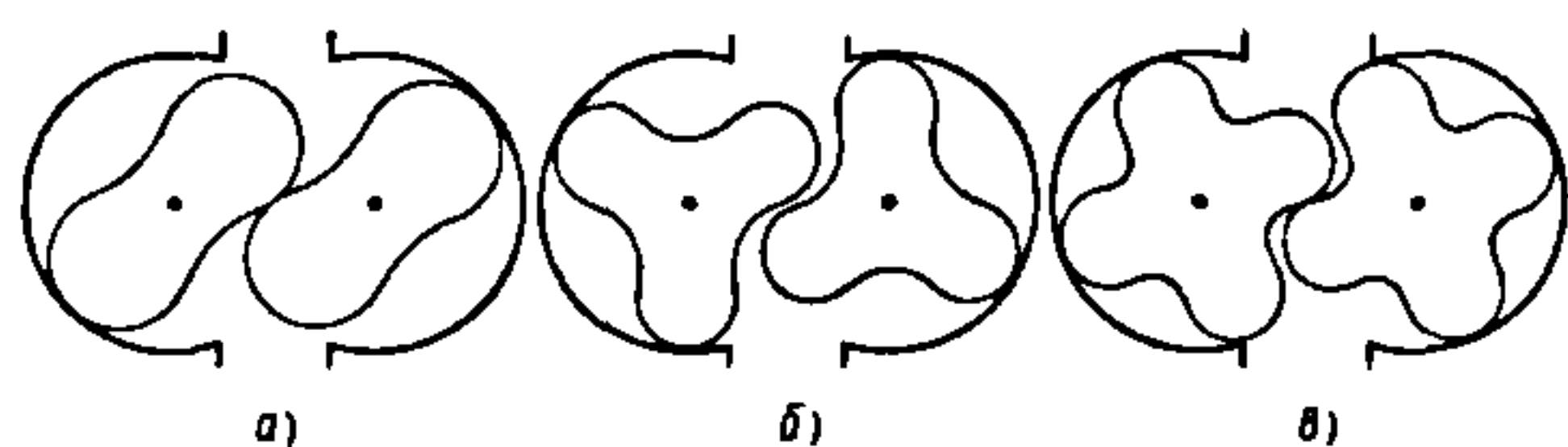


Рис. 9.26. Профили роторов ДВН

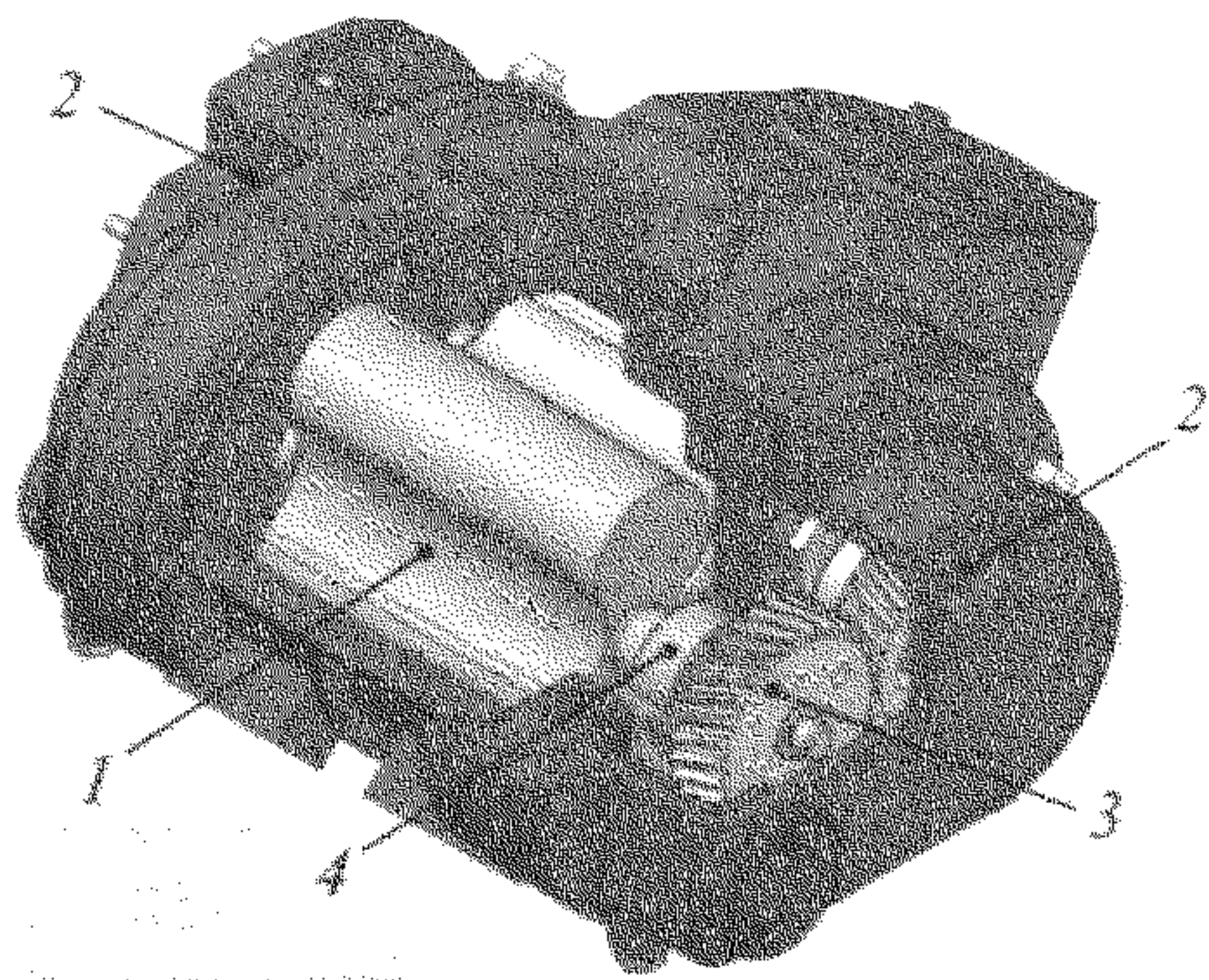


Рис. 9.27. Насос вакуумный двухроторный НВД-200:

1 – роторы; 2 – масляные картеры;  
3 – синхронизирующие шестерни;  
4 – подшипниковые узлы

ДВН отсутствует. Оно используется для смазывания подшипников 4 и синхронизирующих шестерен 3, которые размещены в специальных картерах 2, отделенных от рабочей полости динамическими или манжетными уплотнениями.

ДВН характеризуются отсутствием трения и дисбаланса в роторном механизме и, как следствие, высокой частотой вращения роторов, как правило,  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , высокой производительностью при малых габаритных размерах, отсутствием масла в рабочей камере насоса. ДВН позволяют вести откачку агрессивных, взрывоопасных и дорогих газов, парогазовых конденсирующихся смесей.

К недостаткам ДВН можно отнести наличие обратных перетеканий с выхода на вход через щелевые каналы роторного механизма и, следовательно, невысокое рабочее отношение давления выхода к давлению входа (от 10...20 в среднем вакууме до 1,5...2 в области давления, близкого к атмосферному) и селективность откачки газов с различными молекулярными массами.

Величины зазоров в современных насосах составляют десятые и сотые доли миллиметра. С позиции минимизации обратных перетеканий предпочтительным для ДВН является молекулярный режим течения газа в зазорах. В этом случае проводимость каналов минимальна, а максимальное отношение давления выхода к давлению входа ДВН может достигать 40...60.

По диапазону рабочих давлений ДВН занимают промежуточную область между высоковакуумными насосами (турбомолекулярными, диффузионными) и вакуумными насосами с масляным уплотнением (золотниковыми, пластинчато-роторными). Поэтому ДВН также называют *бустерными насосами*. С целью повышения отношения давления выхода к давлению входа ДВН практически всегда работают в агрегатах с форвакуумными насосами (ФВН). Чаще всего в качестве ФВН используются вакуумные насосы с масляным уплотнением типа НВР или НВЗ.



Процесс откачки газа в ДВН происходит следующим образом: при вращении каждый из роторов поочередно отсекает за один полный оборот по два отсеченных объема  $V_{отс}$  с давлением  $P_v$  (рис. 9.28) и переносит их со входа на выход. В процессе переноса объемов давление в них практически не меняется, а выравнивание значений давления  $P_v$  и  $P_{вых}$  в идеальном случае происходит мгновенно при соединении отсеченного объема с линией нагнетания. Поэтому ДВН типа Рутс – машина с внешним сжатием газа, а идеальная индикаторная диаграмма в координатах  $P$ – $V$  имеет форму прямоугольника. Соответственно, ДВН по сравнению с насосами с внутренним сжатием, где сжатие идет по политропе, потребляет большую мощность.

Прямой объемный расход газа путем переноса роторами отсеченных объемов со входа на выход характеризуется величиной геометрической быстроты действия ДВН. Поскольку за один оборот каждый из роторов переносит по два отсеченных объема, то геометрическая быстрота ДВН определяется по формуле

$$S_r = 4V_{отс}n = 2\pi R^2 L n \chi, \quad (9.15)$$

где  $V_{отс}$  – величина отсеченного объема;  $n$  – частота вращения роторов;  $R$  и  $L$  – радиус и длина ротора;  $\chi$  – коэффициент использования рабочего объема, определяемый из соотношения

$$\chi = 1 - f_p / \pi R^2, \quad (9.16)$$

где  $f_p$  – площадь поперечного сечения ротора.

Коэффициент  $\chi$  может изменяться в широком диапазоне, и для его нахождения в соответствии со спецификой конкретного насоса рассчитываются площади поперечного сечения ротора и цилиндрической расточки корпуса.

Одновременно с объемным переносом газа роторами в ДВН происходит процесс обратных перетеканий газа через

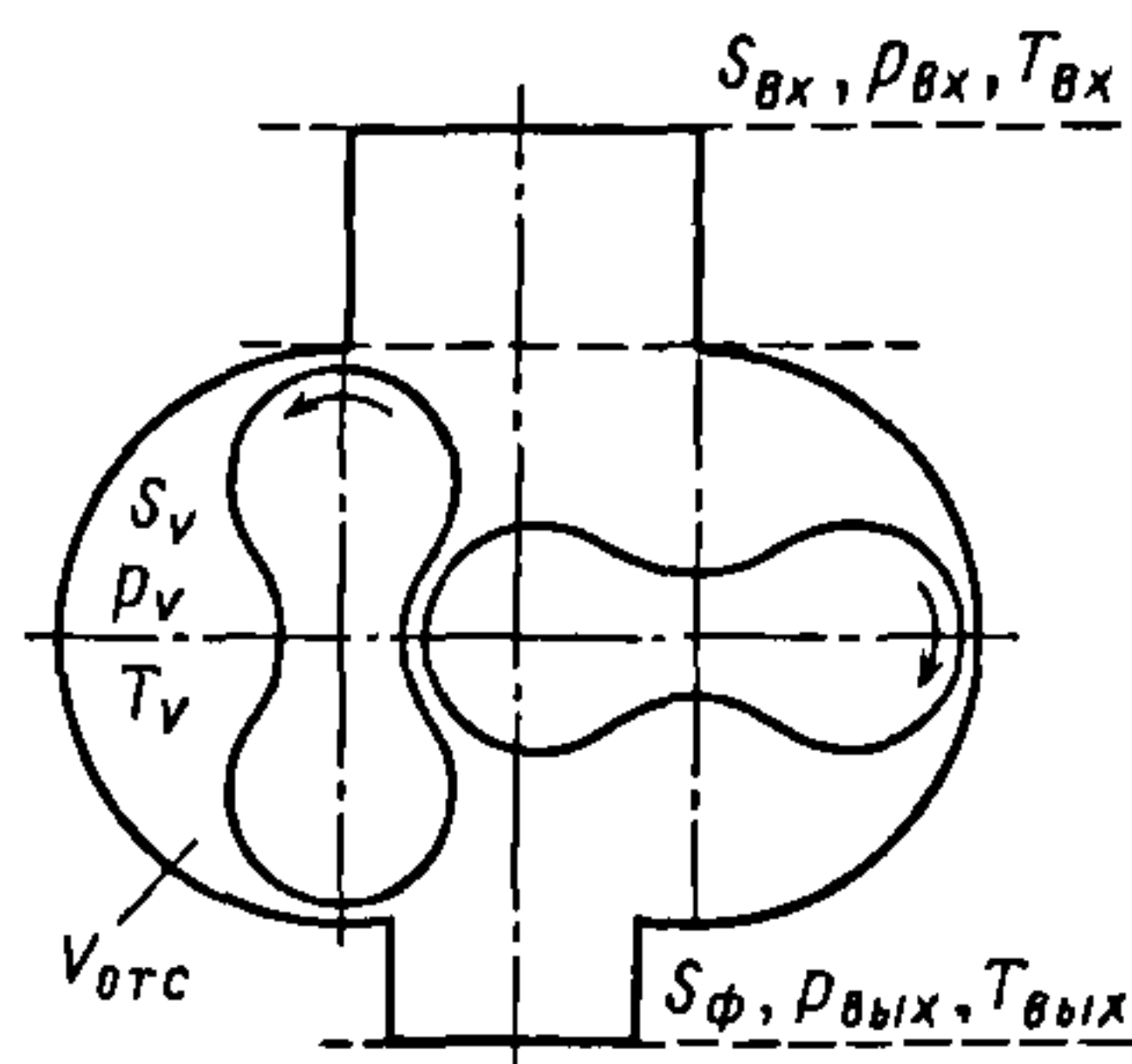


Рис. 9.28. Схема двухроторного вакуумного насоса типа Рутс:

$S_{vx}, P_{vx}, T_{vx}$  – соответственно быстрота действия насоса, давление и температур газа на входе в насос;  $S_ф, P_{вых}, T_{вых}$  – соответственно быстрота действия форвакуумного насоса, давление и температура газа на выходе из насоса;  $S_v, P_v, T_v$  – объемные расход, давление и температура газа в одном отсеченном объеме;  $V_{отс}$  – отсеченный объем

щелевые каналы с выхода на вход за счет разности давлений  $\Delta P = P_{вых} - P_{vx}$  и температур  $\Delta T = T_{вых} - T_{vx}$ , что приводит к снижению степени повышения давления и быстроты действия. Дополнительный вклад в обратные перетекания вносит перемещение роторов.

**Основы расчета ДВН.** Профилирование роторов. Начальным этапом разработки любой бесконтактной двухроторной машины является профилирование роторов, поскольку откачные характеристики в первую очередь зависят от величины объема газа, переносимого роторами за один оборот, и перетечек газа через щелевые каналы роторного механизма.

Основные задачи профилирования:

- разработка роторов, обеспечивающих максимально возможную герметичность между полостями всасывания и нагнетания при обеспечении наибольшего коэффициента использования объема;
- минимальность изолированных (перевальных и защемленных) объемов в зацеплении;
- технологичность профиля.

Процесс профилирования делится на два взаимосвязанных этапа: *теоретическое* и *действительное* профилирование.

На этапе теоретического профилирования (для профилей, между которыми нет зазоров) по выбранной части одного профиля строится сопряженная с ней часть другого, т.е. разрабатывается непрерывное зацепление, которое при идеальном изготовлении роторов и корпуса создавало бы полностью изолированные друг от друга полости.

Построение сопряженного профиля для ДВН проводят на плоскости, поскольку по длине ротора его профиль не изменяется. В зависимости от типа кривых, очерчивающих профиль ротора, различают профили ДВН типа Рутс: *окружные, эллиптические, эвольвентные, линейные, комбинированные*.

При построении сопряженных профилей используются подвижные системы координат  $X_1O_1Y_1$  и  $X_2O_2Y_2$ , которые жестко связаны с роторами и центры которых совпадают с осями вращения роторов. Углы поворота роторов  $\alpha$  и систем координат равны, так как роторы вращаются с одинаковой угловой скоростью. С левым ротором связывается система координат  $X_1O_1Y_1$ , а с правым – система  $X_2O_2Y_2$  (рис. 9.29).

Головка исходного огибаемого профиля  $\Gamma$  задается в связанной с ним системе координат относительно произвольно уравнениями в параметрическом виде

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_2(s); \\ y_2 &= y_2(s), \end{aligned} \right\} \quad (9.17)$$

где  $s$  – параметр профиля на плоскости.

Находится огибающая головки  $\Gamma$ , которая определит ножку ротора  $H$ .

Наиболее часто применяется эллиптический профиль роторов (рис. 9.29), геометрия которого определяется параметрами:  $a, b, d, r$  ( $r$  и  $d$  – полуоси эллипса;  $b$  – расстояние от центра эллипса до оси ротора,  $a = A/2$  – радиус начальной окружности). Эти параметры связаны следующими соотношениями:  $b = R - r$ ,  $R = 2a - c$ . Полезна формула, связывающая отношения  $b/a$  с  $R/a$ :

$$\frac{R}{a} = 2\sqrt{\frac{1}{8} + \left(\frac{1}{\sqrt{8}} - \frac{b}{2a}\right)^2} + \frac{b}{a}. \quad (9.18)$$

Независимо могут быть заданы три параметра, что свидетельствует о большой степени свободы выбора формы эллиптического профиля. Например, окружной профиль является частным случаем эллиптического при  $r/d = 1$ .

Уравнения эллипса, которыми описана головка правого ротора в системе координат  $X_2O_2Y_2$ , записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= b + r \cos(s); \\ y_2 &= d \sin(s). \end{aligned} \right\} \quad (9.19)$$

В системе координат  $X_1O_1Y_1$  эта головка задается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= A \cos(\alpha) - \cos(2\alpha)x_2(s) - \sin(2\alpha)y_2(s); \\ y_1 &= A \sin(\alpha) + \cos(2\alpha)y_2(s) - \sin(2\alpha)x_2(s), \end{aligned} \right\} \quad (9.20)$$

где  $\alpha$  – параметр положения профиля (угол поворота ротора).

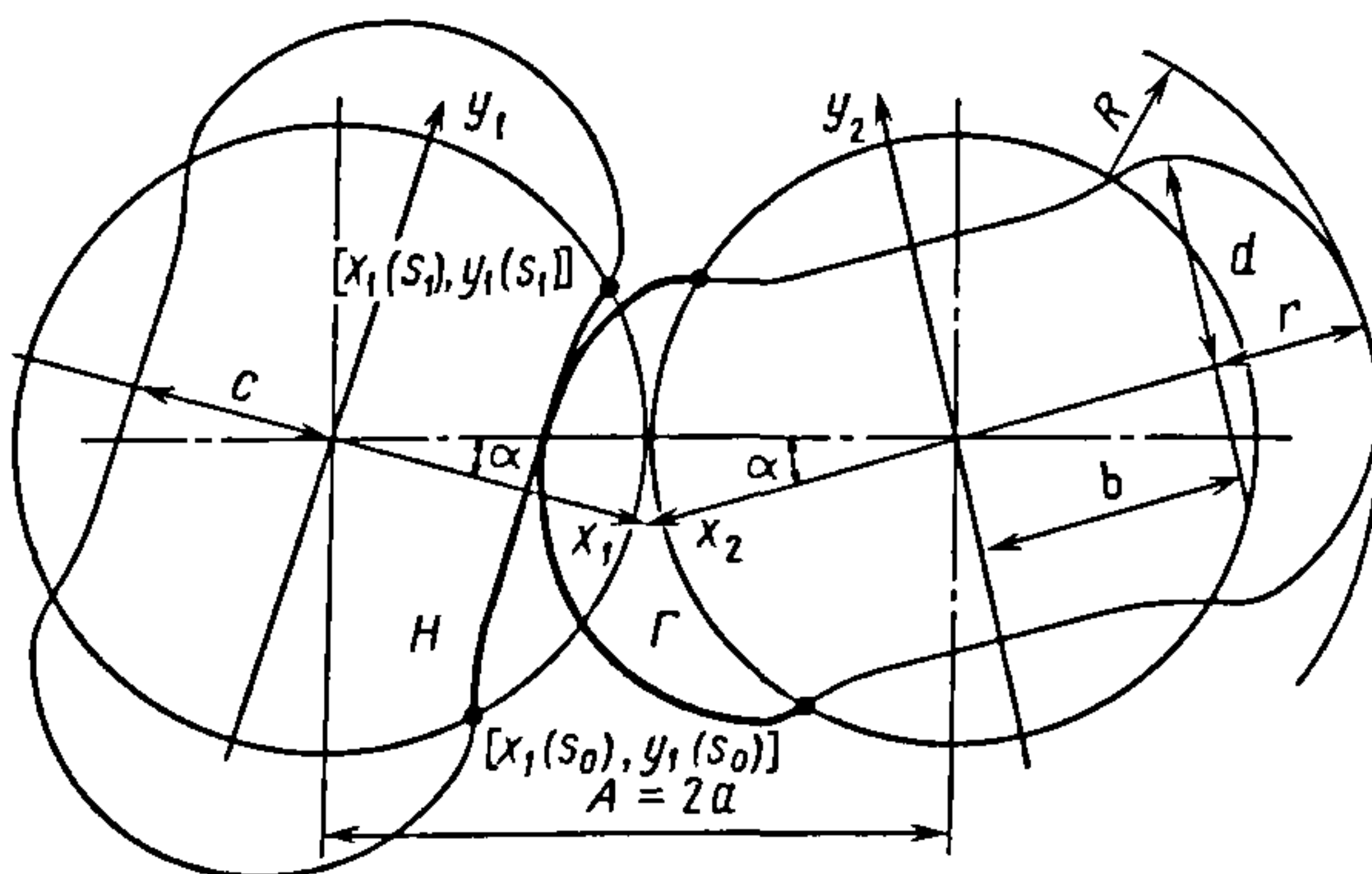


Рис. 9.29. Системы координат сопряженных профилей роторов



Если направить ось  $X_2$  так, чтобы она делила пополам дугу центроиды (см. рис. 9.29), на которую опирается головка, то условие для граничных точек кривой, определяющей головку, можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} [x_2(s_0), y_2(s_0)] &= \frac{A}{2} \left[ \cos\left(\frac{-\pi}{2z}\right), \sin\left(\frac{-\pi}{2z}\right) \right]; \\ [x_2(s_1), y_2(s_1)] &= \frac{A}{2} \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2z}\right), \sin\left(\frac{\pi}{2z}\right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (9.21)$$

где  $z$  — число лепестков ротора.

Поскольку предполагается, что кривая  $\Gamma$  гладкая, то в каждой точке  $s$  она имеет отличный от нуля касательный вектор  $[x'_2(s), y'_2(s)]$ . Тогда в системе координат  $X_1O_1Y_1$  имеется семейство кривых и для каждого  $\alpha \in [-\pi/(2z), \pi/(2z)]$  существует своя кривая, заданная уравнениями (9.20).

Получение сопряженного профиля происходит перестроением уравнений (9.19), заданных в системе подвижных координат одного ротора, в систему подвижных координат другого ротора с помощью уравнений связи координат. В общем случае задания кривой на ведущем роторе уравнениями вида (9.17) для построения сопряженного профиля необходимо определить зависимость  $\alpha = f(s)$ . Связь параметров  $\alpha$  и  $s$  для точек кривой, лежащих на огибающей  $H$  при  $|\alpha| < \pi/(2z)$ , позволяет найти функциональный определитель

$$\frac{\partial(x_1, y_1)}{\partial(\alpha, s)} = 0. \quad (9.22)$$

Раскрыв определитель с помощью уравнений (9.20), можно получить уравнение, широко используемое в теории зацепления:

$$\begin{aligned} &[A \cos(\alpha) - 2x_2(s)] x'_2(s) + \\ &+ [-2y_2(s) + A \sin(\alpha)] y'_2(s) = 0. \end{aligned} \quad (9.23)$$

Таким образом, чтобы точка  $(x_1, y_1)$  принадлежала кривой  $H$  необходимо, чтобы  $(x_1, y_1)$  удовлетворяли системе параметрических уравнений (9.20) и между

параметрами  $\alpha$  и  $s$  или было выполнено соотношение (9.23), или  $|\alpha| = \pi/(2z)$ .

Система уравнений (9.19), (9.20), (9.23) полностью определяет координаты сопряженной части эллиптического профиля ротора.

На интервалы изменения геометрических параметров эллиптического профиля налагается ряд ограничений. Это иллюстрирует рис. 9.30, на котором показана допустимая область изменения геометрических параметров эллиптического профиля. Нижняя граница 1 соответствует профилям с радиусом кривизны головки ротора в точке зазора, равным радиусу корпуса.

При значениях параметров, лежащих ниже границы 1, радиус кривизны головки ротора  $d_2/r$  в точке зазора больше радиуса корпуса, что делает невозможным использование данного ротора в насосе.

Для профилей, значения параметров которых находятся выше границы 2, огибающая головки будет иметь петли и точки возврата. Кривая 3 соответствует параметрам окружного профиля. ДВН с параметрами профиля, находящимися в области левее линии 3, характеризуются меньшими относительно окружного профиля

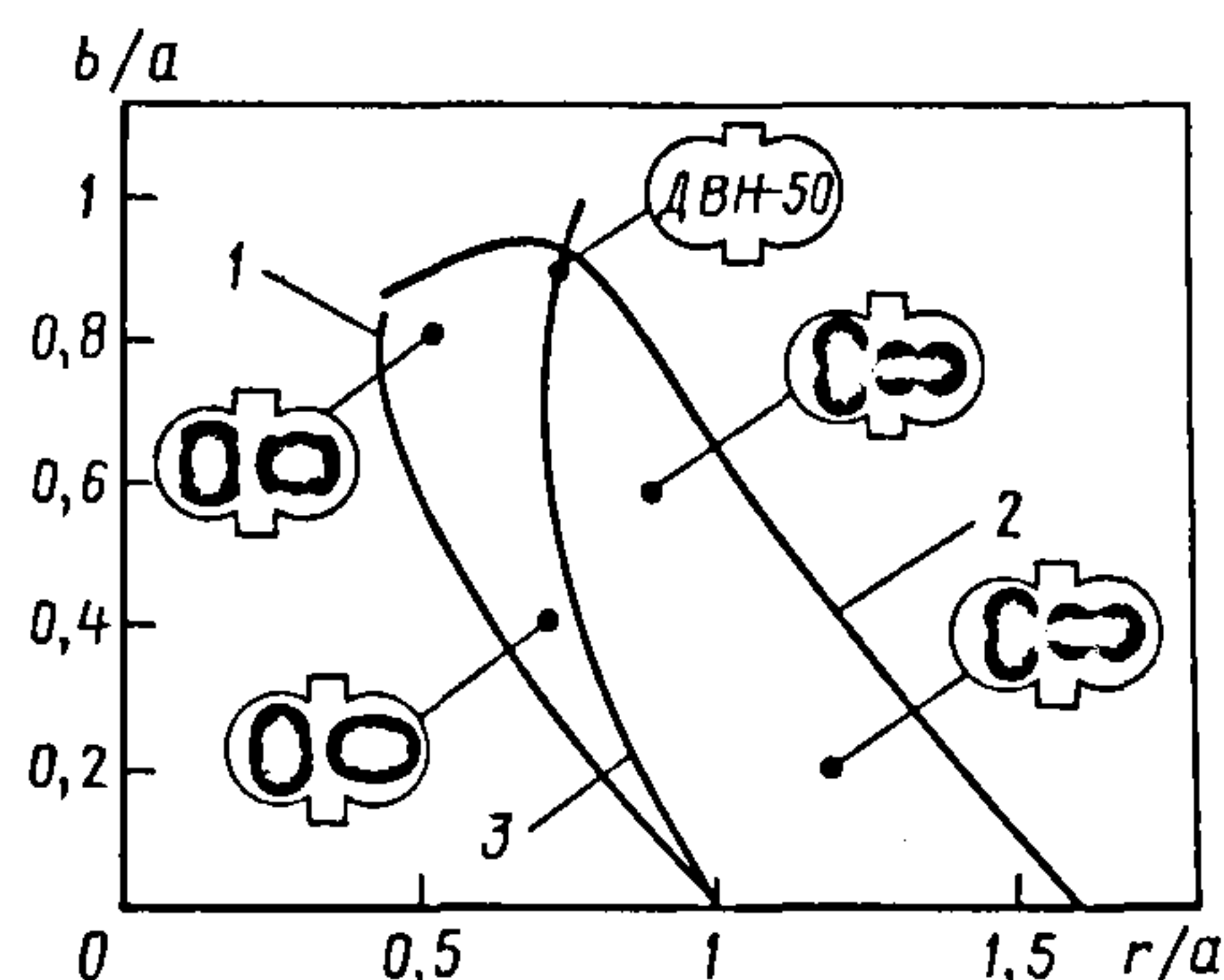


Рис. 9.30. Допустимая область изменения геометрических параметров ротора ДВН с эллипсом на головке:

1, 2 — соответственно верхняя и нижняя границы допустимой области; 3 — граница области минимизации обратных перетеканий и увеличения коэффициента  $\chi$

обратными перетеканиями, а с параметрами, находящимися правее линии 3, – большими коэффициентами использования объема  $\chi$ .

При проектировании ДВН с окружным профилем значения  $b/a$  следует выбирать из интервала 0,72...0,9288, поскольку при  $b/a \geq 0,9288$  ( $R/a \geq 1,6698$ ) профили становятся необкатываемыми, а роторы с  $b/a \leq 0,72$  ( $R/a \leq 1,4272$ ) имеют очень низкий коэффициент использования объема. При снижении  $b/a$  обеспечивается лучшая «герметичность» каналов роторного механизма (при уменьшении  $b/a$  с 0,9288 до 0,8 обратные перетекания через межроторный канал при молекулярном режиме снижаются на 30...40 %), однако су-

щественно снижается коэффициент использования объема (примерно на 25...20 %).

Применять роторы с окружным профилем при  $b/a < 0,8$  и  $> 0,9$  нецелесообразно. В первом случае перетекания практически не меняются, но снижается коэффициент использования объема. При увеличении  $b/a > 0,9$  рост обратных перетеканий через межроторный канал существенно опережает рост  $\chi$ . Следует помнить, что при увеличении  $b/a$  уменьшается ширина впадины ротора  $c$ , а это ухудшает прочностные характеристики ротора.

Коэффициент использования объема для ДВН с эллиптическим и окружным профилями роторов можно найти по формуле

$$\chi = -5,38 + 10,3(b/a) - 6,2(b/a)^2 + 1,26(b/a)^3 + 10,2(r/a) - 12,37(b/a) \times (r/a) + 3,95(b/a)^2(r/a) - 6,09(r/a)^2 + 3,9(b/a)(r/a)^2 + 1,28(r/a)^3. \quad (9.24)$$

При проектировании насосов с эллиптическим профилем рекомендуется задаваться следующими соотношениями:  $b/a \approx 0,84...0,87$  и  $r/a = 0,61...0,66$ .

На практике полностью герметичные полости не могут существовать, поскольку для бесконтактного вращения роторов необходимо наличие минимальных гарантированных зазоров, которые компенсировали бы погрешности изготовления и сборки насоса, люфты шестерен связи и подшипников. Изменение температуры корпуса и роторов приводит к изменению зазоров роторного механизма по сравнению с монтажными значениями и, следовательно, может вызвать заклинивание роторов при работе или, наоборот, появление необоснованно завышенных зазоров.

Получение профилей роторов, обеспечивающих их беспрепятственное относительное движение с минимально необходимой величиной зазоров между ними, является задачей действительного профилирования. Существуют несколько способов получения действительного профиля:

1. Занижение размеров роторов при изготовлении их профильных поверхно-

стей. Действительные профили в этом случае отличаются на некоторую величину в сторону уменьшения размеров от теоретического профиля.

2. Преднамеренное увеличение межосевого расстояния относительно расчетного. В данном случае профиль ротора остается теоретическим.

3. Комбинированный способ, сочетающий в себе как некоторое занижение размеров профильной поверхности роторов, так и увеличение межосевого расстояния.

В результате действительного профилирования получают массив координат профиля, по которым изготавливаются роторы.

Минимальный радиальный зазор, который должен быть обеспечен при монтаже для того, чтобы ДВН не заклинило при работе, определяется по формуле

$$\delta_{ркм} > -\Delta R_{кн} + \Delta R_{рв} - [R_k \alpha_k (T_k - T_m) - R_p \alpha_p (T_p - T_m)], \quad (9.25)$$

где  $\Delta R_{кн}$  – нижний допуск на радиус корпуса;  $\Delta R_{рв}$  – верхний допуск на радиус



ротора;  $\alpha_k$  и  $\alpha_p$  – температурные коэффициенты линейного расширения материалов корпуса и ротора соответственно;  $T_p$ ,  $T_k$ ,  $T_m$  – максимальные рабочие температуры ротора, корпуса и температура монтажа соответственно.

Монтажный торцовый зазор со стороны жесткой опоры  $\delta_{т1м}$  устанавливается при сборке насоса за счет шайб из стальной ленты. Минимальная величина этого зазора определяется по формуле

$$\delta_{т1м} > l_n [\alpha_k (T_k - T_m) - \alpha_p (T_p - T_m)] , \quad (9.26)$$

где  $l_n$  – расстояние от упорного подшипника до ближнего торца ротора.

Минимальный монтажный торцовый зазор со стороны плавающей опоры рассчитывается по формуле

$$\delta_{т2м} > -\Delta L_{кн} + \Delta L_{рв} - (l_n + L) \times \\ \times [\alpha_k (T_k - T_m) - \alpha_p (T_p - T_m)] , \quad (9.27)$$

где  $\Delta L_{кн}$  – нижний допуск на длину корпуса;  $\Delta L_{рв}$  – верхний допуск на длину ротора.

Минимальный межроторный зазор, который должен быть обеспечен при монтаже ДВН, определяется как

$$\delta_{ррм} > -\Delta A_n + \Delta R_{рв} + \Delta c_v + R_p \alpha_p (T_p - T_m) + \\ + c \alpha_p (T_p - T_m) - \alpha_{кр} A (T_{кр} - T_m) , \quad (9.28)$$

где  $\Delta A_n$  – нижний допуск на межцентровое расстояние;  $\Delta R_{рв}$  – верхний допуск на радиус ротора;  $\Delta c_v$  – верхний допуск на ширину впадины ротора;  $\alpha_{кр}$  – температурный коэффициент линейного расширения материала торцевой крышки, в которой установлены подшипники;  $T_{кр}$  – максимальная температура торцевой крышки в рабочем состоянии.

Температура корпуса ДВН может быть определена по формуле, полученной путем обобщения экспериментальных

значений  $T_k$  в зависимости от  $\Delta p$  и  $n$ . Линейная аппроксимация

$$T_k = 281 + 0,00578 \Delta p + 0,35n , \quad (9.29)$$

где  $n$  имеет размерность  $c^{-1}$ , а  $\Delta p$  – Па.

Температуру роторов можно определить по температуре корпуса согласно выражению, найденному путем аппроксимации экспериментальных данных, полученных с помощью насосов ДВН-50 и ДВН-500:

$$T_p = 1,7 T_k - 216,7 . \quad (9.30)$$

Температура торцевой крышки в рабочем состоянии  $T_{кр}$  принимается средней между  $T_p$  и  $T_k$ .

Следует отметить, что действительные монтажные зазоры, назначаемые для ДВН, существенно превосходят минимальные зазоры, необходимые для компенсации тепловых деформаций и погрешностей изготовления.

Основы расчета откачных характеристик. Исходным параметром, задаваемым при проектировании ДВН, является быстрота действия  $S_{вх}$  при рабочем давлении  $p_{вх}$ , которую должен обеспечить ДВН в агрегате с форвакуумным насосом.

Для решения данной задачи выбирается частота вращения роторов  $n$  (как правило, 1500 или 3000  $\text{мин}^{-1}$ ). По заданной быстроте действия определяется геометрическая быстрота действия ДВН. Для предварительной оценки  $S_r$  можно найти по формуле

$$S_r = S_{вх} / \lambda , \quad (9.31)$$

где  $\lambda$  – коэффициент откачки, который приближенно можно принять  $\lambda = 0,6 \dots 0,8$ .

Из формулы (9.15) определяется радиус ротора ДВН, необходимый для обеспечения геометрической быстроты действия

$$R = \sqrt[3]{S_r / 2\pi n \chi k_L} , \quad (9.32)$$

где  $k_L = L / R$  – относительная длина ротора.

При расчете  $R$  по формуле (9.32) коэффициент использования рабочего объема выбирают в пределах  $\chi = 0,5 \dots 0,6$  для двухлепесткового профиля роторов и  $\chi = 0,48 \dots 0,54$  для трехлепесткового. Относительная длина ротора задается из интервала  $L/R = 2 \dots 5$ . Следует помнить, что при увеличении  $R$  растет окружная скорость на роторе, что может привести к его деформации.

Значение  $R$  округляется до целого числа (в миллиметрах) и строится профиль роторов. Находится точное значение коэффициента использования объема  $\chi$ . Для эллиптического и окружного профилей  $\chi$  можно вычислить по уравнению (9.24). Затем уточняется длина роторов  $L$ , необходимая для обеспечения  $S_r$ . Минимально необходимые зазоры роторного механизма определяются согласно формулам (9.25) – (9.28).

Действительная быстрота действия ДВН при давлении на входе в насос (на верхнем срезе входного патрубка) рассчитывается по формуле

$$S_{\text{вх}} = S_r k_V k_U + k_U U_{\text{пр}} - U_{\text{обр}} \frac{p_{\text{вых}}}{p_{\text{вх}}} \frac{T_{\text{вх}}}{T_{\text{вых}}}, \quad (9.33)$$

где  $k_U = p_{\text{вх.п}}/p_{\text{вх}}$  – коэффициент, учитывающий потери во входном патрубке насоса;  $k_V = p/p_{\text{вх.п}}$  – коэффициент, учитывающий потери, возникающие при заполнении объема всасывания (при допущении  $T_{\text{вх}} = T_{\text{вх.п}} = T_V$ );  $U_{\text{пр}}$  и  $U_{\text{обр}}$  – соответственно прямая (с входа на выход) и обратная (с выхода на вход) суммарные проводимости всех каналов ДВН;  $T$  – температура газа в соответствующем сечении.

Коэффициент  $k_U$  определяется по формуле

$$k_U = 1 - \frac{Q}{p_{\text{вх}} U_{\text{вх.п}}}, \quad (9.34)$$

где  $U_{\text{вх.п}}$  – проводимость входного патрубка ДВН.

В диапазоне рабочих давлений ДВН режим течения во входном тракте может изменяться от молекулярного до вязкост-

ного. Проводимость входного патрубка рассчитывается по формулам короткого трубопровода для соответствующего режима течения. Влияние входного патрубка становится существенным при молекулярном режиме течения на входе в насос и при высоких частотах вращения ДВН.

Для снижения потерь во входном тракте ДВН размеры входного патрубка следует выбирать таким образом, чтобы его проводимость значительно превосходила  $S_{\text{вх}}$ . Для большинства промышленных ДВН при паспортных частотах вращения влияние  $k_U$  не превышает 5...10 %. Поэтому при расчетах сопротивление входного патрубка чаще всего не учитывают.

Коэффициент заполнения  $k_V$  определяется в зависимости от частоты вращения роторов и давления на входе по формуле

$$k_V = \exp \left[ - \frac{\mu n}{\sqrt{k R_r T}} \left( 1 + \frac{1}{\beta p_{\text{вх}} + \gamma} \right) \right], \quad (9.35)$$

где эмпирические коэффициенты  $\mu = 0,012$ ;  $\beta = 0,11$ ;  $\gamma = 0,125$ ;  $k$  – показатель адиабаты;  $R_r$  – газовая постоянная;  $n$  имеет размерность  $\text{мин}^{-1}$ .

Расчет перетеканий газа через щелевые каналы с учетом перемещения стенок роторов представляет собой сложную задачу, поскольку здесь приходится учитывать не только взаимодействие газа с движущимися стенками, но и изменение геометрии каналов за время прохождения молекул через них. Поэтому при расчете характеристик ДВН с достаточной для практики точностью обычно принимают, что вращение роторов не влияет на обратные перетекания через щелевые каналы роторного механизма, т.е.  $U_{\text{пр}} = U_{\text{обр}} = U_0$  ( $U_0$  – суммарная проводимость каналов ДВН при неподвижных роторах), и, пренебрегая вторым слагаемым в формуле (9.33), быстроту действия определяют по формуле

$$S_{\text{вх}} = S_r k_V - U_0 \frac{p_{\text{вых}}}{p_{\text{вх}}} \frac{T_{\text{вх}}}{T_{\text{вых}}}. \quad (9.36)$$



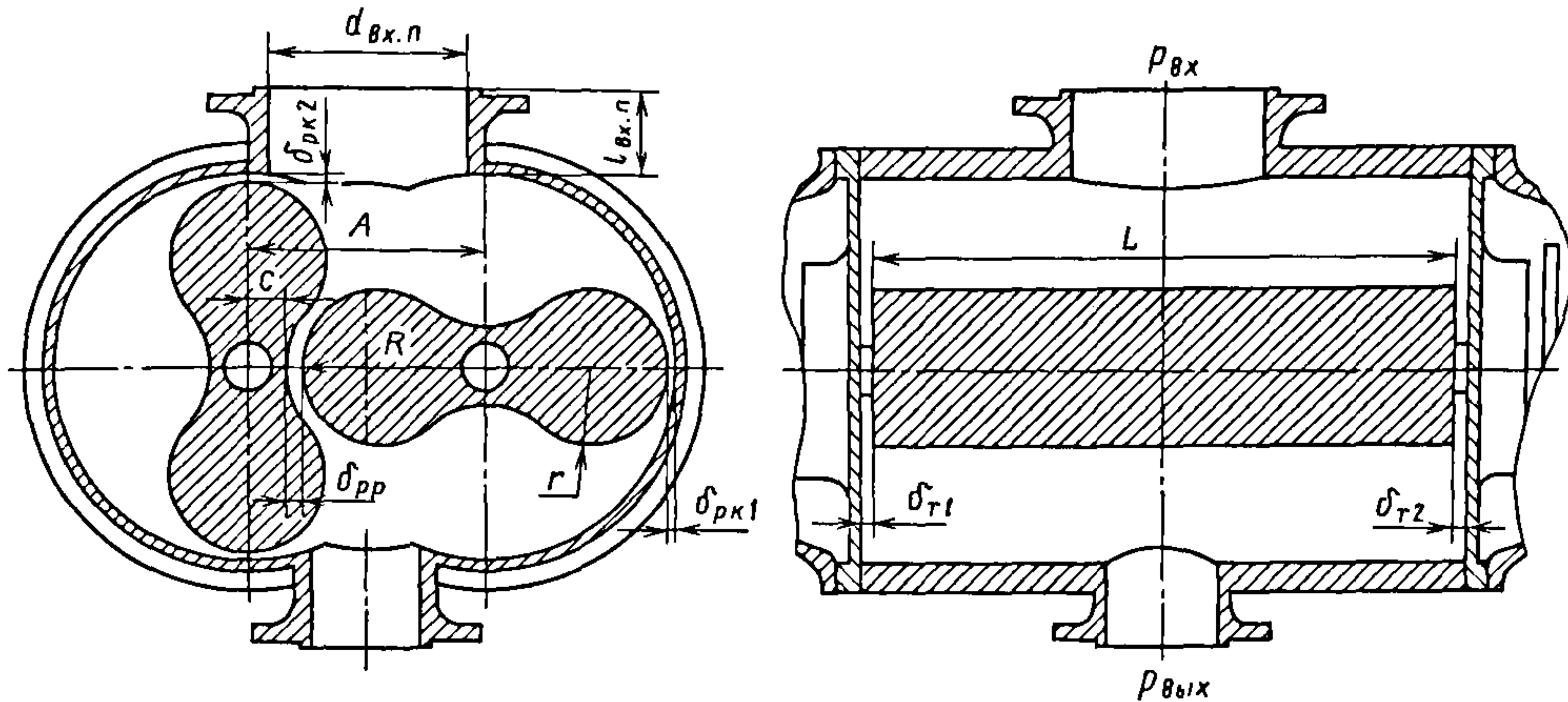


Рис. 9.31. Схема роторного механизма ДВН

В ДВН можно выделить пять параллельно включенных каналов, через которые газ перетекает с выхода на вход (рис. 9.31): межроторный канал с зазором  $\delta_{pp}$ , два радиальных с зазорами  $\delta_{pk1}$ ,  $\delta_{pk2}$  и два торцовых с зазорами  $\delta_{t1}$  и  $\delta_{t2}$  (если рассматривать канал между торцами двух роторов и торцевой крышкой как один).

Проводимость каналов ДВН при неподвижных роторах определяется суммированием проводимостей каждого канала:

$$U_0 = U_{pp} + U_{pk1} + U_{pk2} + U_{t1} + U_{t2}, \quad (9.37)$$

где  $U_{pp}$ ,  $U_{pk}$ ,  $U_t$  — проводимости межроторного, радиального и торцового каналов соответственно.

При молекулярном режиме течения газа проводимость каналов ДВН вычисляется следующим образом:

$$U_0 = \frac{c}{4} [(K_{зpk1} \delta_{pk1} + K_{зpk2} \delta_{pk2} + \bar{K}_{зpp} \delta_{pp}) L + (2R + A)(K_{t1} \delta_{t1} + K_{t2} \delta_{t2})], \quad (9.38)$$

где  $K_{зpk}$ ,  $K_t$  — коэффициенты проводимости радиальной и торцевой щелей соответственно;  $\bar{K}_{зpp}$  — усредненный по углу поворота роторов коэффициент проводимости межроторной щели.

Торцовые каналы ДВН образованы торцовыми поверхностями роторов и тор-

цовыми крышками и представляют собой длинные плоские щели. Коэффициент  $K_t$  при молекулярном режиме равен

$$K_t = \frac{\delta_t}{l_t} \ln(1 + \frac{l_t}{\delta_t}), \quad (9.39)$$

где  $l_t$  — средняя протяженность торцевой щели в направлении перетекания газа (эквивалентная длина щели), которая для профиля роторов типа Рутс приближенно определяется в виде

$$l_t = c + r. \quad (9.40)$$

Проводимость торцевой щели ДВН в вязкостном режиме течения можно найти по формуле

$$U_t = \frac{\delta_t^3 (2R + A) p_{вых} (1 + \tau)}{12 l_t \eta \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\alpha (1 - \tau^2) p_{вых}^2 \delta_t^4}{6 l_t^2 R T_{вых} \eta^2}} \right)}, \quad (9.41)$$

здесь  $\alpha = c_0 + c_1 \ln(\tau + 0,03) + c_2 \ln^2(\tau + 0,03)$ , где  $c_0 = 0,0687 - 0,0058 \ln(1/\xi) - 0,001 \ln^2(1/\xi)$ ;  $c_1 = -0,264 - 0,0677 \ln(1/\xi) - 0,00452 \ln^2(1/\xi)$ ;  $c_2 = -0,0711 - 0,0163 \ln(1/\xi) - 0,000142 \times \ln^2(1/\xi)$ ;  $\xi = \frac{\delta_t^2 p_{вых}}{l_t \eta \sqrt{R T_{вых}}}$ ;  $\tau = p_v / p_{вых}$ ;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости газа.

Критическое отношение значений давления на плоской щели, ниже которого

массовый расход газа  $G$  через щель остается постоянным и равным  $G_{кр}$ , находится по формуле

$$\tau_{кр} = 0,528 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left[ 0,65(\ln \xi - 1,94) + 0,012(\ln \xi - 1,94)^3 \right] \right\}^2. \quad (9.42)$$

Уравнение (9.41) в совокупности с формулой (9.42) позволяет определить массовый расход через плоскую щель при закритических отношениях давления. Если  $\tau < \tau_{кр}$ , то, учитывая, что в этом случае  $G = G_{кр}$ , проводимость следует вычислять по формуле (9.41), подставляя в нее  $\tau = \tau_{кр}$ .

Геометрия радиальных и межроторного каналов, зависящая от профиля роторов и изменяющаяся согласно углу поворота роторов (для межроторного), чрезвычайно разнообразна. Практически во всех случаях это щели переменного в направлении перетекания газа сечения, ко-

торые имеют в некотором месте минимальный зазор. Для таких каналов проводимость с достаточной точностью определяется участком в окрестности минимального зазора.

Значит, участок, дающий основное сопротивление потоку газа, имеет небольшую протяженность, и стенки канала практически с любым профилем на данном участке могут быть аппроксимированы выпуклыми или вогнутыми дугами окружности с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 9.32).

Проводимость таких каналов находится с использованием следующих формул:

– при молекулярном режиме

$$K_3 = \exp \left\{ \left( 0,788428 + \frac{2,883076}{x^3} + \frac{4,80693}{x^2} + \frac{3,269686}{x} + 0,44434x \right) + 0,0238 \arctan \left( \frac{8,95R_2}{R_1} \right) - \left( -\frac{0,057R_2}{R_1} + 0,0304 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} + 0,006x \left( \left| \frac{R_2}{R_1} \right| - \frac{R_2}{R_1} \right)^{0,16} \exp \left[ -\frac{2R_2}{R_1} \right] \right) \right\}, \quad (9.43)$$

где

$$x = \ln \left[ \delta \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) \right]; \quad (9.44)$$

– в вязкостном режиме

$$U = \frac{\sqrt{2R_g T_{вых}} \xi (1 + \tau) \delta L}{9\pi \left[ 1 + \sqrt{1 + \alpha(1 - \tau^2)} \xi^2 \right]}, \quad (9.45)$$

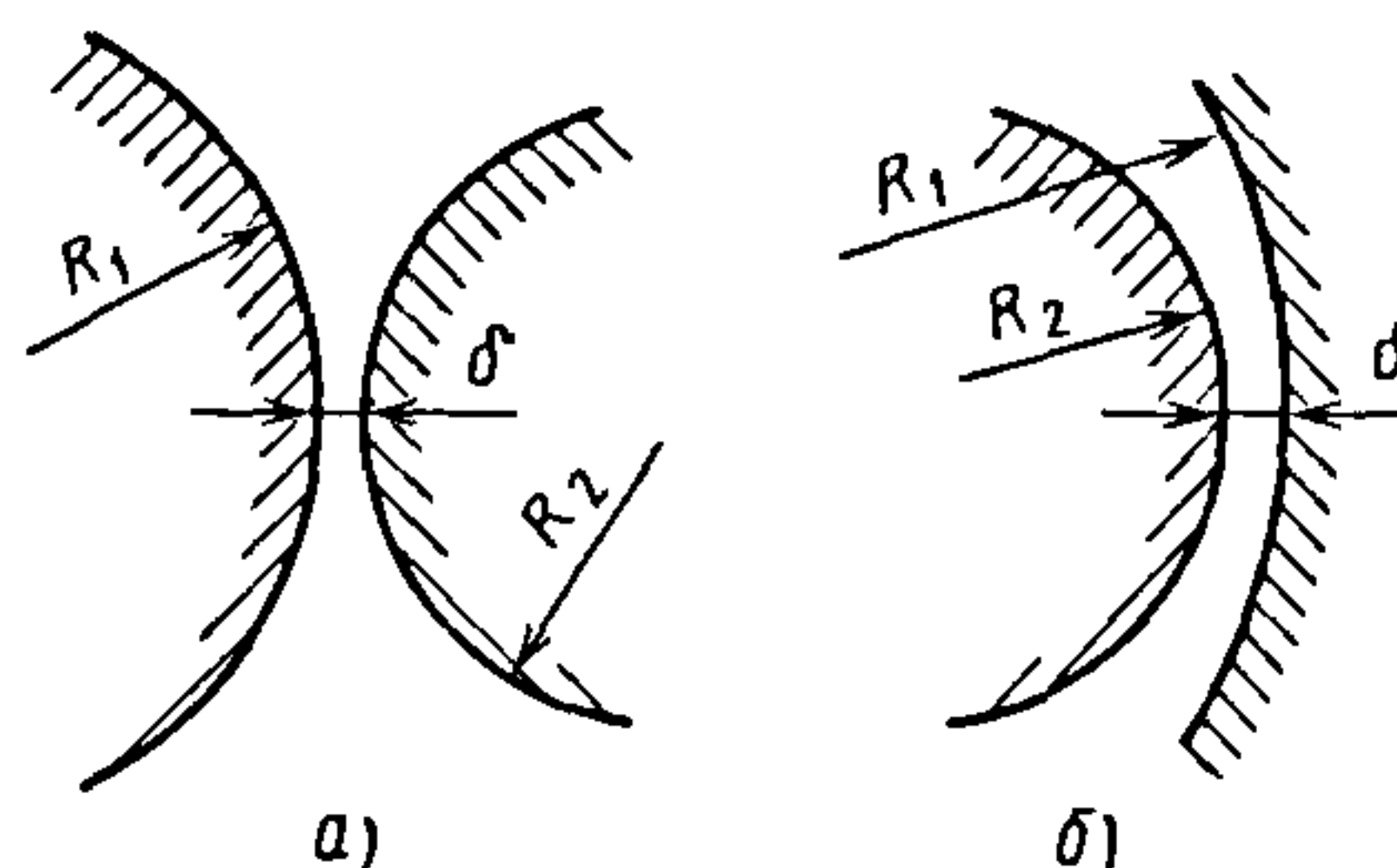
где  $\alpha = c_0 + c_1 x_k + c_2 x_k^2 + c_3 x_k^3 - 0,00129 \tau^{0,397 \xi}$ , здесь  $x_k = \frac{\ln(\tau)}{\ln(\tau) - 1}$ ;

$$c_0 = \frac{0,0008}{1 + 0,00013 \xi^3} + \frac{775}{10^6 + 0,202 \xi^3} + \frac{0,00088 \xi^3}{10^6 + 0,362 \xi^3};$$

$$c_1 = -0,00153 + \frac{0,0103 \xi^2}{2544 + \xi^2 + 0,0000275 \xi^4};$$



Рис. 9.32. К расчету проводимости радиального и межроторного каналов



$$c_2 = \frac{284,6}{9086 + \xi^2} + \frac{0,0105\xi^2}{58153 + \xi^2} + \frac{0,0137\xi^3}{1,11 \cdot 10^7 + \xi^3};$$

$$c_3 = -\left( \frac{0,00805\xi^2}{36345 + \xi^2} + \frac{39823}{1,646 \cdot 10^6 + \xi^3} + \frac{0,0129\xi^3}{6,93 \cdot 10^6 + \xi^3} \right); \quad \xi = \frac{\delta^2 p_{\text{вых}}}{\eta \sqrt{R_T T_{\text{вых}}} l_3}.$$

Эквивалентная длина канала

$$l_3 = \sqrt{\frac{\delta R_1 R_2}{R_1 + R_2}}. \quad (9.46)$$

В формулы (9.44) и (9.46) радиусы подставляются с учетом направления кривизны стенок: если стенка с радиусом  $R_1$  обращена выпуклой стороной к каналу (см. рис. 9.32, а), то берется знак «+», если вогнутой (рис. 9.32, б), то знак «-».

Таким образом, для расчета проводимости радиального канала ДВН, образованного головкой ротора и расточкой корпуса, используются формулы (9.43), (9.45). Если головка ротора описана кривой, отличной от окружности, то для расчета проводимости радиального канала находится радиус кривизны головки в месте минимального зазора и затем этот радиус подставляется в формулы (9.43)–(9.46). Для профиля с эллипсом на головке ротора вместо радиуса окружности  $R_2$  в уравнения следует подставлять значение кривизны эллипса  $r_{\text{эл}} = d^2/r$ .

Межроторный канал образуется стенками двух роторов. Этот канал наиболее сложен для расчета проводимости по следующим причинам: он образован криволинейными стенками, профиль которых часто представляет собой участки различных сложных кривых; форма канала при повороте роторов непрерывно изменяется.

Для расчета проводимости межроторного канала можно использовать следующий подход. Канал рассматривается с некоторым шагом по углу поворота роторов (например, через 5 или 15°; рис. 9.33). Для каждого положения роторов определяются радиусы кривизны стенок в окрестности зазора с учетом знака кривизны (табл. 9.4) и для расчета проводимости

#### 9.4. Радиусы кривизны стенок и коэффициенты проводимости межроторного канала ДВН

Угол поворота роторов $\alpha, ^\circ$	Радиус кривизны стенки ротора, мм		Коэффициент проводимости межроторной щели $K_{\text{пр}}$
	$R_1$	$R_2$	
0	26,5	-27,5	0,03
3	26,85	-28,7	0,037
6	27,4	-32,3	0,053
9	27,8	-41,6	0,078
12	28,0	-84,2	0,111
15	28,2	-125,6	0,149
18	28,3	-27,8	0,181
21	28,3	14,9	0,206
24	28,4	11,0	0,222
27	28,4	9,8	0,228
30	28,4	9,9	0,227
33	28,4	10,7	0,223
36	28,4	11,8	0,218
39	28,4	13,1	0,212
42	28,4	14,7	0,207
45	28,4	15,8	0,204

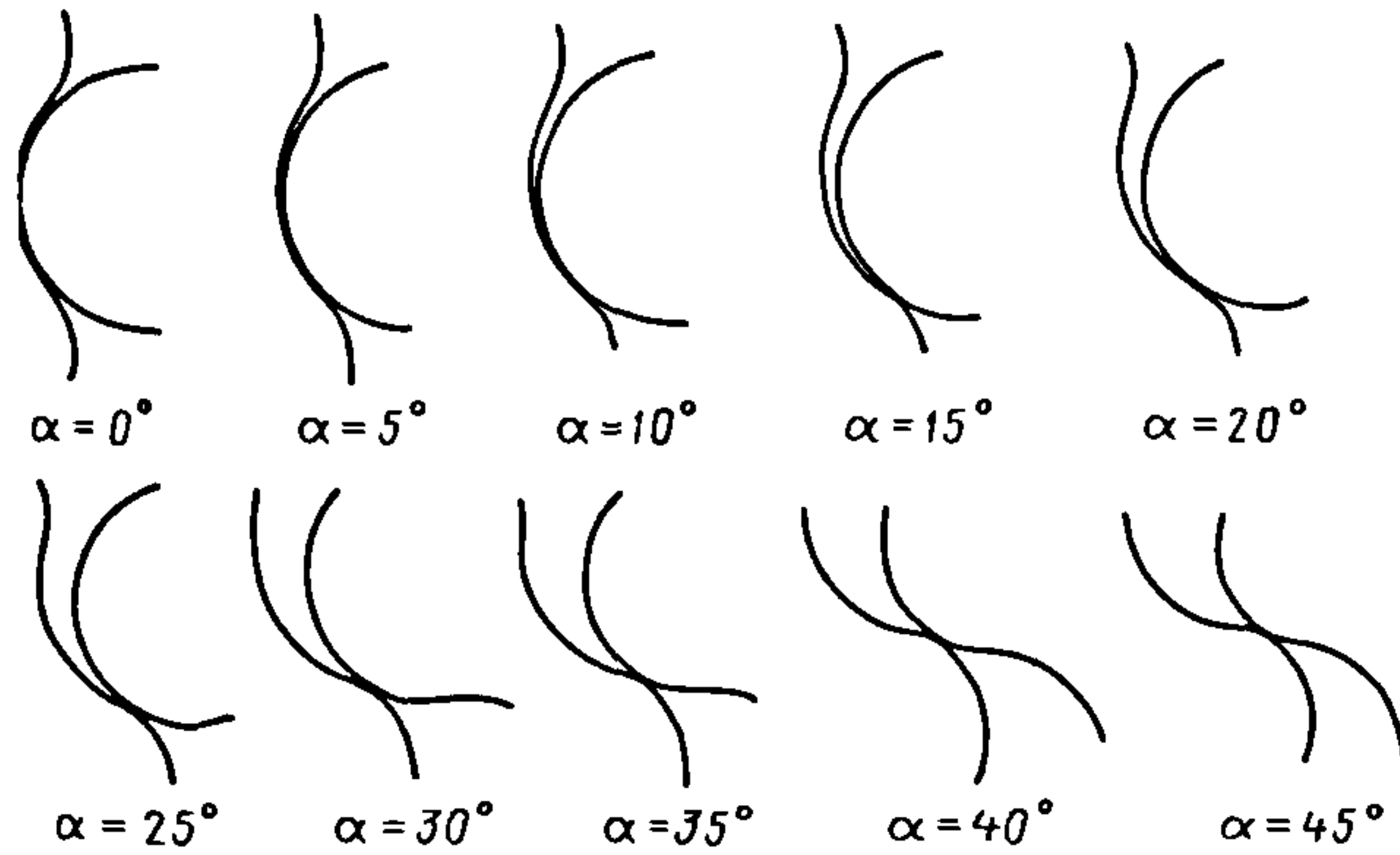


Рис. 9.33. Форма межроторного канала ДВН типа Руте

используются выражения (9.43) – (9.46). Проводимость межроторного канала, подставляемая в формулу (9.37), определяется усреднением значений проводимости, рассчитанных для каждого угла поворота роторов.

Для расчета проводимости каналов ДВН в молекулярно-вязкостном режиме ( $0,01 < \text{Kn} < 1$ ) используется известная эмпирическая зависимость

$$U_{\text{м.в}} = U_{\text{в}} + zU_{\text{м}}, \quad (9.47)$$

где  $U_{\text{м}}$  – проводимость канала в молекулярном режиме течения;  $U_{\text{в}}$  – проводимость канала в вязкостном режиме при тчении без скольжения на стенках;  $z$  – эмпирический коэффициент, определяемый для щелевых каналов в виде

$$z = \frac{1 + \delta p_{\text{ср}} \sqrt{M/R_g T}}{1 + 1,24 \delta p_{\text{ср}} \sqrt{M/R_g T}}, \quad (9.48)$$

где  $p_{\text{ср}} = (p_{\text{в}} + p_{\text{вых}})/2$  – среднее давление на концах щелей;  $M$  – молекулярная масса газа.

Температуры роторов  $T_{\text{р}}$  и корпуса  $T_{\text{к}}$  насоса определяются по формулам (9.29), (9.30). Величины зазоров с учетом тепловых деформаций ротора и корпуса находятся по следующим формулам:

– радиальный зазор

$$\delta_{\text{рк}} = \delta_{\text{ркм}} + R[\alpha_{\text{к}}(T_{\text{к}} - T_{\text{м}}) - \alpha_{\text{р}}(T_{\text{р}} - T_{\text{м}})], \quad (9.49)$$

где  $\delta_{\text{ркм}}$  – монтажные радиальные зазоры между корпусом и головкой ротора;  $T_{\text{м}}$  – температура монтажа;

– межроторный зазор

$$\delta_{\text{рр}} = \delta_{\text{ррм}} + A \cos \gamma \times$$

$$\times [\alpha_{\text{р}}(T_{\text{р}} - T_{\text{м}}) - \alpha_{\text{к}}(T_{\text{к}} - T_{\text{м}})], \quad (9.50)$$

где  $\gamma$  – угол наклона общей нормали к точке в месте минимального зазора;

$\delta_{\text{ррм}}$  – монтажный радиальный зазор между роторами;

– торцовые зазоры

$$\delta_{\text{т1}} = \delta_{\text{т1м}} + l_{\text{п}}[\alpha_{\text{к}}(T_{\text{к}} - T_{\text{м}}) - \alpha_{\text{р}}(T_{\text{р}} - T_{\text{м}})], \quad (9.51)$$

$$\delta_{\text{т2}} = \delta_{\text{т2м}} + (L + l_{\text{п}}) \times$$

$$\times [\alpha_{\text{к}}(T_{\text{к}} - T_{\text{м}}) - \alpha_{\text{р}}(T_{\text{р}} - T_{\text{м}})], \quad (9.52)$$

где  $\delta_{\text{т1м}}$  ( $\delta_{\text{т2м}}$ ) – монтажный зазор между ротором и торцевой крышкой со стороны неподвижной (подвижной) опоры;  $l_{\text{п}}$  – расстояние от упорного подшипника до торца ротора.

Действительная быстрота действия в зависимости от давления на входе  $S_{\text{вх}} = f(p_{\text{вх}})$  рассчитывается в такой последовательности: исходной является характеристика форвакуумного насоса  $S_{\text{ф}} = f(p_{\text{ф}})$ , определяющая для каждого давления  $p_{\text{вых}} = p_{\text{ф}}$  поток газа через ДВН  $Q = S_{\text{ф}} p_{\text{вых}}$ . Поскольку значения давления  $p_{\text{вх}}$ ,  $p_{\text{вх.п}}$  и  $p_{\text{в}}$ , соответствующие  $p_{\text{вых}}$ ,



заранее неизвестны, то расчет ведется методом последовательных приближений. Задавая для известных  $p_{\text{вых}}$  и  $S_{\text{ф}}$  давление  $p_{\text{вх}}$  первого приближения, путем совместного решения системы уравнений (9.34)–(9.36), находят величины объемного расхода газа в сечениях с давлением  $p_{\text{вх}}$ ,  $p_{\text{вх.п}}$  и  $p_{\text{у}}$ .

Зная все значения, соответствующие параметрам газа на входе первого приближения, рассчитывают массовый расход газа на входе первого приближения. Условием сходимости расчета является отличие массовых расходов газа  $S_{\text{вх}} p_{\text{вх}} / R_{\text{г}} T_{\text{вх}}$  и  $S_{\text{ф}} p_{\text{вых}} / R_{\text{г}} T_{\text{вых}}$  предыдущего и последующего приближений менее чем на величину заданной точности расчета.

Если полученное значение быстроты действия меньше требуемого согласно техническому заданию, то можно увеличить длину роторов и заново рассчитать  $S_{\text{вх}}$ .

Мощность, затрачиваемая на привод ДВН, определяется по формуле

$$N = S_{\text{вх}} (p_{\text{вых}} - p_{\text{вх}}) / \psi, \quad (9.53)$$

где  $\psi$  – изохорный КПД, принимаемый для ДВН в пределах 0,5...0,85.

Вакуумные насосы типа Рутс выпускают более десятка ведущих отечественных и зарубежных производителей: Edwards (Великобритания), Varian (США), Busch (Германия), Leybold (Германия), Alcatel (Франция), ОАО «Вакууммаш» (Россия), Мелитопольский компрессорный завод (Украина) и др.

Предприятие ОАО «Вакууммаш» (г. Казань) выпускает двухроторные вакуумные насосы серии НВД (ДВН). Насос НВД-200 (рис. 9.34) состоит из собственно насоса и соединенного с ним электродвигателя. Несущей частью насоса является корпус 1, на торцы которого крепятся крышки 2, 3 с размещенными в них подшипниками. Рабочая камера насоса образуется между корпусом и торцовыми крышками. В ней синхронно вращаются роторы 4, 5, вращение к которым передается через втулочно-пальцевую полумуфту 28 от электродвигателя, прифланцованного к насосу с помощью корзины 29. Полумуфта фиксируется на валу ведущего ротора гайкой 30.

Роторы опираются на подшипники качения. Со стороны привода стоят цилиндрические роликовые подшипники 6, которые являются «плавающей опорой», допускающей температурную деформацию роторов. Подшипники 6 закреплены в корпусах 7 кольцами 8, а на валах роторов – шайбами 9 и гайками 10.

Внутренние полости крышек 2 и 11 образуют полость задней крышки, в которой расположены косозубые шестерни 12, 13, обеспечивающие синхронное вращение роторов. Шестерня 12 фиксируется на валу ведомого ротора 4 с помощью шпонки 14. Для обеспечения взаимно-перпендикулярного расположения роторов шестерня 13 и ее ступица 15 выполнены отдельно. Ступица фиксируется на валу ведущего ротора 5 посредством шпонки. Шестерня 13 закреплена на ступице 15 двумя штифтами и четырьмя болтами 31.

Крышки 11 и 27 совместно с торцовыми крышками 2, 3 прикреплены к корпусу с помощью шпилек 16. Разъемы между крышками 2, 11 и корпусом 1, а также между крышками 3, 27 и корпусом 1 уплотнены резиновыми прокладками 17.

Для уменьшения перепада давления между полостями передней и задней крышек и рабочей полостью проводится откачка полостей передней и задней крышек форвакуумным насосом.

В задней торцовой крышке 2 размещены радиально-упорные подшипники 18, обеспечивающие жесткую фиксацию роторов в осевом направлении. Подшипники 18 установлены в корпусах 19. Прокладки 20 в виде стальных шайб, установленные между крышкой 2 и корпусом подшипников 19, обеспечивают фиксированный зазор между торцовыми поверхностями роторов и крышкой 2 в пределах 0,07... 0,09 мм.

Смазывание подшипников 6, 18 и шестерен 12, 13 осуществляется разбрызгиванием масла дисками 21, нижняя часть которых погружена в масло. Контроль за уровнем масла в полостях задней и передней крышек ведется через смотровые стекла 24 и 25, установленные в крышках 11 и 27.

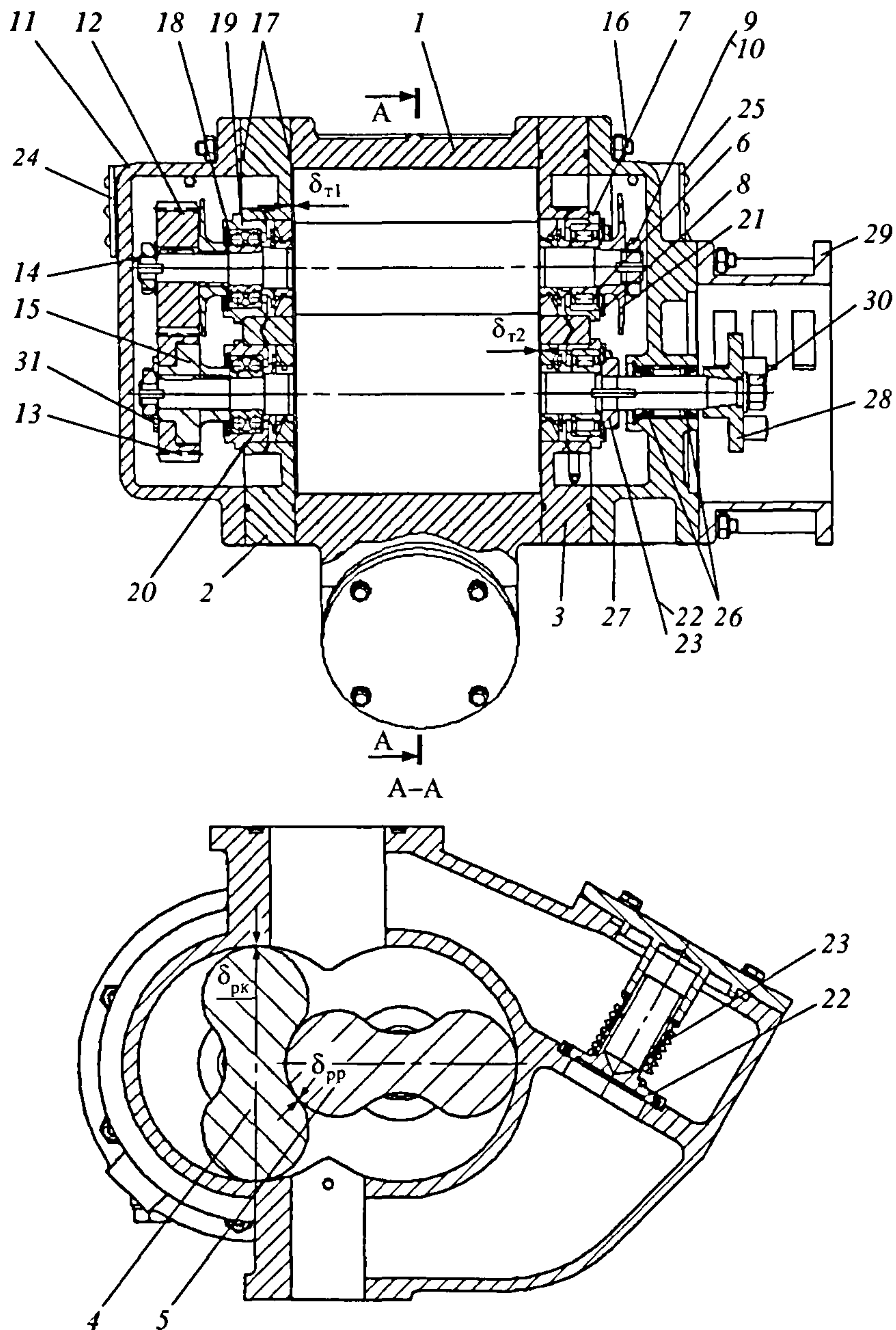


Рис. 9.34. Насос НВД-200:

1 – корпус; 2, 3, 11 и 27 – крышки; 4 и 5 – роторы; 6 – цилиндрические роликовые подшипники; 7 и 19 – корпуса подшипника; 8 – кольцо; 9 – шайба; 10 и 30 – гайки; 12 и 13 – косозубые шестерни; 14 – шпонка; 15 – ступица; 16 – шпильки; 17 – резиновая прокладка; 18 – радиально-упорные подшипники; 20 – стальная прокладка; 21 – диск; 22 – перепускной канал; 23 – пружина; 24 и 25 – смотровые окна; 26 – манжетные уплотнения; 28 – втулочно-пальцевая муфта; 29 – корзина; 31 – болт



Для предохранения от перегрузок в корпус насоса вмонтирован перепускной клапан 22, закрывающийся с помощью пружины 23. При рабочем давлении  $> 1330$  Па для насоса НВД-200 и  $> 665$  Па для НВД-600 перепускной клапан 22 открывается и газ частично перепускается по каналу в корпусе насоса с выхода на вход, предотвращая пережатие газа и, значит, перегревание и заклинивание насоса.

Герметичность ведущего вала со стороны атмосферы обеспечивается манжетными уплотнениями 26.

Профиль роторов насосов НВД-200 (ДВН-50) и НВД-600 (ДВН-150) одинаков, отличие состоит в длине роторов: 150 мм у НВД-200 и 350 мм у НВД-600. С целью обеспечения надежной работы ДВН монтажные зазоры существенно больше определяемых по формулам (9.25) – (9.28). Так, для НВД-200:  $\delta_{ркм} = 0,04...0,105$  мм,  $\delta_{ррм} = 0,08...0,3$  мм,  $\delta_{т1м} = 0,07...0,09$  мм,  $\delta_{т2м} = 0,11...0,195$  мм.

На базе насосов НВД-200 и НВД-600 выпускается ряд агрегатов вакуумных двухроторных АВД, состоящих из последовательно соединенных двухроторных и пластинчато-роторных насосов различной производительности (табл. 9.5). Агрегаты АВД предназначены для откачки из гер-

метичных объемов воздуха; не агрессивных к рабочей жидкости и материалам конструкции пожаро- и взрывобезопасных, а также нетоксичных газов, паров и парогазовых смесей, очищенных от капельной влаги и механических загрязнений, с содержанием кислорода не более чем в воздухе. Агрегаты имеют наибольшую быстроту действия в диапазоне входного давления  $6,6...1,3 \cdot 10^2$  Па. Уровень шума, создаваемый агрегатом на предельном остаточном давлении без газобалласта, на расстоянии  $2,5 \text{ м} \leq 85$  дБ.

Зависимости быстроты действия насосов  $S_{вх} = f(p_{вх})$  НВД-200 и НВД-600, представленные на рис. 9.35, имеют характерный максимум. Быстрота действия на участке от остаточного давления до рабочего, соответствующего максимальной производительности ДВН (левая ветвь кривой), увеличивается благодаря соответствующему росту быстроты действия ФВН. При дальнейшем повышении давления режим течения газа в каналах ДВН меняется с молекулярного на переходный и вязкостный, а значит, увеличиваются обратные перетекания через каналы с выхода на вход, что приводит к снижению  $S_{вх}$ .

### 9.5. Параметры агрегатов серии АВД

Параметр	АВД-50/5	АВД-50/16	АВД-150/25	АВД-150/63
Быстрота действия при рабочем давлении 26,6 Па, м <sup>3</sup> /ч (л/с)	180±30 (50±8)		550±90 (155±25)	
Предельное остаточное давление, Па, не более: с учетом паров рабочей жидкости (полное) парциальное по воздуху			1,3·10 <sup>-1</sup> 6,6·10 <sup>-3</sup>	
Тип двухроторного насоса, установленного в агрегате	НВД-200		НВД-600	
Тип форвакуумного насоса, установленного в агрегате	2НВР-5ДМ	2НВР-60Д	2НВР-90Д	2НВР-250Д
Мощность, потребляемая при давлении 26,6 Па, кВт, не более	0,8	1,5		3
Установленная мощность электродвигателей агрегата, кВт, не более	1,65	3,3		6,6
Охлаждение агрегата	Воздушное			Воздушно-водяное
Масса, кг, не более	105	155	180	350
Габаритные размеры, мм	688×449× ×778	918×380×700	1030×380× ×700	1134×390×800

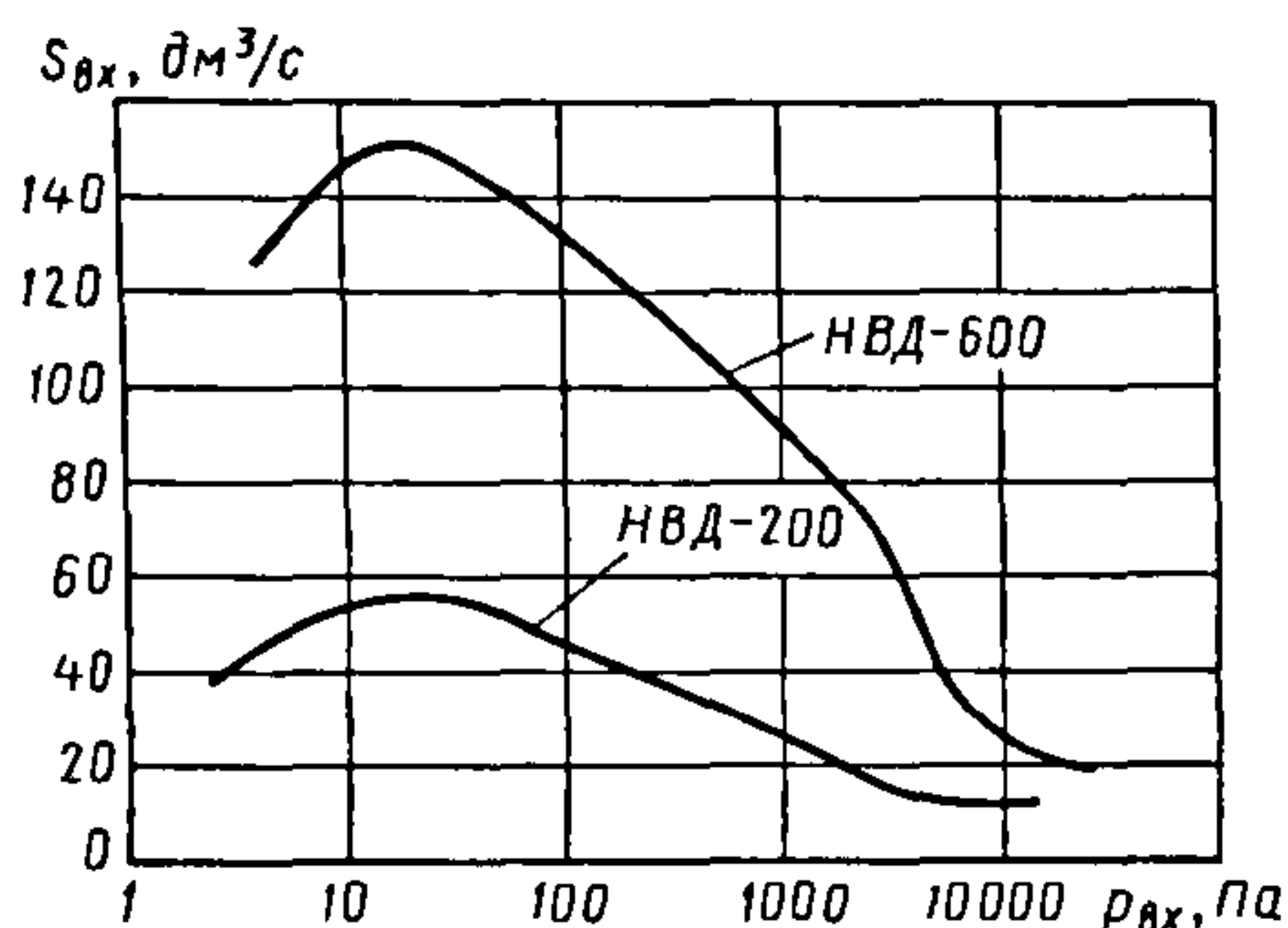


Рис. 9.35. Паспортные характеристики насосов НВД-200 и НВД-600

В агрегате АВД-50/5 насосы НВД-200 и 2НВР-5ДМ установлены на верхнем и нижнем основаниях рамы (рис. 9.36). В агрегатах АВД-50/16, АВД-150/25 и АВД-150/63 двухроторный насос соединен с соответствующим пластинчато-роторным насосом с помощью переходника, выполняющего одновременно функции трубопровода и опорного узла (рис. 9.37 и 9.38).

«Большие» двухроторные вакуумные насосы серии 2ДВН (рис. 9.39) выпускаются Мелитопольским компрессорным заводом. Эти насосы предназначены для

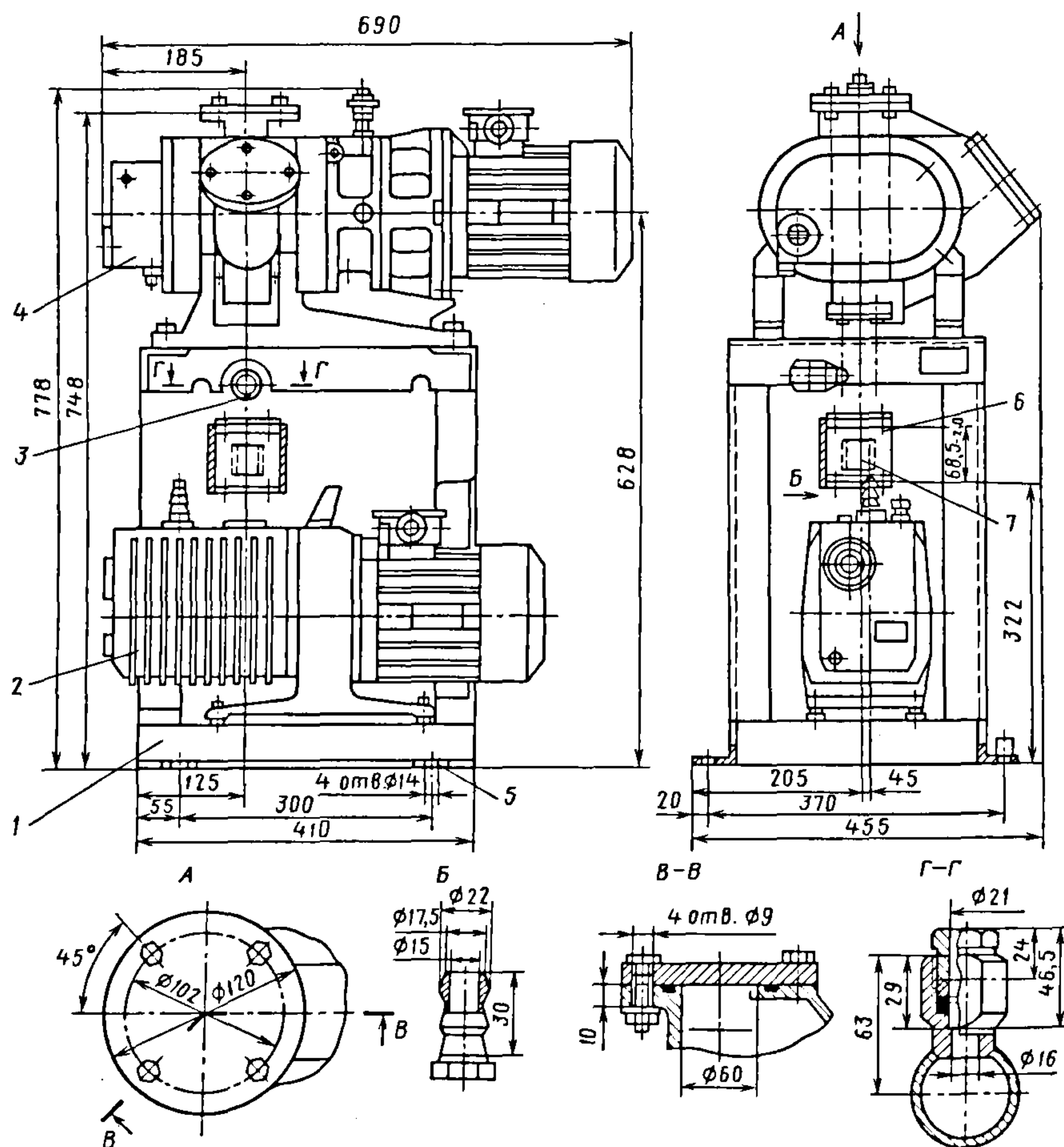


Рис. 9.36 Агрегат АВД-50/5:

1 – рама; 2 – насос 2НВР-5ДМ; 3 – переходный патрубок; 4 – насос НВД-200;  
5 – фундаментные болты; 6 – экран; 7 – сильфонный узел



откачки воздуха и газов, не агрессивных к серому чугуну, конструкционной стали и вакуумному маслу. Профиль роторов насосов 2ДВН-500 и 2ДВН-1500 одинаковый, отличие состоит в длине роторов: 280 мм у 2ДВН-500 и 700 мм у 2ДВН-1500.

Зазоры, мм, в насосах 2ДВН следующие:  $\delta_{ркм} = 0,2$ ,  $\delta_{ррм} = 0,35$ ,  $\delta_{т1м} = 0,15$ ; в 2ДВН-500  $\delta_{т2м} = 0,4$ , в 2ДВН-1500  $\delta_{т2м} = 0,9$ .

Конструкция насосов серии 2ДВН схожа с НВД. Передача вращения осуществляется через упругую пальцевую муфту 1 от электродвигателя, корпус которого соединен фланцем с насосом. В расточке

корпуса 2 синхронно вращаются роторы 3 и 4. Они опираются на подшипники качения. Со стороны привода – сдвоенный радиально-упорный шарикоподшипник 5, способный воспринимать двустороннюю осевую нагрузку. Осевое смещение подшипника регулируется подбором и установкой колец из стальной ленты. С противоположной стороны роторы опираются на роликовые подшипники 6, которые не препятствуют тепловому удлинению роторов. Для обеспечения соосности в корпусе, крышках и кожухе со стороны привода имеются штифты.

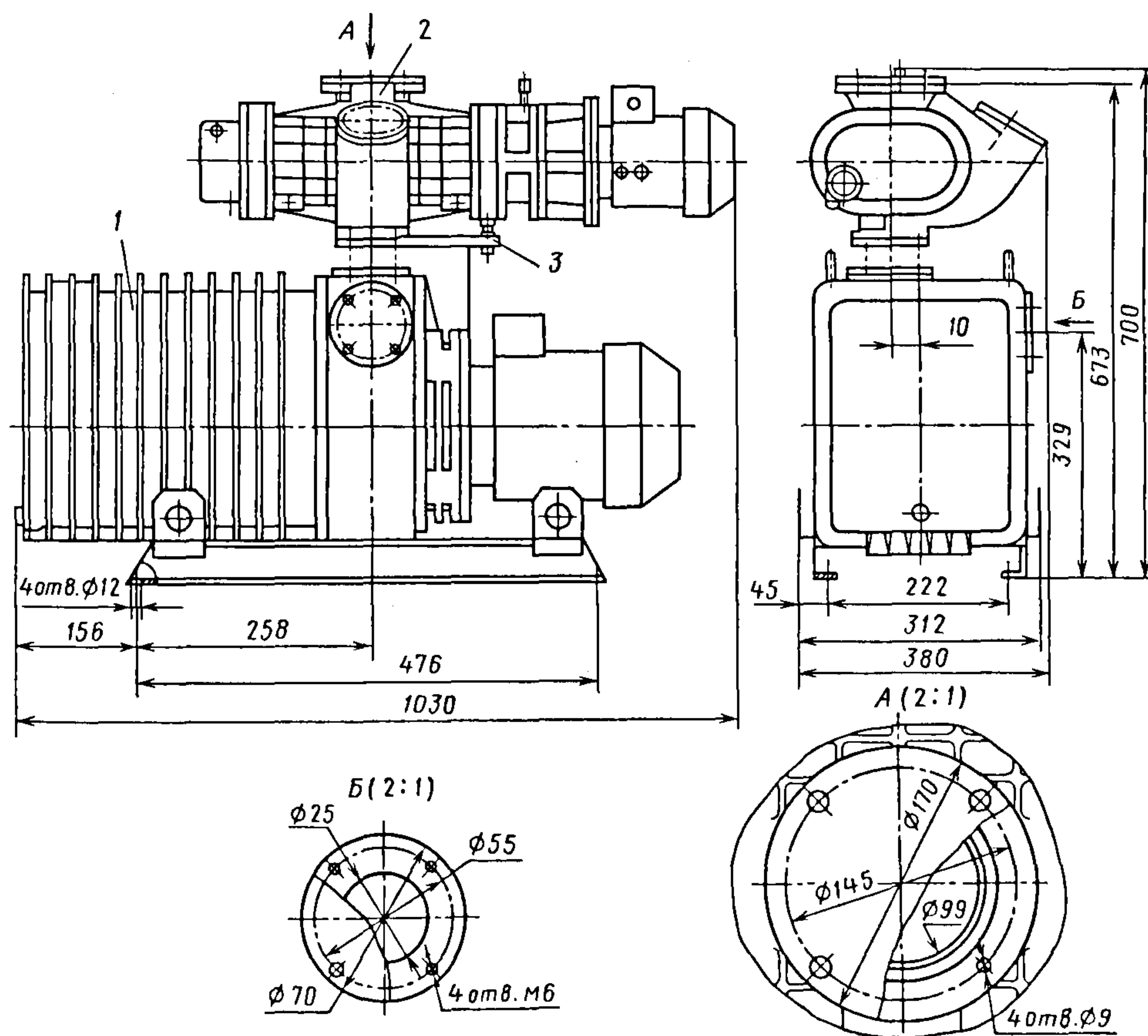


Рис. 9.37 Агрегат АВД-150/25:

1 – насос 2НВР-90Д; 2 – насос НВД-600; 3 – переходник

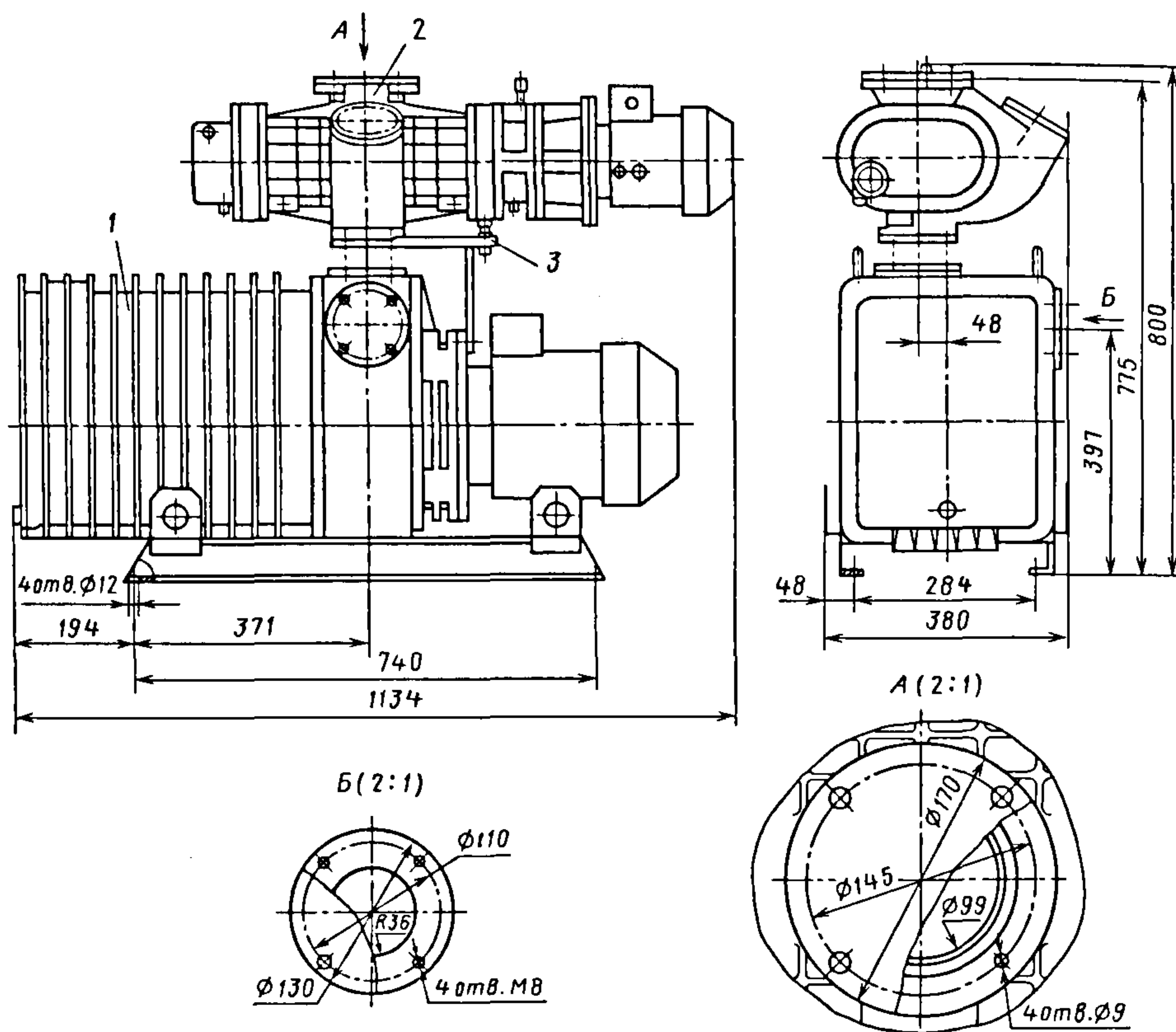


Рис. 9.38. Агрегат АД-150/63:  
1 – насос 2НВР-250Д; 2 – насос НВД-600; 3 – переходник

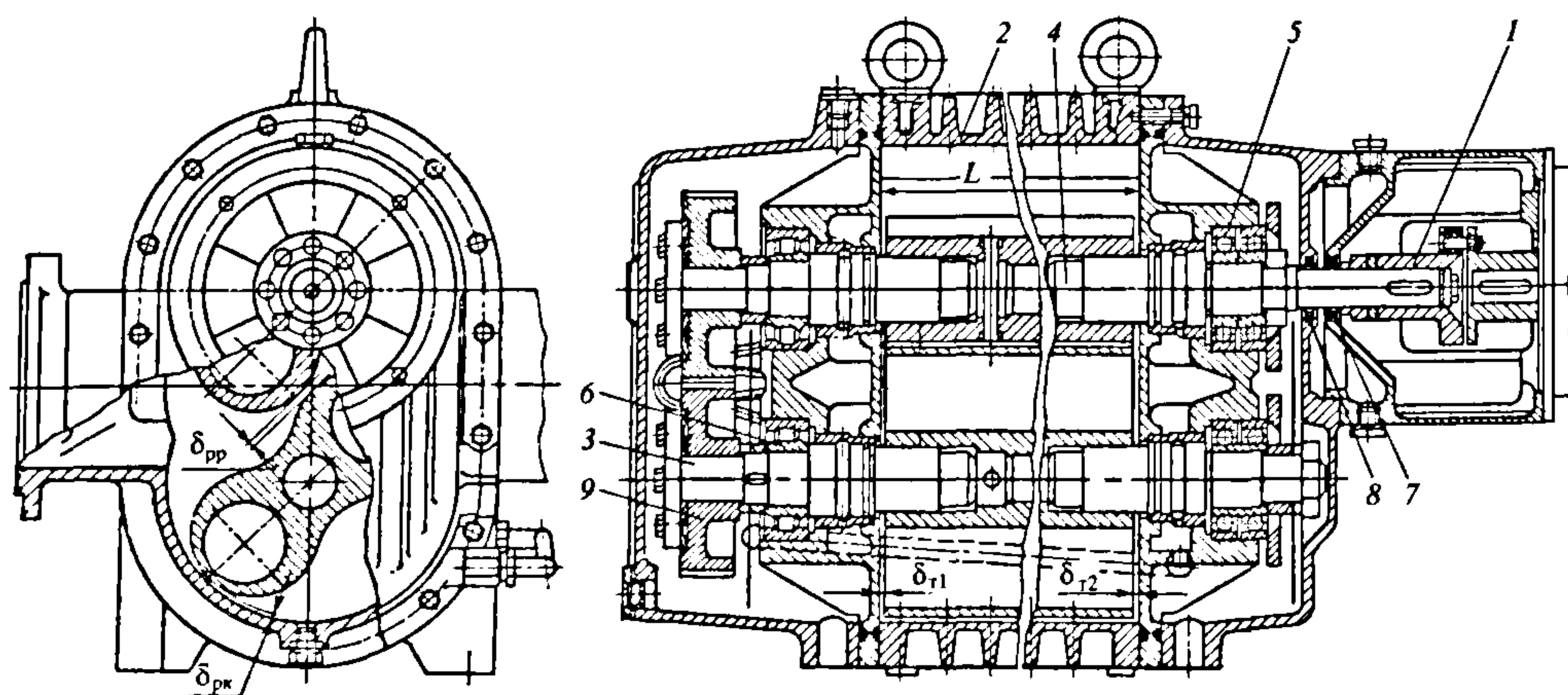
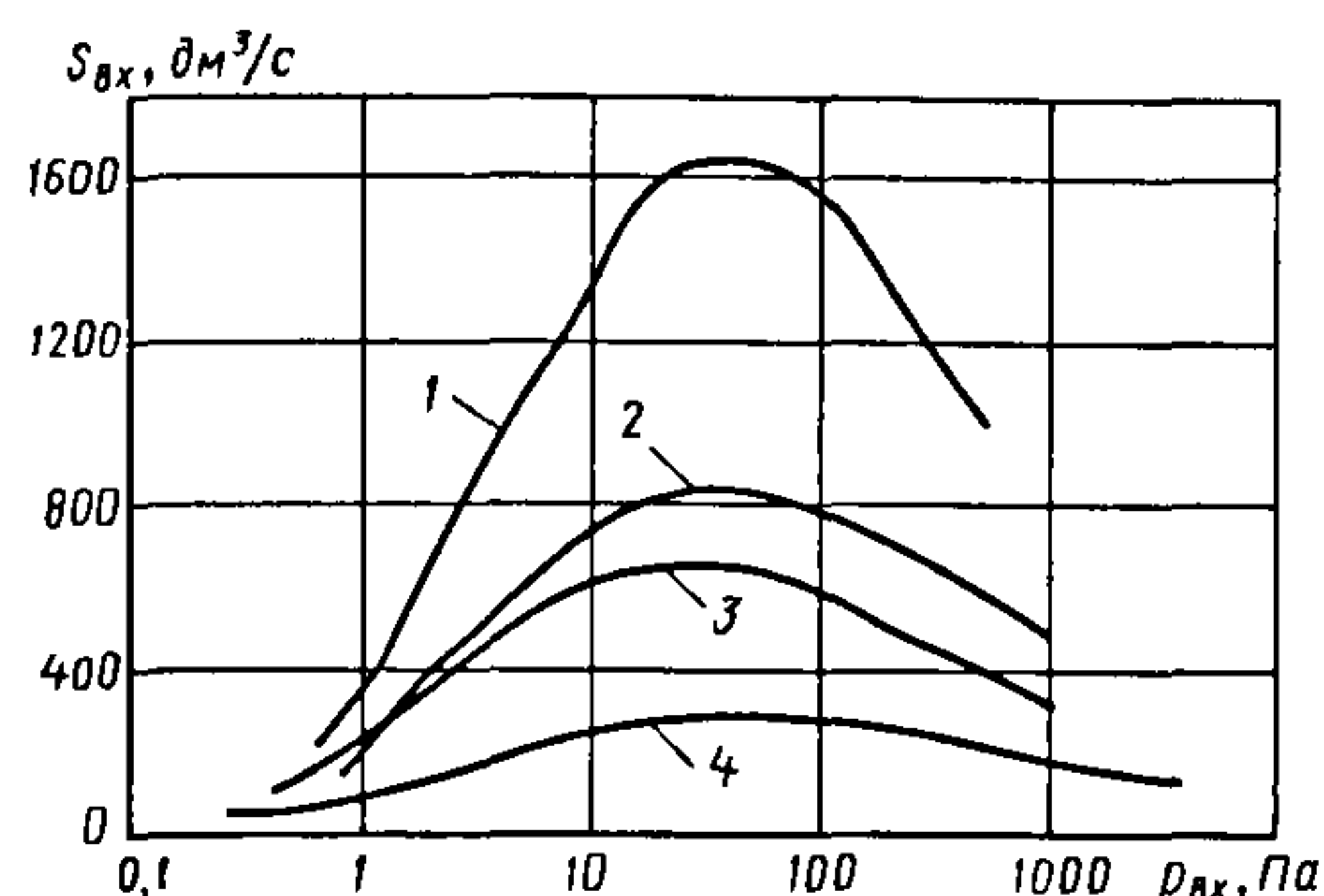
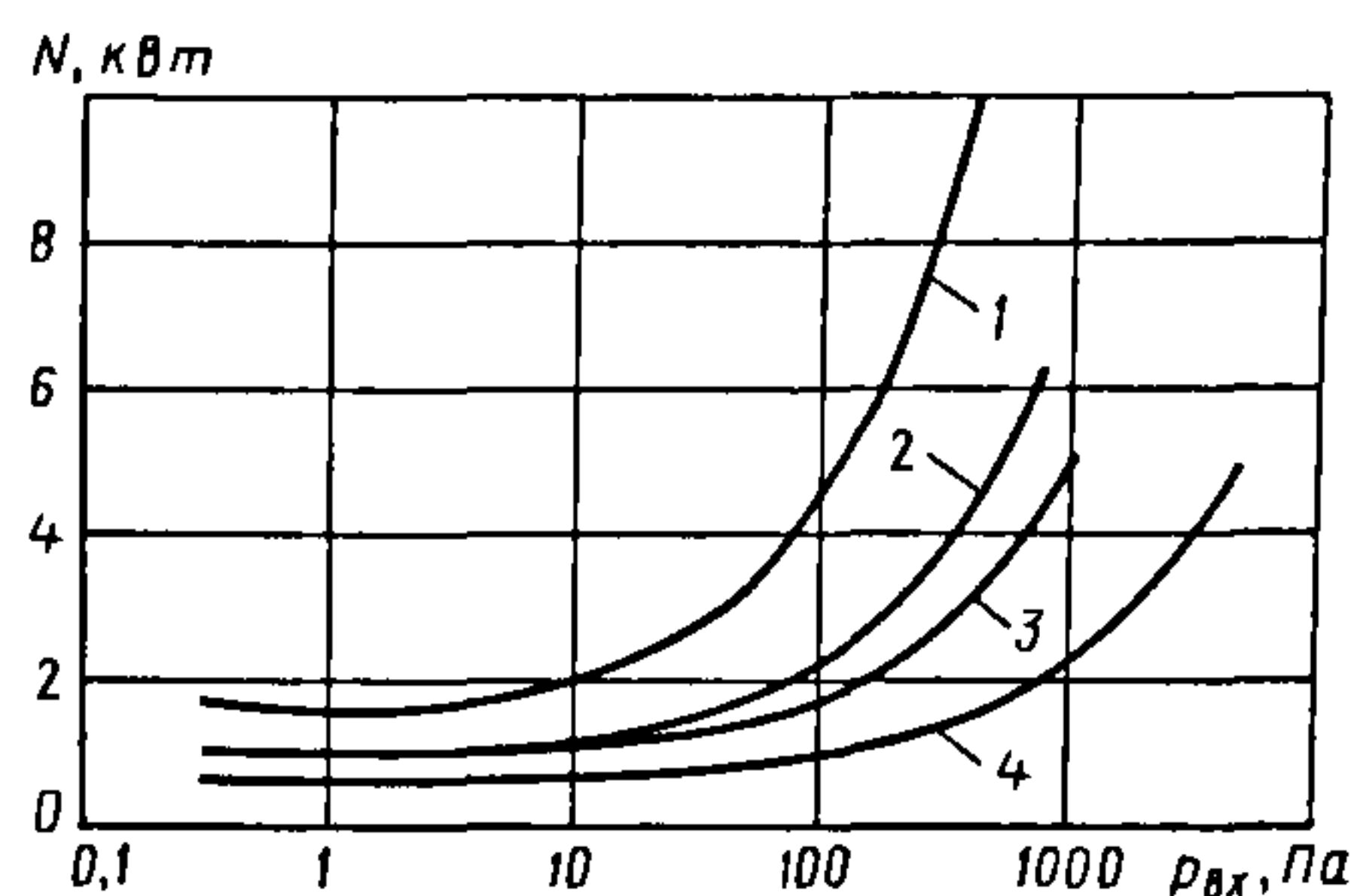


Рис. 9.39. Двухроторный насос типа 2ДВН:  
1 – упругая пальцевая муфта; 2 – корпус; 3 и 4 – роторы; 5 – двойной радиально-упорный подшипник; 7 и 8 – манжетные уплотнения; 9 – ведомая косозубая шестерня





**Рис. 9.40. Быстрота действия насосов серии 2ДВН при различных угловых скоростях  $\omega$ :**  
 1 – 2ДВН-1500+АВЗ-180,  $\omega = 305$  рад/с;  
 2 – 2ДВН-1500+АВЗ-180,  $\omega = 152$  рад/с;  
 3 – 2ДВН-500+АВЗ-90,  $\omega = 305$  рад/с;  
 4 – 2ДВН-500+АВЗ-90,  $\omega = 152$  рад/с



**Рис. 9.41. Мощность, потребляемая насосами серии 2ДВН:**  
 1 – 2ДВН-1500,  $\omega = 305$  рад/с;  
 2 – 2ДВН-500,  $\omega = 305$  рад/с;  
 3 – 2ДВН-1500,  $\omega = 152$  рад/с;  
 4 – 2ДВН-500,  $\omega = 152$  рад/с;

Ввод вала ведущего ротора 4 герметизирован манжетными уплотнениями 7, 8, пространство между которыми заполняется вакуумным маслом. Системы смазывания подшипников и шестерен – жидкостная и циркуляционно-барботажная. Два диска на валу нижнего ротора 3 достигают уровня масла и при вращении создают масляный туман, которым смазываются трущиеся поверхности.

Для отстоя и охлаждения масла предусмотрена циркуляция его по контуру, связывающему обе масляные ванны. Циркуляцию обеспечивает расположенный у ведомой шестерни 9 диск, который забрасывает масло в наклонную трубу. По ней масло течет в ванну на стороне привода,

откуда возвращается по трубе под насосом в ванну на стороне шестерен.

Охлаждение насоса воздушное – потоком воздуха от вентилятора электродвигателя. Насос 2ДВН-1500, кроме того, имеет еще и систему водяного охлаждения. Водой охлаждаются корпус на стороне выхода и масло через змеевик, расположенный в кожухе шестерен. При нагрузке  $< 50\%$  от номинальной, а также при кратковременной работе подача воды в насос 2ДВН-1500 необязательна. Паспортные зависимости быстроты действия и потребляемой мощности насосов серии 2ДВН представлены на рис. 9.40 и 9.41, а некоторые параметры – в табл. 9.6

### 9.6. Параметры насосов серии 2ДВН

Параметр	2ДВН-500	2ДВН-500-4	2ДВН-500-4/2
Быстрота действия, м³/ч	0,5	0.25	0,25/0,5
Тип форвакуумного насоса	АВЗ-90		
Электродвигатель:			
тип	4АМ112М2У3	4АМ112М4У3	4АМ112М/2
частота вращения, с <sup>-1</sup>	48,6	24,3	24,3/48,6
мощность, кВт	7,5	5,5	4,2/5
Уровень звука, дБ	90	72	72/90
Габаритные размеры, мм	1340×600×850		
Масса, кг	560		

Окончание табл. 9.6

Параметр	2ДВН-1500	2ДВН-1500-4	2ДВН-1500-4/2
Быстрота действия, м <sup>3</sup> /ч	1,5	0,75	0,75/1,5
Расход охлаждающей воды, л/ч, не более	360		
Тип форвакуумного насоса	AB3-180		
Электродвигатель:			
тип	4AM132M2Y3	4AM132M4Y3	4AM132M4/2
частота вращения, с <sup>-1</sup>	48,6	24,3	24,3/48,6
мощность, кВт	11	5,5	8,5/9,5
Уровень звука, дБ	90	72	72/90
Габаритные размеры, мм	1840×580×850		
Масса, кг	830		

Примечание. Для всех приведенных в табл. 9.6 насосов полное предельное остаточное давление  $\leq 0,5$  Па (при давлении на выходе ДВН  $\leq 5$  Па); напряжение электродвигателя 380 В; количество масла на одну заправку (ВМ-1С или ВМ-6) для насосов серии 2ДВН-500 – 4,5 л, для 2ДВН-1500 – 5,7 л; давление запуска 2ДВН-500 и 2ДВН-1500 – 400 Па, 2ДВН-500-4 и 2ДВН-1500-4 – 2000 Па.

**Пример расчета.** Исходные данные: быстрота действия агрегата ДВН с форвакуумным насосом при давлении на входе ДВН 133 Па равна 100 дм<sup>3</sup>/с; температура газа на входе в ДВН 293 К;

материал роторов – сталь 40Х; материал корпуса и торцовых крышек – сплав АК7. Требуется рассчитать основные геометрические и динамические параметры ДВН.

Данные расчета приведены в табл. 9.7.

### 9.7. Пример расчета ДВН

Параметр	Способ определения	Результат
Коэффициент откачки $\lambda$	Выбирается	0,8
Геометрическая быстрота действия ДВН $S_r$ , дм <sup>3</sup> /с	По формуле (9.31)	125
Частота вращения роторов ДВН $n$ , об/с	Принимается равной синхронной частоте вращения электродвигателя	50
Отношение длины ротора к его радиусу $L/R$	Выбирается	3
Коэффициент использования рабочего объема $\chi$		0,6
Расчетный радиус ротора $R$ , мм	По формуле (9.32)	60,46
Радиус ротора ДВН, мм	Округляется расчетный радиус ротора	60
Отношение $b/a$	Выбирается	0,86
Отношение $R/a$	По формуле (9.18)	1,583
Расчетное межцентровое расстояние $A$ , мм	$A = 2a$	75,79
Межцентровое расстояние $A$ , мм	Округляется расчетное межцентровое расстояние	75
Расстояние от центра ротора до центра головки ротора $b$ , мм	$b = 0,86R$	32,25
Радиус головки ротора $r$ , мм	$r = R - b$	27,75



Продолжение табл. 9.7

Параметр	Способ определения	Результат
Ширина впадины ротора $c$ , мм	$c = A - R$	15
Построение теоретического профиля роторов	По уравнениям (9.19), (9.20), (9.23)	Координаты теоретического профиля (рис. 9.42, табл. 9.8)
Площадь, мм <sup>2</sup> : ротора $f_p$ расточки цилиндра	Численный расчет $\pi R^2$	6265,4 11309,4
Уточненный коэффициент использования рабочего объема	По формуле (9.16)	0,554
Расчетная длина ротора $L$ , мм	Из формулы (9.15) подстановкой уточненного $\chi$	199,5
Длина ротора $L$ , мм	Округляется расчетная длина ротора	200
Коэффициенты температурного расширения мм/(мм·град): ротора $\alpha_p$ корпуса $\alpha_k$	По справочным данным	$1,18 \cdot 10^{-5}$ $2,57 \cdot 10^{-5}$
Температура монтажа ДВН $T_m$ , К	Принимаем	293
Максимально допустимый перепад давления между выходом и входом $\Delta p$ , Па		5000
Рабочая температура, К: корпуса $T_k$ ротора $T_p$ торцевой крышки $T_{кр}$	По формуле (9.29) По формуле (9.30) $T_{кр} = T_p + T_k / 2$	327,4 340 333,7
Монтажные зазоры, мм: межроторный $\delta_{ppm}$ радиальные $\delta_{pkm}$ торцовый со стороны неподвижной опоры $\delta_{t1m}$ торцовый со стороны подвижной опоры $\delta_{t2m}$	По формулам (9.49)–(9.52) и увеличиваются с учетом запаса	0,15
		0,1
		0,15
Эквивалентная длина торцевой щели $l_t$ , мм	По формуле (9.40)	42,75
Коэффициенты проводимости: торцевой щели $K_{t1}$ с зазором $\delta_{t1}$ торцевой щели $K_{t2}$ с зазором $\delta_{t2}$ радиальных щелей $K_{зpk1} = K_{зpk2}$ с зазорами $\delta_{pk1} = \delta_{pk2}$	По формуле (9.39) По формуле (9.39) По формуле (9.43)	0,0142 0,0199 0,089
Радиусы кривизны стенок роторов $R_1$ и $R_2$ в месте минимального зазора и коэффициенты проводимости межроторной щели $K_{зpp}$ при различных углах поворота роторов	По формуле (9.43) для различных углов поворота роторов (через 3° в интервале от 0 до 45°)	Табл.9.8

Окончание табл. 9.7

Параметр	Способ определения	Результат
Проводимости каналов при молекулярном режиме, $\text{дм}^3/\text{с}$ : радиального $U_{\text{рк1}} = U_{\text{рк2}}$ торцового $U_{\text{т1}}$ торцового $U_{\text{т2}}$ межроторного $U_{\text{гр}}$	Из формулы (9.38)	0,206 0,0321 0,0675 0,566
Суммарная проводимость каналов ДВН при молекулярном режиме $U_0$ , $\text{дм}^3/\text{с}$	По формуле (9.37)	0,872
Форвакуумный насос	Выбирается	2НВР-60Д
Быстрота действия ФВН $S_{\text{ф}}$ , $\text{дм}^3/\text{с}$ , при различных давлениях на выходе $p_{\text{вых}}$	По паспортной характеристике ФВН $S_{\text{ф}} = f(p_{\text{ф}} - p_{\text{вых}})$	Массив значений $S_{\text{ф}}$ и соответствующих $p_{\text{вых}}$
Быстрота действия ДВН на входе $S_{\text{вх}}$ , $\text{дм}^3/\text{с}$ , при давлении $p_{\text{вх}}$	Для массива значений $S_{\text{ф}} - p_{\text{вых}}$ путем решения методом последовательных приближений системы уравнений (9.34)–(9.36) находятся соответствующие значения $S_{\text{вх}}$ и $p_{\text{вх}}$ . Строится зависимость $S_{\text{вх}} = f(p_{\text{вх}})$ (рис. 9.43)	Быстрота действия ДВН ( $S_{\text{вх}} = 102 \text{ дм}^3/\text{с}$ при $p_{\text{вх}} = 133 \text{ Па}$ ). Полученный результат удовлетворяет заданию

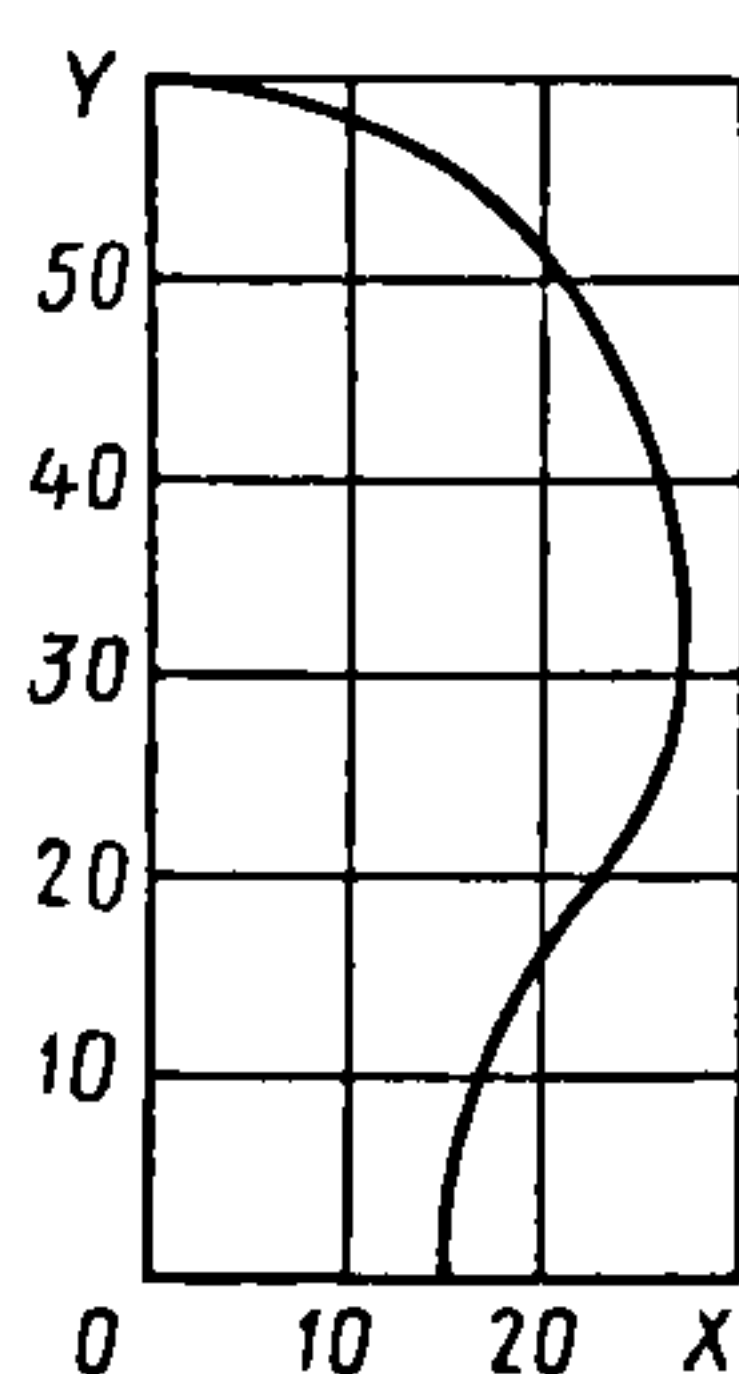
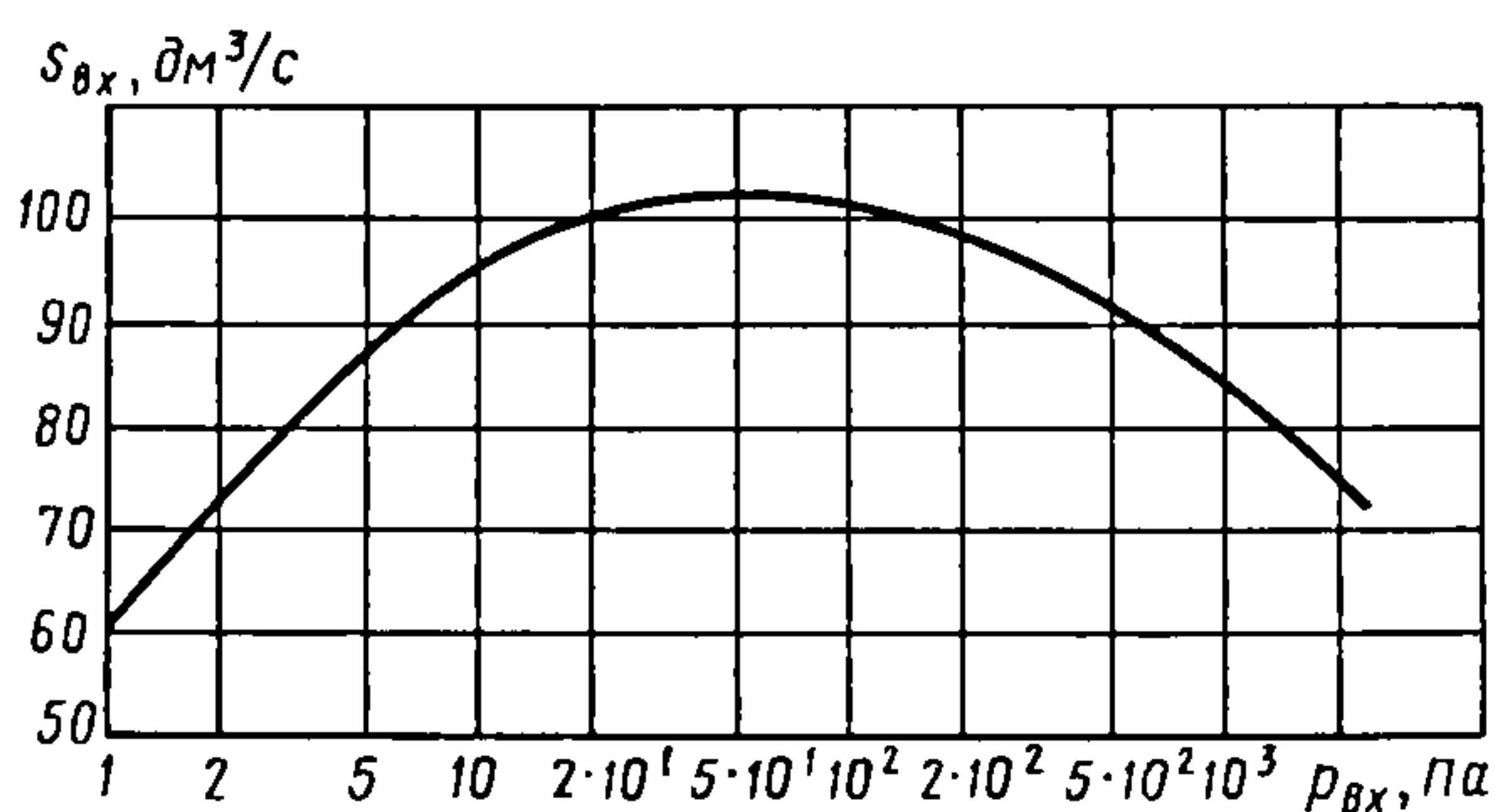


Рис. 9.42. Профиль ротора проектируемого ДВН

Рис. 9.43. Зависимость быстроты действия от давления на входе проектируемого ДВН при  $n = 50 \text{ с}^{-1}$  с форвакуумным насосом 2НВР-60Д

## 9.8. Координаты теоретического профиля проектируемого ДВН

X, мм	Y, мм	X, мм	Y, мм	X, мм	Y, мм	X, мм	Y, мм
0,00	60,00	19,40	51,62	27,09	31,55	17,72	11,99
3,08	59,82	21,43	49,24	26,84	28,40	16,54	9,11
6,13	59,28	23,18	46,63	26,21	25,28	15,69	6,13
9,09	58,39	24,63	43,84	24,90	22,35	15,17	3,07
11,93	57,16	25,75	40,89	22,92	19,83	15,00	0,00
14,62	55,61	26,55	37,84	20,95	17,35		
17,13	53,76	26,99	34,71	19,20	14,74		



Поскольку одна ступень Рутса при работе на атмосферу не обеспечивает приемлемой степени понижения давления, то ДВН практически всегда эксплуатируются с ФВН. Долгие годы в качестве форвакуумных насосов к ДВН использовали насосы с масляным уплотнением типа НВР или НВЗ. В некоторых случаях, например для откачки запыленных сред, вместо насосов с масляным уплотнением применяют водокольцевые насосы (ВВН). Однако предварительный вакуум, достигаемый ВВН, обычно недостаточен для двухроторного насоса.

Обеспечить нормальный режим работы ДВН можно путем установки на вход водокольцевого насоса воздуховоздушного эжектора или использования на выходе ДВН теплообменника, проходя через который, охлажденный газ возвращается в рабочую камеру насоса, отсеченную от входа и выхода насоса. Оба решения существенно усложняют конструкцию агрегата, повышают его стоимость и ведут к ухудшению откачных параметров.

Существуют агрегаты, состоящие из нескольких последовательно включенных ступеней Рутса, разделенных промежуточными перегородками, например трехступенчатый агрегат фирмы Calspan Technology Products (США), обеспечивающий остаточное давление  $\sim 100$  Па. Пятиступенчатый агрегат фирмы Alcatel (Франция) позволяет понизить остаточное давление до  $8 \cdot 10^{-1}$  Па.

Трехлепестковый профиль ДВН (см. рис. 9.26, б) обеспечивает более высокую степень понижения давления. В Японии выпускаются безмасляные агрегаты, имеющие от двух до шести ступеней с трехлепестковым профилем роторов. В этих машинах степень повышения давления при работе с выхлопом в атмосферу равна: в двухступенчатых  $\sim 40 \dots 70$ ; трехступенчатых  $\sim 500 \dots 1500$ ; пятиступенчатых  $\sim 5000$ ; шестиступенчатых  $\sim 200\,000$ .

### 9.3.2. Двухроторные насосы с полным внутренним сжатием типа «Claw»

Еще одной широко известной бесконтактной двухроторной машиной является насос с профилем роторов кулачково-зубчатого типа (известный также как «Northey»).

В кулачково-зубчатом вакуумном насосе (КЗВН) (рис. 9.44) перемещение газа осуществляется в замкнутой полости изменяющегося объема, которая образуется между зубьями роторов 5, расточкой корпуса 4 и торцовыми крышками 1, 2. Как и в ДВН, роторы вращаются навстречу друг другу с гарантированным зазором. Синхронность вращения роторов обеспечивают шестерни связи 8, расположенные в масляном картере. На выходе валов роторов из рабочей полости насоса установлены уплотнения 6.

Окна всасывания 9 и нагнетания 10 размещены в торцовых крышках насоса и соединяются с входным и выходным патрубками соответственно. Газораспределение в насосе осуществляется впадинами каждого из роторов, которые выполняют функцию клапанов, периодически открывая и закрывая окна всасывания и нагнетания. Благодаря этому в КЗВН отсутствуют дополнительные органы управления потоками газа.

Рабочий процесс КЗВН идет следующим образом. В положении роторов, изображенном на рис. 9.44, а, в полости *М* начинается процесс всасывания газа через открывающееся окно всасывания 9. Одновременно в полости *Н* протекает процесс сжатия газа из предыдущего цикла. В положении роторов, показанном на рис. 9.44, б, продолжается всасывание в полости *М* и начинается процесс нагнетания из полости *Н* через открывающееся окно 10. В положении роторов на рис. 9.44, в окна всасывания и нагнетания закрыты. В этом положении формируется перевальный объем  $V_{пер}$ , газ из которого возвращается в следующий цикл откачки.

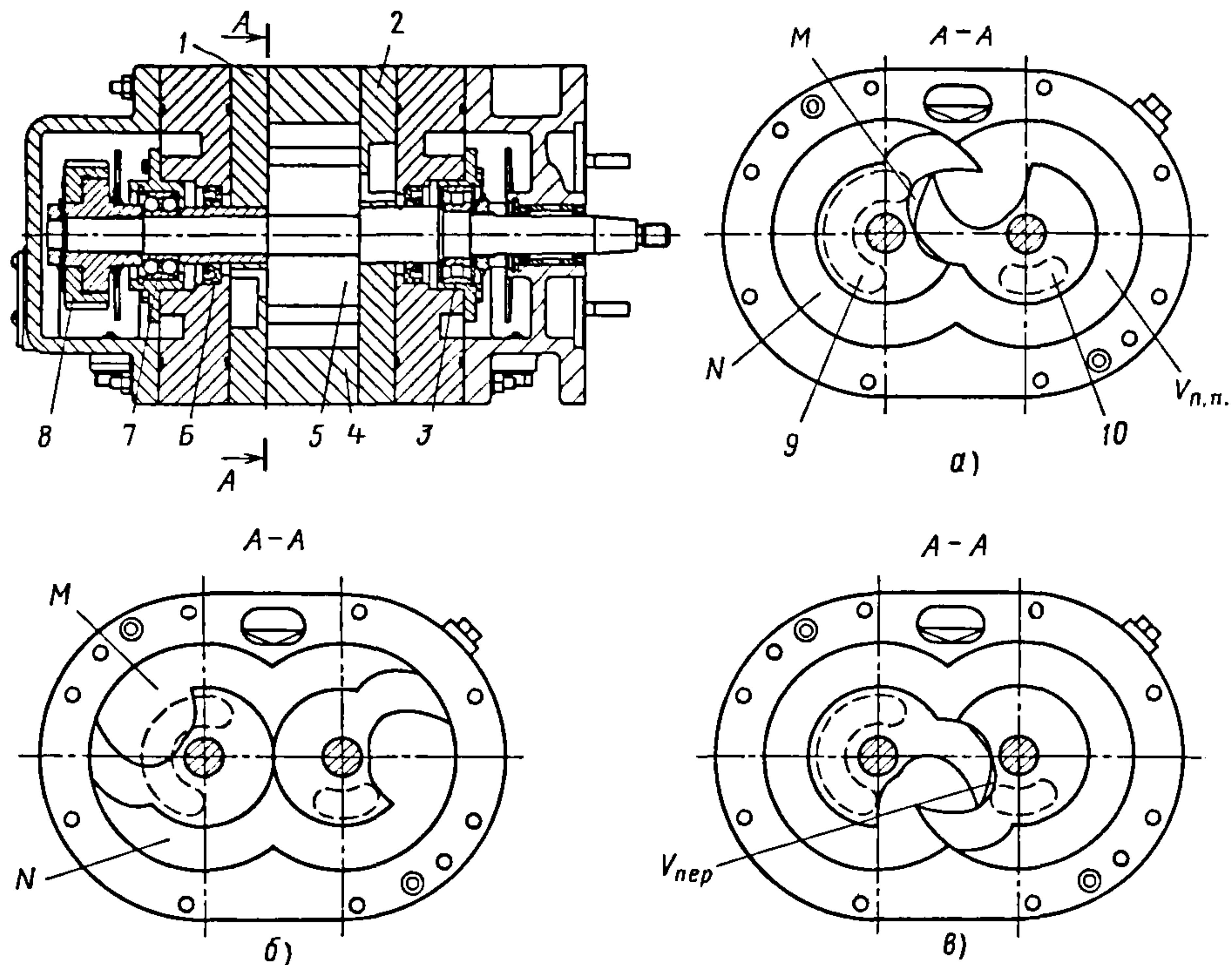


Рис. 9.44. Ступень КЗВН:

1, 2 – торцовые крышки; 3, 7 – подшипники; 4 – корпус; 5 – роторы; 6 – манжетные уплотнения; 8 – синхронизирующие шестерни; 9 – окно всасывания; 10 – окно нагнетания

Таким образом, в КЗВН порция газа переносится со входа на выход за 2 оборота роторов. При этом в насосе одновременно присутствуют две порции газа: всасываемая и сжимаемая.

Кулачково-зубчатый профиль ротора – это на  $2/3$  окружность, за которой следуют

зубообразный выступ и впадина (рис. 9.45). Роторы могут быть одинаковыми (фирма Leybold, Германия) и разными (фирма Atlas Copco, Швеция). Выступающая часть ротора и впадина выполняются в соответствии с требованиями основного закона зацепления. Вращение роторов осуществляется с одинаковой частотой без скольжения.

Следовательно, точки  $B$  и  $C$  описывают удлиненные эпициклоиды 1, 2 в теле ответного ротора. Дуги окружностей радиуса  $R$  и  $r$  имеют одинаковый угол  $\theta$ . Вид этих кривых не может быть другим, возможно лишь варьирование значений радиуса  $R$  или  $r$ , угла  $\theta$  и межосевого расстояния  $A = R + r$ . Участок 3 профиля ротора может быть различным, однако обязательно должно лишь удовлетворяться основное условие – наличие сопряженного участка 4 профиля ответного ротора.

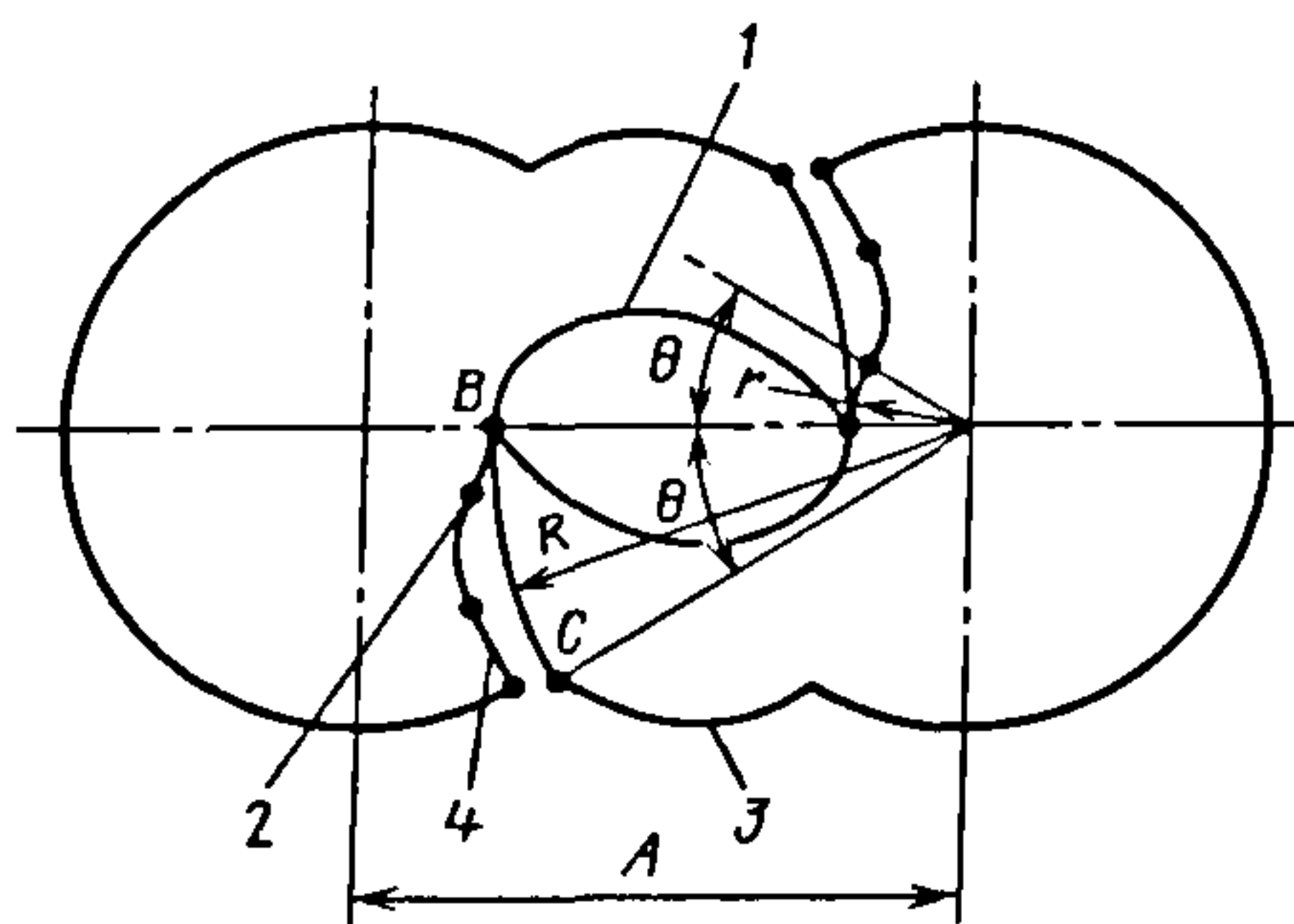


Рис. 9.45. Профиль ротора КЗВН



В качестве участка 3 удобно использовать удлиненную эпициклоиду, так как в этом случае в уравнениях (9.19)–(9.23)  $\alpha = s$ , что значительно упрощает нахождение сопряженного участка 4. При отношении радиуса производящей окружности удлиненной эпициклоиды к радиусу начальной окружности, равном 0,5, участок, в общем случае являющийся удлиненной гипоциклоидой, преобразуется в прямую 4.

Откачные характеристики КЗВН в первую очередь зависят от объема парной полости  $V_{п.п} = F_{п.п}L$  и перевального объема  $V_{пер} = F_{пер}L$ , где  $F_{п.п}$  – площадь поперечного сечения парной полости (см. рис. 9.44, а);  $F_{пер}$  – площадь поперечного сечения перевальной полости (см. рис. 9.44, в). В КЗВН объем  $V_{п.п}$  является аналогом отсеченного объема  $V_{отс}$  для ДВН.

Процесс в рабочей камере КЗВН происходит при переменной массе рабочего тела. Это вызвано непрерывным заполнением и освобождением отсеченных объемов через входное и выходное окна при всасывании и нагнетании, тепло- и массообменом между рабочими полостями через щелевые каналы.

Математическое моделирование рабочего процесса КЗВН состоит в последовательном воспроизведении по времени состояний газа в рабочем объеме и соответствующих этим состояниям положений роторов в совокупности с геометрическими параметрами статора, окон всасывания и нагнетания. При этом используются дифференциальные уравнения, описывающие изменение температуры и давления газа в рабочей полости насоса, которые без учета теплообмена с окружающей средой представлены в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{d\alpha} &= \frac{k-1}{\omega V} \left( \sum_{i=1}^{n_k} G_{пр i} h_{пр} - \sum_{i=1}^{n_k} G_{ут i} h_{ут} - \frac{k}{k-1} \omega p \frac{dV}{d\alpha} \right); \\ \frac{dT}{d\alpha} &= \frac{(k-1)T}{\omega p V} \left( \frac{k-1}{k} \sum_{i=1}^{n_k} (G_{пр i} - G_{ут i}) h_{ут} + \sum_{i=1}^{n_k} G_{пр i} (h_{пр} - h_{ут}) - \omega p \frac{dV}{d\alpha} \right), \end{aligned} \right\} \quad (9.54)$$

где  $\omega$  – угловая скорость роторов;  $G_{пр i}$ ,  $G_{ут i}$  – массовые расходы газа, соответственно притекающего и утекающего через  $i$ -й канал;  $h_{пр}$ ,  $h_{ут}$  – энтальпия притекающего и утекающего газа;  $n_k$  – число щелевых каналов, через которые происходят перетекания из одной полости в другую.

Массовый расход газа через  $i$ -й канал равен

$$G_i = \frac{U_i(p_1 - p_2)}{R_i T_1}, \quad (9.55)$$

где  $p_1$ ,  $p_2$  – текущее давление в полостях соответственно с большим и меньшим давлением;  $T_1$  – температура истекающего газа;  $U_i$  – проводимость  $i$ -го щелевого канала.

Поскольку КЗВН практически всегда работает при вязкостном режиме течения газа в щелях, то проводимость в зависимости от типа щели рассчитывается по представленным выше уравнениям: для

торцовых щелей (9.41) с учетом (9.42); межроторной и радиальных щелей (9.45).

Величины зазоров с учетом тепловой деформации корпусных деталей и роторов вычисляются по уравнениям (9.45)–(9.52). Быстрота действия КЗВН определяется по формуле

$$S_{вх} = \frac{G_{вх} R_i T_{вх}}{p_{вх}}, \quad (9.56)$$

где  $G_{вх} = \frac{p_{вс} V_{п.п}}{R_i T_{вс}} - \sum_{i=1}^{n_k} \int_0^{4\pi} G_i(\alpha) d\alpha - G_{пер}$  – действительный расход газа;  $p_{вс}$ ,  $T_{вс}$  – давление и температура в полости всасывания;  $G_{пер}$  – массовый расход газа из перевального объема.

КЗВН имеет по сравнению с ДВН типа Рутс большую степень повышения давления на одной ступени при высоком давлении благодаря внутреннему сжатию.

На рис. 9.46 изображен график зависимости степени повышения давления  $\Pi$

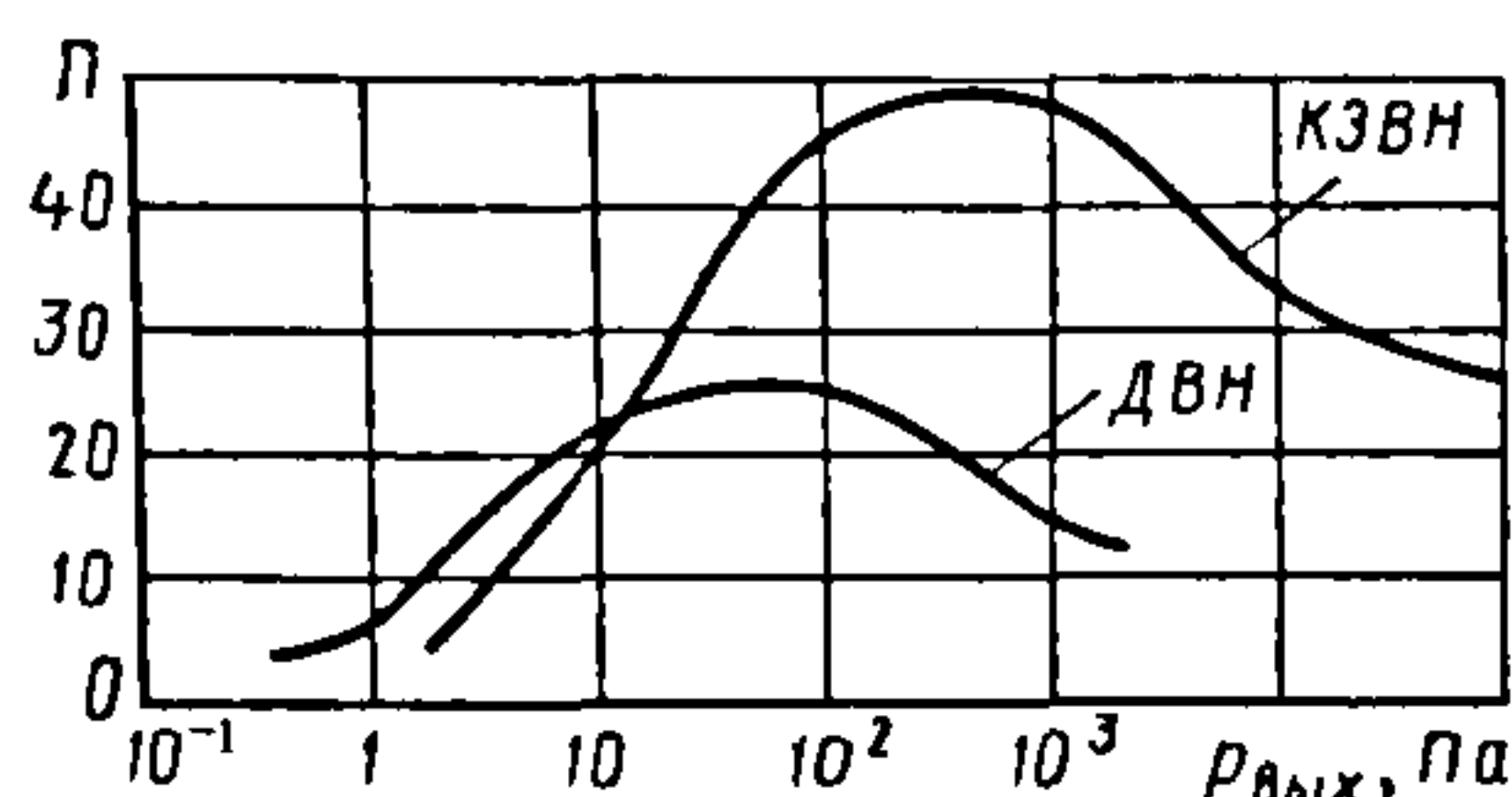


Рис. 9.46. Зависимость степени повышения давления от давления на выходе из насоса при безрасходном режиме

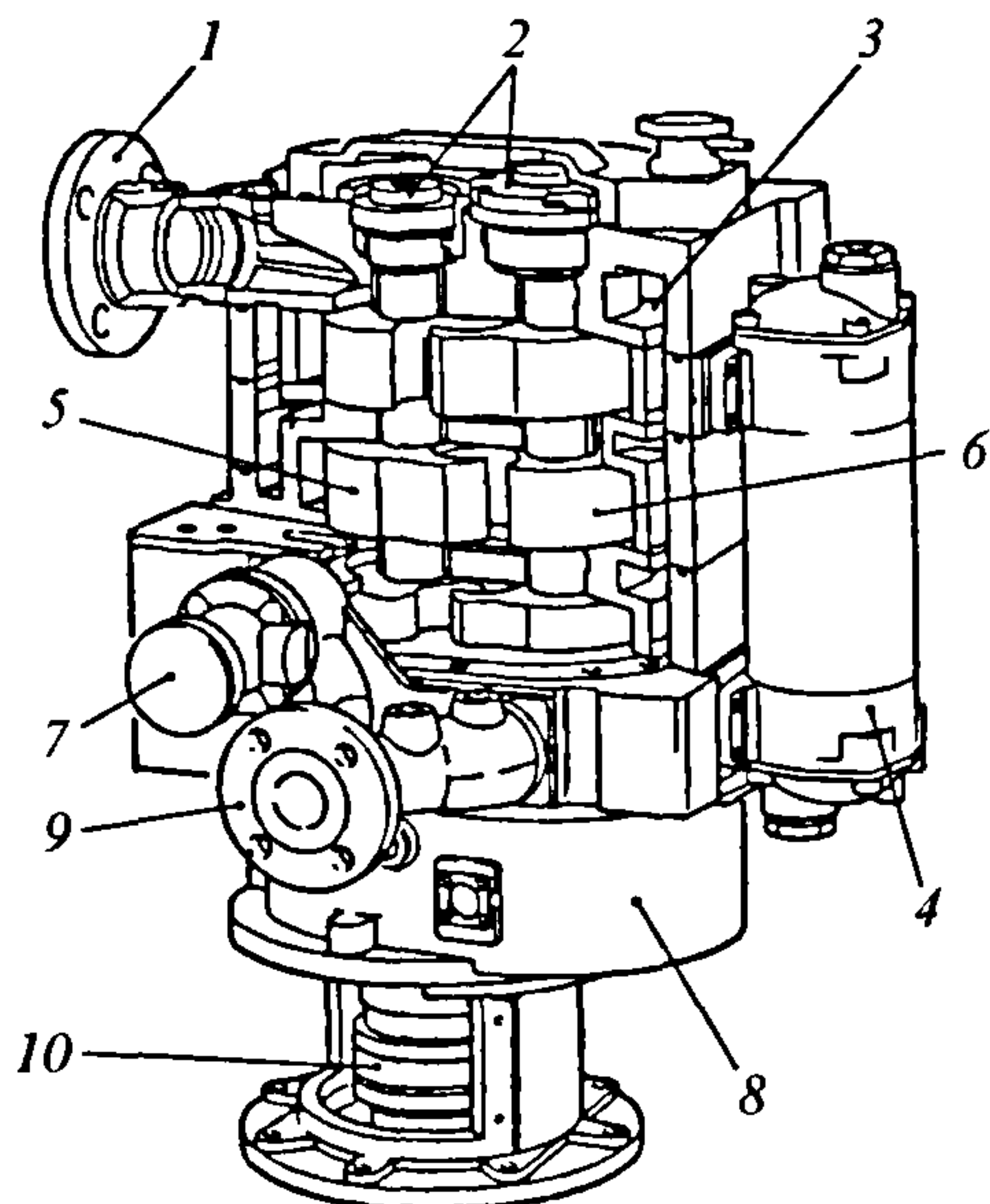


Рис. 9.47. Схема КЗВН типа DP250 фирмы Edwards:

- 1 – входной фланец; 2 – подшипниковые узлы;  
3 – рубашка охлаждения; 4 – теплообменник;  
5 – ведущий ротор; 6 – ведомый ротор;  
7 – клапан; 8 – редуктор; 9 – выходной фланец;  
10 – муфта сцепления

от давления на выходе насоса типа Рутс и КЗВН, откуда следует, что максимальная степень повышения давления кулачково-зубчатой ступени при работе на атмосферу  $\sim 25$ , что мало для полноценного форвакуумного насоса.

Поэтому создаются агрегаты, состоящие из трех – пяти ступеней типа «Claw», которые позволяют получить давление порядка 1...100 Па. Четырех-

ступенчатые агрегаты фирмы Leybold обеспечивают предельное остаточное давление 0,3...6 Па и быстроту действия 7...139 л/с. В данных агрегатах ступени разделены промежуточными перегородками, в которых выполнены входные и выходные окна. Выходное окно первой ступени соединяется со входом второй. Аналогично осуществляется перепуск газа из второй в третью и из третьей в четвертую ступень. Подшипниковые узлы и уплотнения охлаждаются водой. Расположение насоса, как правило, вертикальное. Благодаря этому насос может откачивать запыленные среды, поскольку пыль практически не оседает в ступенях насоса, и при необходимости она может быть удалена без разборки насоса продувкой воздухом.

Фирма Edwards выпускает многоступенчатые агрегаты с быстротой действия 25...220 дм<sup>3</sup>/с и остаточным давлением 4...40 Па. При этом оптимальная окружная скорость достигается выбором диаметра, а производительность – варьированием длины роторов. В конструкции такого многоступенчатого насоса имеются два параллельных ротора, расположенных вертикально в расточке корпуса. Роторы синхронизированы с помощью шестерен связи (рис. 9.47).

Вертикальное расположение необходимо для предотвращения накопления осадка в цилиндрической части расточки корпуса и его удаления через входные и выходные щели. Возможно и горизонтальное расположение валов при откачке незагрязненных сред. Подшипники и уплотнители охлаждаются водой. Этим обеспечивается надежная работа насоса. В корпусах ступеней монтируются трубки для подачи промывочного и балластного газа при откачке агрессивных и конденсирующихся газов.

В комплекте с датчиками температуры, потока, давления, управляющими электромагнитными клапанами, отсечным и выхлопным клапанами, такой насос конструктивно довольно сложен. Однако



это оправдывает себя, избавляя от многих потенциально опасных процессов, которые могут происходить при использовании масляных насосов: растворения вредных веществ в масле; взрывоопасных реакций с маслом и проникновением паров масла в откачиваемый объем.

На сегодняшний день кулачково-зубчатый насос – единственный насос, позволяющий получать безмасляный вакуум как на этапе предварительной откачки, так и в качестве форвакуумного насоса с приемлемой быстротой действия.

Реализовать главные преимущества ДВН типа Рутс (хорошую производительность) и КЗВН (высокую степень повышения давления) удалось в многоступенчатых агрегатах, использующих в качестве входной ступени ДВН типа Рутс, а в последующих – ступени кулачково-зубчатого типа. Такое сочетание позволяет, во-первых, сделать агрегат максимально компактным, поскольку ступени располагаются последовательно на одном валу; во-вторых, снизить потери между ступенями, поскольку каналы, выполняемые в торцевых крышках, разделяющих ступени, имеют небольшую протяженность.

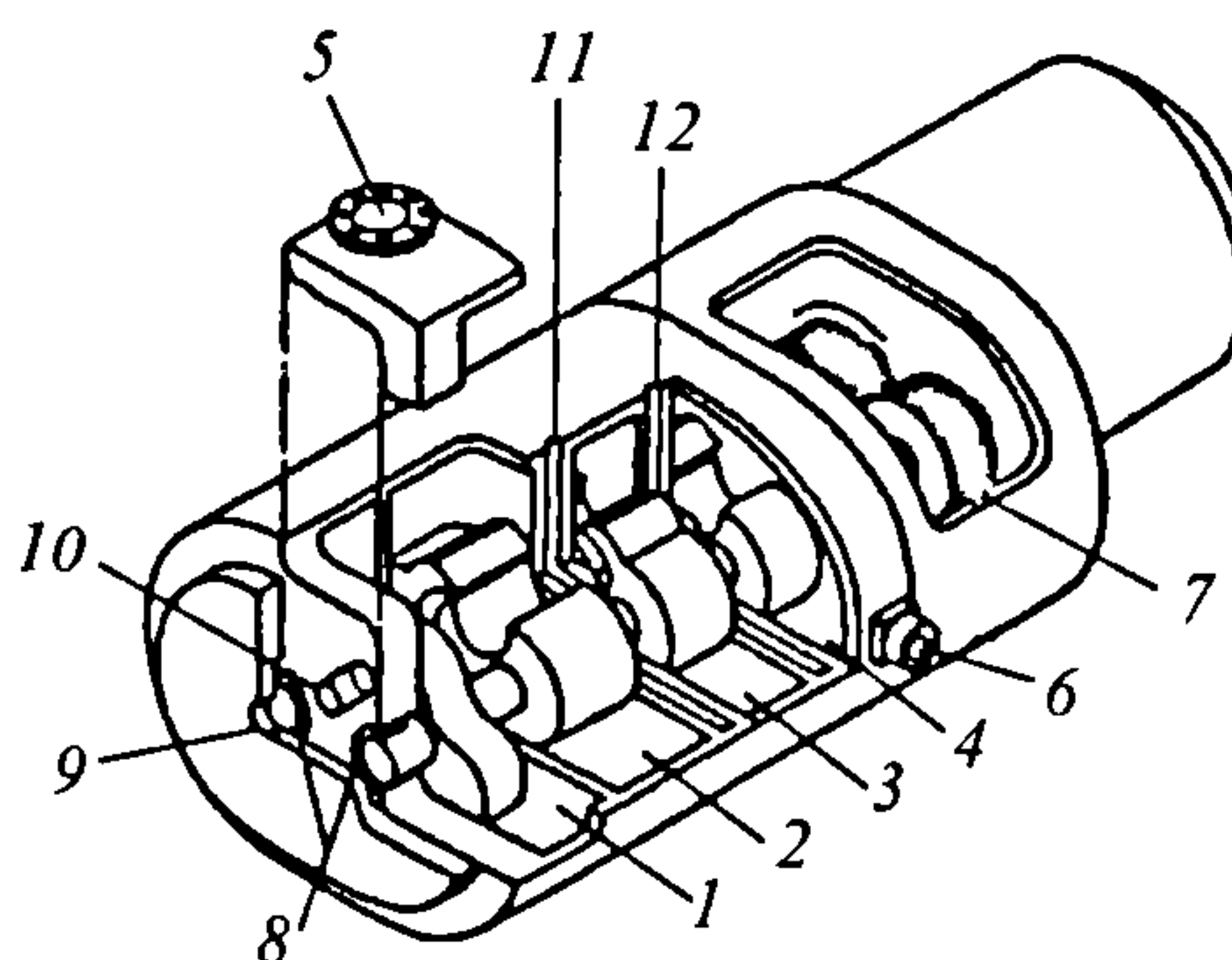


Рис. 9.48. Четырехступенчатый агрегат Рутс-КЗВН:

1 – ступень типа Рутс; 2, 3, 4 – ступени КЗВН; 5 – входной патрубок; 6 – выходной патрубок; 7 – синхронизирующие шестерни; 8 – картер со смазкой; 9 – подшипниковый узел; 10 – соединительный канал; 11, 12 – каналы для напуска балластного или промывочного газа

Некоторые технические характеристики многоступенчатых агрегатов на базе ступеней ДВН и КЗВН представлены в табл. 9.9 и 9.10. В России и странах СНГ подобные конструкции не выпускаются.

На рис. 9.48 изображен четырехступенчатый агрегат Рутс типа КЗВН.

#### 9.9. Технические характеристики агрегатов фирмы Edwards серии «Drystar»

Параметр	Марка агрегата						
	GV 80	GV 160	GV 250	GV 400	GV 260M	GV 410M	GV 600M
Состав агрегата	1 Рутс + +2 ступе- ни КЗВН	1 Рутс + +3 ступе- ни КЗВН	3 ступени КЗВН		1 Рутс + 3 ступени КЗВН		
Геометрическая быстрота дейст- вия, м <sup>3</sup> /ч	91,5	200	341	540	336	526	793
Быстрота дейст- вия, м <sup>3</sup> /ч	80	180	250	380	240*; 170**	380*; 300**	560*; 400**
Остаточное дав- ление, Па	10		40		6	6,5	6
Мощность элек- тродвигателя, кВт	4	7,5	11	18	11	15	22,5
Масса, кг	145	230	750	820	725	780	950
Габаритные раз- меры, мм	813× ×452×275	1213× ×500×576	1432× ×632×581	1480× ×632×581	1464× ×632×581	1547× ×632×581	1664× ×632×581

\* Быстрота действия при входном давлении 100 Па.

\*\* Быстрота действия при атмосферном давлении на входе.

### 9.10. Технические характеристики кулачково-зубчатых агрегатов фирмы Leybold серии «Dryvac» (все агрегаты – четырехступенчатые КЗВН)

Параметр	Марка агрегата				
	25 В	50 В	100 В	251 S	501 S
Геометрическая быстрота действия, м <sup>3</sup> /ч	6,9	12,5	27,8	210	400
Полное предельное остаточное давление, Па	3		1	$3 \cdot 10^{-1}$	
Мощность электродвигателя, кВт	2,8		4,0	3,9	6,2
Масса, кг	160	170	200	290	360
Габаритные размеры, мм	758×370×573	758×370×603	847×394×614	983×450×877	1084×450×929

### 9.4. СПИРАЛЬНЫЕ НАСОСЫ

В 1905 г. французский инженер Леон Круа предложил использовать две спирали с постоянным шагом: одну неподвижную, а другую скользящую внутри первой по орбитальной траектории – в роторных машинах. Первоначально предполагалось использование этого принципа для паровых машин, однако существовавшие на тот момент технологии и производство не могли удовлетворить высоким требованиям по точности изготовления спиралей, что не позволило полностью раскрыть потенциал данного механизма.

Более 70 последующих лет развитие спиральных машин шло в направлении теоретических исследований по оптимизации конструкции, уплотнений, подшипниковых узлов, технологичности производства, которые нашли отражение в очень большом числе соответствующих патентов.

В начале 80-х годов практически одновременно началось промышленное освоение как спиральных компрессоров фирмами Copeland (США), Hitachi (Япония), Volkswagen (Германия), так и спиральных вакуумных насосов фирмами Nortimetex (Франция), Iwata Air Compressor Company of Japan (Япония), Varian (США).

Благодаря полученным малым величинам зазоров и особенностям откачного механизма современными спиральными вакуумными насосами (СПВН) было достигнуто остаточное давление для одной ступени  $\sim 1$  Па. С каждым годом доля СПВН среди безмасляных средств откачки неуклонно растет, что говорит об объективных достоинствах спирального механизма при использовании его в качестве вакуумного насоса.

#### 9.4.1. Конструкция и принцип действия СПВН

СПВН – это механический объемный вращательный насос, в котором перемещение газа осуществляется путем периодического изменения объема двух или более серповидных полостей, образованных между двумя спиралями: одной неподвижной, другой совершающей орбитальное движение, повернутыми друг относительно друга на  $180^\circ$ .

СПВН с однозаходными спиралями состоит из следующих основных частей. Две спирали, чаще всего эвольвентные, выполнены заодно с торцовыми дисками. Одна, подвижная спираль 1 (рис. 9.49), совершает орбитальное движение относительно оси вращения привода насоса с некоторым небольшим эксцентриситетом  $E$  (как правило, до 5 мм). Другая, спираль 2,



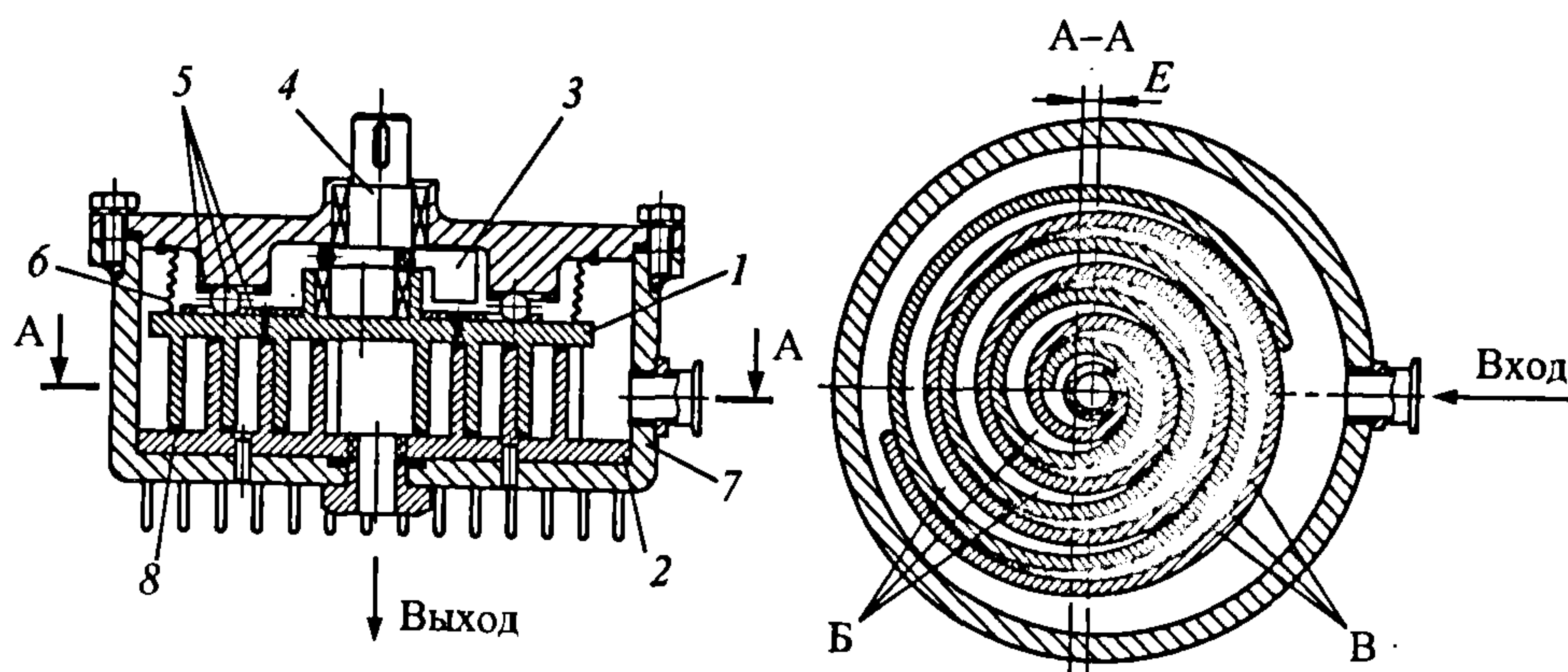


Рис. 9.49. СПВН

неподвижно соединена с корпусом насоса. Подвижная спираль уравнивается противовесом 3. При движении спирали не касаются друг друга, поскольку между ними имеется небольшой зазор ( $\sim 0,05 \dots 0,1$  мм).

Эксцентриковый вал 4 передает движение от привода к подвижной спирали. В конструкции насоса также предусмотрено устройство, предотвращающее поворот подвижной спирали относительно оси вращения, поскольку даже ее незначительное угловое перемещение приведет к заклиниванию. Это противоповоротное устройство может быть выполнено в виде нескольких кулачковых механизмов, смещение осей которых составляет величину, равную эксцентриситету  $E$ , либо в виде муфты Ольдгейма (рис. 9.50).

Последняя представляет собой три диска: один подвижный (поз. 1) с четырьмя выступами, по два с каждой стороны, которые расположены перпендикулярно друг к другу, и два одинаковых диска 2 с двумя пазами на каждом, неподвижно крепящихся один на корпусе, другой на подвижном спиральном элементе. Диск 1 повернуты друг относительно друга на  $90^\circ$ . Все три диска входят в зацепление. Диск 1 и диск 2, крепящийся на подвижной спирали, совершают орбитальное движение. Величина зазоров в зацеплении очень мала (порядка  $0,05$  мм). Шарики 3

служат в качестве упорного подшипника. Существуют также и другие противоповоротные устройства (см. рис. 9.49, поз. 5). Эксцентриковый вал 4 и противоповоротное устройство 5 совместно обеспечивают орбитальное движение подвижной спирали.

Герметизирующий рабочую камеру насоса элемент может быть выполнен в виде манжеты на приводном валу, однако в этом случае подшипники и противоповоротное устройство, требующие смазывания, располагаются в вакуумной полости насоса. Поэтому чаще в конструкции СПВН используется эластичный упругий элемент – сильфон большого диаметра 6, герметично соединяющий подвижную спираль с корпусом насоса 7. Благодаря такой конструкции спиральный насос становится абсолютно безмасляным, полностью предотвращая проникновение паров масла в откачиваемый объем.

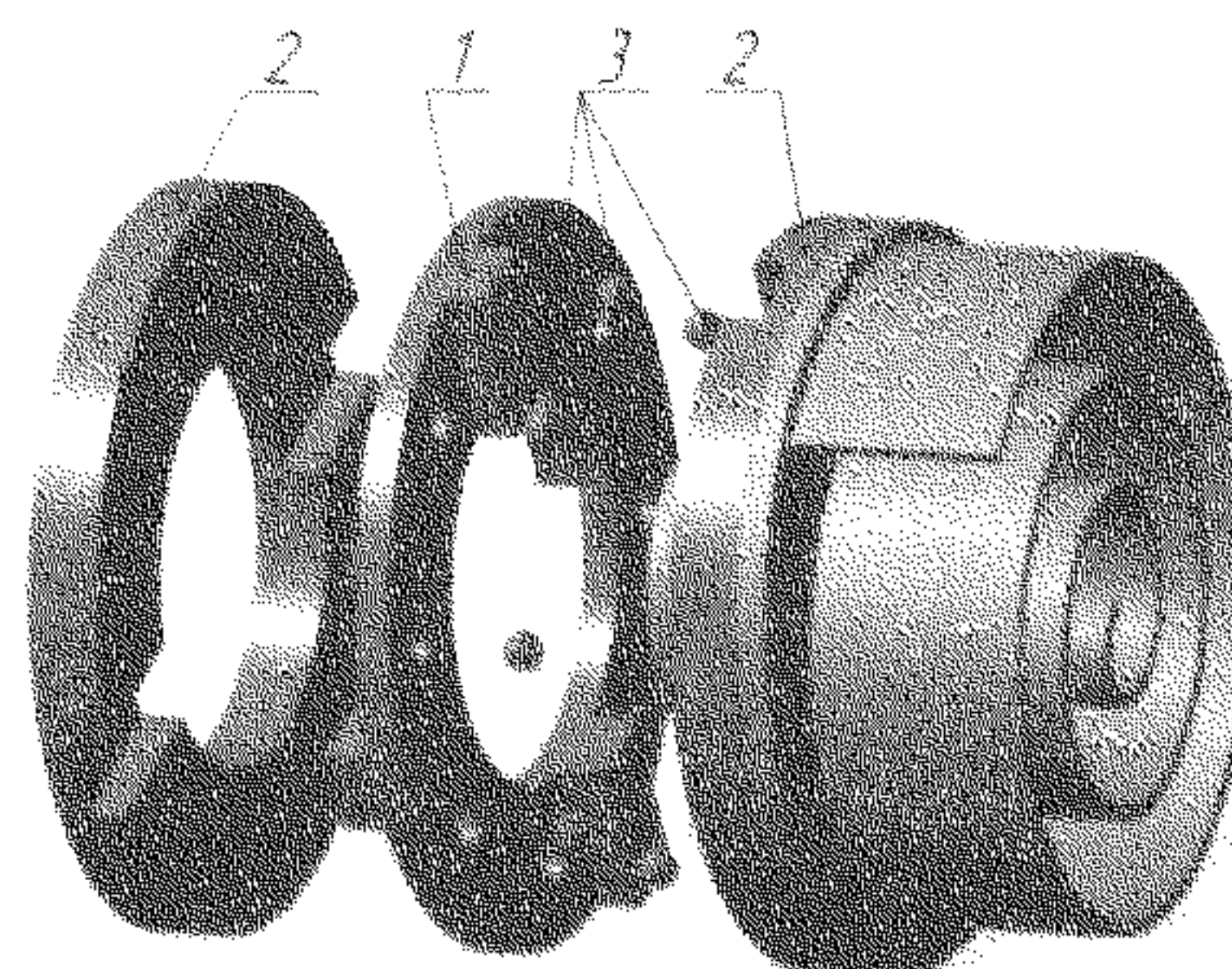


Рис. 9.50. Муфта Ольдгейма



Основное принципиальное отличие СПВН от компрессоров заключается в подходе к уплотнению рабочей камеры. Поскольку в спиральном компрессоре важен расход газа на выходе, то, следовательно, нет необходимости в герметизации входного тракта, а необходима герметизация выходного патрубка. В случае СПВН ситуация противоположная. Уплотняется лишь входной тракт, как говорилось выше, с помощью большого сальника, а также резиновых уплотнителей.

Спирали в СПВН располагаются таким образом, что могут практически соприкасаться в нескольких точках, образуя при этом в случае однозаходных спиралей две серии серповидных объемов: Б и В (см. рис. 9.49), которые при орбитальном движении подвижной спирали уменьшают свой объем от периферии спиралей к их центру. Всасывание газа происходит с внешней стороны спиралей, а выброс – из отверстия в центре неподвижной спирали. Для работы спирального механизма не требуется использовать клапаны ни на входе в насос, ни на его выходе. Однако для предотвращения прорыва атмосферы в насос при аварийном отключении электричества можно предусмотреть отсечной клапан на входе.

В случае герметичного СПВН (элементы насоса, требующие смазывания, вынесены за пределы рабочей камеры насоса) наряду с клапаном на входе необходимо использовать также клапаны на выходе из насоса. Герметичные спиральные насосы служат для откачки сильноагрессивных и особо дорогих газов, а также в технологических процессах с применением вакуума, не допускающих присутствия углеводородов.

Важная особенность спирального насоса по сравнению с любыми другими объемными насосами – наименьшие потери на всасывании, что является следствием малой скорости газа на всасывании, большого раскрытия полости всасывания, отсутствия мертвого пространства, а также малого подогрева газа на всасывании благодаря отсутствию контакта газа с более нагретыми частями насоса. Процесс

нагнетания также осуществляется с малыми газодинамическими потерями. Все это обуславливает высокие удельные характеристики СПВН.

К достоинствам СПВН также можно отнести достаточно высокую степень понижения давления в одной ступени по сравнению с другими бесконтактными вакуумными насосами, благодаря малым перетеканиям между полостями всасывания, сжатия и нагнетания. Это объясняется большим числом полостей между входом и выходом насоса и, соответственно, малыми перепадами давления между ними, а также протяженными щелевыми каналами между спиралями вследствие малой кривизны стенок, создающими большое сопротивление движению газа.

Для уплотнения торцовых поверхностей спиралей используются прямоугольные уплотнители 8 (концевые уплотнения; см. рис. 9.49) из политетрафторэтилена, имеющего очень низкий коэффициент трения, которые располагаются в канавках малого поперечного сечения по всей длине спиралей, что также способствует снижению перетеканий и, значит, увеличению степени понижения давления. Малая скорость движения концевых уплотнений ( $\sim 1$  м/с) обеспечивает продолжительный ресурс их эксплуатации. Для уменьшения остаточного давления спиральные насосы могут использоваться также в агрегате с форвакуумным мембранным насосом.

СПВН относятся к бесконтактным насосам, т.е. их рабочие элементы – спирали не касаются друг друга, благодаря чему может достигаться большая частота вращения (до  $13\,000\text{ мин}^{-1}$ ), что значительно улучшает удельные характеристики этих насосов. Вследствие отсутствия трущихся частей и, следовательно, износа СПВН, как и все бесконтактные насосы, обеспечивают стабильные характеристики в течение длительного срока эксплуатации. СПВН просты в обслуживании, надежны в эксплуатации, при хорошей балансировке достаточно бесшумны (до 60 дБ) и обладают низким уровнем вибраций. Особенностью данных насосов явля-



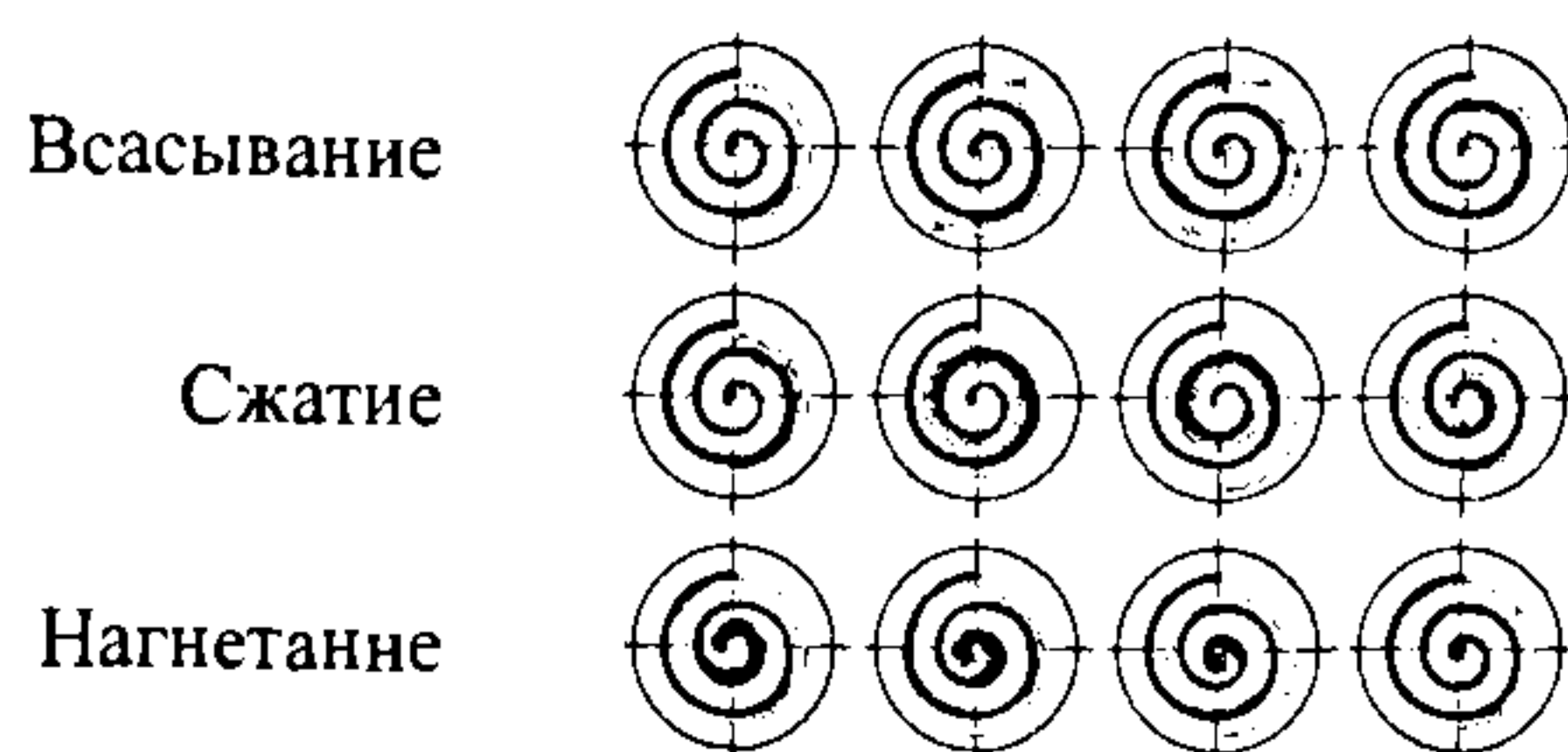


Рис. 9.51. Последовательное положение спиралей в процессе откачки

ется также их компактность по сравнению с поршневыми насосами: при одинаковой производительности их габаритные размеры значительно меньше (до 40 %).

Вследствие полного внутреннего сжатия, отсутствия трущихся частей в насосе и рабочей жидкости, которая создает дополнительное сопротивление движению спирали, а также протяженного во времени процесса сжатия, отсутствия газовых потерь на входе и, следовательно, пусковой нагрузки спиральные насосы отличаются малым энергопотреблением.

В СПВН процессы всасывания, сжатия и нагнетания происходят одновременно в нескольких полостях (рис. 9.51), что обеспечивает относительно равномерный поток газа во всасывающем патрубке. Число оборотов, за который осуществляется рабочий цикл с одной порцией газа, равняется числу витков спирали. Захват одной порции газа осуществляется за один оборот приводного вала для всех видов СПВН.

Основными недостатками СПВН являются сложность получения спиралей, удовлетворяющих требованиям особой точности, и высокая стоимость их производства.

Для изготовления спиралей используются фрезерные станки с числовым программным управлением, работающие с пальцевыми фрезами. В литературе встречается информация об изготовлении спиралей прецизионным литьем с последующей прикаткой. Однако речь о применении этой технологии в серийном производстве не идет.

Еще один недостаток – жесткие требования к чистоте откачиваемого газа, поскольку зазоры между спиралями и торцовыми пластинами очень малы и по-

падание частиц с размерами более величины зазора в условиях отсутствия смазывания приведет к заклиниванию насоса. Это влечет за собой необходимость использования фильтрующих элементов на входе в насос.

В случае вертикального расположения спиралей требования к чистоте откачиваемого газа могут быть снижены, так как при продувке большим потоком газа, что соответствует работе насоса при большом входном давлении, загрязнения могут быть удалены через выхлопное отверстие. При горизонтальном расположении мелкие частицы пыли могут скапливаться в насосе, что со временем может привести к его заклиниванию.

В СПВН возникают большие переменные по величине и направлению осевые и радиальные силы вследствие наличия больших движущихся неуравновешенных масс, которые уравниваются использованием противовесов, что увеличивает нагрузку на подшипники. По этой причине основными элементами, определяющими ресурс спирального насоса, являются подшипники.

Использование сильфона большого диаметра, изолирующего рабочую камеру спирального насоса от привода и подшипников, нуждающихся в смазывании, может несколько снизить ресурс работы СПВН и его надежность.

СПВН можно классифицировать по ряду признаков.

По числу ступеней спиральные насосы делятся на одно-, двух- и многоступенчатые.

По конструктивным особенностям они подразделяются на одно-, двусторонние и сдвоенные. Односторонние – клас-



сическая компоновка насоса: один спиральный элемент неподвижен, другой совершает орбитальное движение. В случае двусторонних СПВН две симметричные спирали располагаются с двух сторон от одного подвижного диска, две неподвижные спирали выполнены совместно с корпусом. Данное исполнение спирального механизма позволяет скомпенсировать опрокидывающие осевые газовые силы, возникающие при сжатии газа в серповидных объемах. Сдвоенные имеют два одинаковых подвижных спиральных элемента, размещенных с разных концов электродвигателя и повернутых на  $180^\circ$  друг относительно друга для совместной балансировки, и два неподвижных.

По расположению спиралей СПВН классифицируются на вертикальные и горизонтальные. В случае вертикального расположения насоса возможна откачка твердых мелкодисперсных (не более величины зазора между спиралями) частиц пыли.

По типу профиля и числу заходов различаются спирали Архимеда и эвольвентные спирали, а также одно-, двух- и многозаходные спирали. Увеличение числа заходов и шагов спирали влечет за собой большее число полостей между входом и выходом насоса с промежуточным давлением; уменьшение величины перепада давления между соседними полостями и, следовательно, перетеканий газа с выхода на вход насоса, что, соответственно, уменьшает предельное остаточное давление. Увеличение числа заходов также ведет к уменьшению пульсаций газа на входе насоса.

По чистоте рабочего процесса СПВН могут быть маслозаполненные и сухого сжатия. В маслозаполненных в рабочем процессе присутствует масло для смазывания спиралей, уплотнения зазоров и их охлаждения. В спиральных насосах сухого сжатия масло используется только для смазывания подшипниковых узлов, либо расположенных в вакуумной камере насоса, либо вынесенных за ее пределы.

По типу уплотнения бывают сальниковые и герметичные СПВН. В сальниковых узлы, требующие смазывания (подшипники, противоположное устройст-

во), расположены в вакуумной камере насоса. Сальниковый уплотнитель отделяет вакуумную полость от атмосферы. В герметичных СПВН узлы, работающие в смазке, полностью удалены из вакуумной камеры насоса.

Практически все ведущие производители вакуумного оборудования: фирмы Varian (США), Edwards (Великобритания), Busch (Германия), Ulvac (Япония), ILMVAC (Германия) и др. – предлагают СПВН. В табл. 9.11 приведены характеристики некоторых из них.

Диапазон частот действия существующих насосов 1,3...9,7 л/с при рабочей частоте вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$ . Предельное остаточное давление находится в интервале 0,93...9,3 Па, у худших образцов – до 50 Па. Спиральные насосы продолжительное время могут стабильно работать на любом входном давлении (от остаточного до атмосферного). Шумовые характеристики, как правило, не превышают 60 дБ, исключением являются спиральные насосы серии TriScroll (с трехзаходными спиралями) фирмы Varian (68 дБ); виброскорость малых насосов 1,5 мм/с, больших – до 6,3 мм/с. Все насосы сухого сжатия.

Благодаря использованию эластичного силфона СПВН имеют герметичную конструкцию, позволяющую полностью исключить попадание паров углеводородов в откачиваемый объем. Большинство насосов комплектуется встроенным газобалластом, позволяющим откачивать конденсирующиеся газы и газы с большим содержанием паров воды. В некоторых СПВН предусмотрена продувка подшипниковых узлов для предотвращения конденсации паров воды и, соответственно, ухудшения условий трения в подшипниках, к примеру при работе с криогенным насосом в период регенерации.

Спиральные насосы как надежное и полностью герметичное средство откачки используются в наиболее ответственных производствах с применением вакуума и оборудовании, критичном к наличию углеводородов: масс-спектрокопии, сканирующих электронных микроскопах, медицинских приборах, полупроводниковой промышленности и т.д.



## 9.11. Технические характеристики СПВН

Параметр	Марка насоса и фирма				
	Fossa F0 0009 B/ F0 0030 A (Busch, Германия)	DISL-100/ DIS-250/ DVS-631 (Ulvac, Япония)	XDS5/ESDP12/ XDS35i (Edwards, Велико- британия)	SH-100/ TriScroll 600 (Varian, Нидер- ланды)	DryRun 1/ DryRun 2 (Ilmvac, Германия)
Теоретическая быстро- та действия, л/с	–		1,58/4,17/11,9	–	
Быстрота действия, л/с	2,5/8,33	1,67/4,17/8,75	1,33/3,47/9,72	1,39/7	2,64/4,03
Предельное остаточное давление, Па	7,5/1	50/1,6/1	9,31/1,33/1,06	6,65/0,93	7/7
Мощность электродвигателя, кВт	0,2/0,6	0,3/0,4/0,6		0,37/0,76	–
Масса, кг	25/38	15/25/44	23/25/48	19,1/32	30/30
Уровень шума, дБ	57/62	–/52/60	55/58/57	56/68	–
Виброскорость, мм/с	–		1,5/1,5/4,5	1,5/6,3	
Диаметр входного отверстия, мм	25/40	25/25/40		25/40	
Тип спирали	Одноза- ходная	–		Однозаход- ная/Трех- заходная	

Также СПВН используются в качестве форвакуумных для безмаслянных высоко- и сверхвысоковакуумных насосов (геттерных, турбомолекулярных) и в системах регенерации криогенных насосов. СПВН могут выполняться как в стационарном, так и в передвижном исполнении, комплектоваться одно- и трехфазными электродвигателями.

## 9.4.2. Расчет спирального насоса

Первым этапом расчета СПВН является определение геометрической быстроты действия

$$S_r = mF_B h n_1, \quad (9.57)$$

где  $F_B$  – максимальная площадь поперечного сечения серповидной полости;  $m$  – число серповидных полостей, образующихся за один оборот приводного вала;  $h$  – высота спирали;  $n_1$  – частота вращения вала насоса.

Рассмотрим СПВН с однозаходной эвольвентной спиралью.

Уравнение эвольвенты в полярной системе координат записывается следующим образом:

$$\rho = r\sqrt{1 + \varphi^2}, \quad (9.58)$$

где  $r$  – радиус основной окружности;  $\varphi$  – параметр кривой (угол обкатки спирали).

В параметрической форме уравнения эвольвенты имеют вид

$$\left. \begin{aligned} x &= r(\cos \varphi + \varphi \sin \varphi); \\ y &= r(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (9.59)$$

По следующим уравнениям, справедливым для любых спиральных элементов с круговой орбитой движения, находятся эксцентриситет

$$E = 0,5T - b \quad (9.60)$$

и радиус основной окружности

$$r = (E + b) / \pi, \quad (9.61)$$

где  $T$  – шаг спирали;  $b$  – толщина спирали.

Максимальная площадь поперечного сечения серповидной полости определяется по уравнению

$$F_B = F_n - F_{n-1/2} - F_{т.сп}, \quad (9.62)$$

где  $F_n$  и  $F_{n-1/2}$  – площади секторов, ограниченных соответственно дугой спиралей

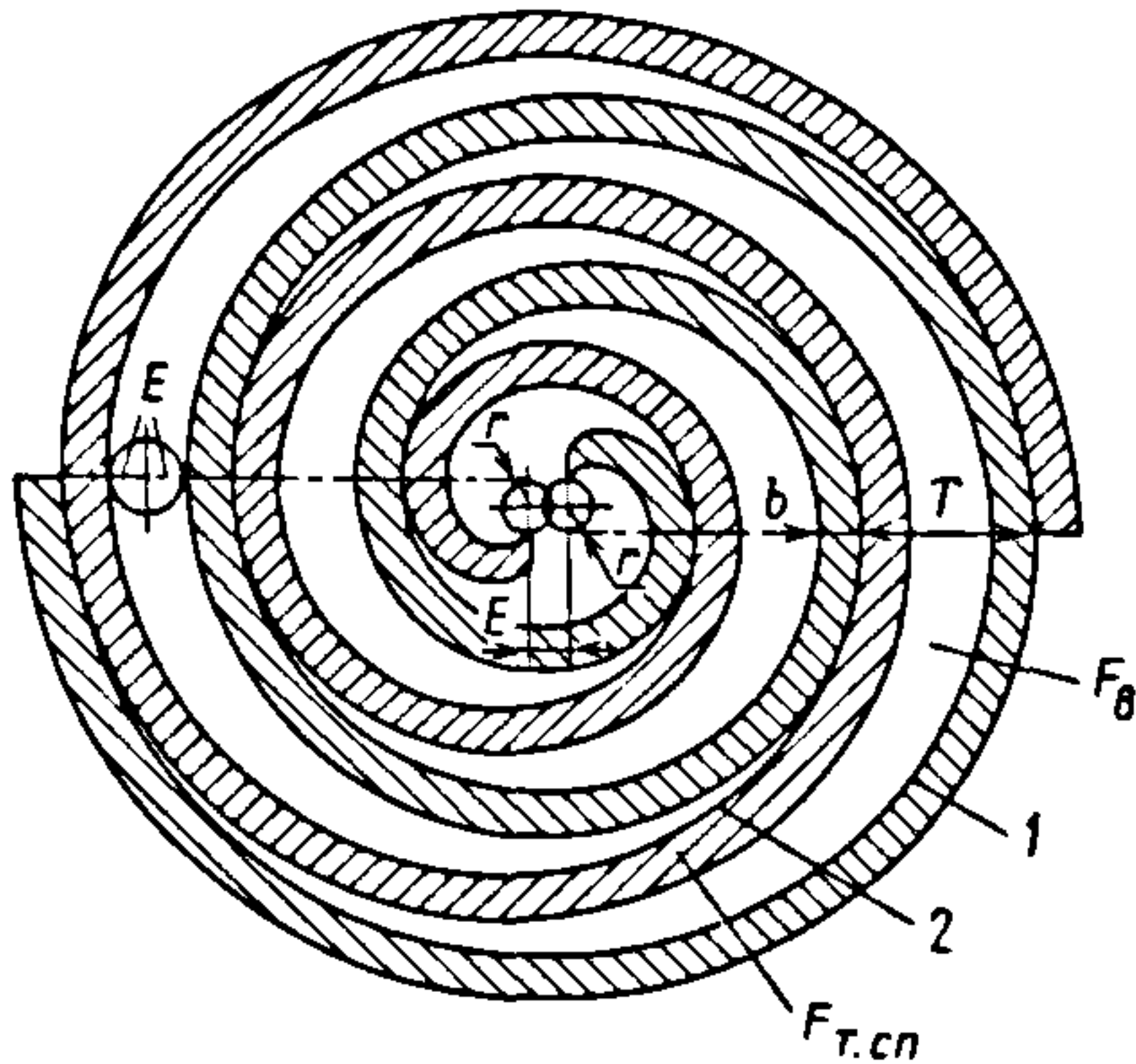


Рис. 9.52. К расчету геометрической быстроты действия СПВН

1 и 2 (рис. 9.52) и двумя радиус-векторами при соответствующих углах обкатки;  $F_{т.сп}$  – площадь торцевой поверхности спирали.

Площадь сектора, ограниченного дугой спирали и двумя радиус-векторами, определяется по следующему уравнению:

$$F_n = 0,5 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho^2(\varphi) d\varphi = \frac{\pi r^2}{3} [4\pi^2(3n^2 - 3n + 1) + 3], \quad (9.63)$$

где  $n$  – число витков спирали (от 2 до 4,

что соответствует углам закрутки  $\vartheta$  от  $4\pi$  до  $8\pi$ );  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы обкатки, огранивающие дугу спирали (для дуги 1 – угол  $\varphi_1 = 4\pi$ ,  $\varphi_2 = 6\pi$ ,  $n = 3$ , для дуги 2 – угол  $\varphi_1 = 3\pi$ ,  $\varphi_2 = 5\pi$ ,  $n = 2,5$ ).

Площадь торцевой поверхности спирали вычисляется по уравнению

$$F_{т.сп} = L_{сп} b = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{x'(\varphi) + y'(\varphi)} \cdot d\varphi b = 2\pi^2 r(2n - 1)b, \quad (9.64)$$

где  $L_{сп}$  – длина дуги спирали 2.

Подставив уравнения (9.63) и (9.64) в (9.62), получим следующее обобщенное уравнение:

$$F_B = F_n - F_{n-1/2} - F_{т.сп} = \pi^2 r [\pi r(4n - 3) - 4b(n - 1)]. \quad (9.65)$$

Пример расчета геометрической быстроты действия СПВН представлен в виде табл. 9.12.

Следующий этап – это определение действительной быстроты действия спирального насоса  $S_d$ . По экспериментальным данным, для существующих спиральных насосов коэффициент откачки  $\lambda = S_d/S_r$  равен 0,82...0,84; используя это соотношение, можно определить действительную быстроту действия.

### 9.12. Пример расчета геометрической быстроты действия СПВН

Параметр	Способ определения	Значение	Параметр	Способ определения	Значение
Шаг спирали $T$ , мм	Задаем	22	Число серповидных полостей $m$	Для однозаходных спиралей	2
Толщина спирали $b$ , мм		5	Эксцентриситет $E$ , мм	По формуле (9.60)	6
Высота спирали $h$ , мм	Выбираем $(4...8)b$	30	Радиус основной окружности спирали $r$ , мм	По формуле (9.61)	3,50141
Частота вращения $n_1$ , об/мин	Задаем	1500	Максимальная площадь поперечного сечения серповидной полости $F_B$ , мм <sup>2</sup>	По формуле (9.65)	2038,9
Угол закрутки $\vartheta$ , рад	Выбираем $(4...8)\pi$	$6\pi$	Геометрическая быстрота действия $S_r$ , л/с	По формуле (9.57)	3,06



Однако этот подход не позволяет учитывать индивидуальные особенности спирального механизма: тип спирали, ее геометрические параметры, величину зазоров между спиралями, режим работы и т.д. Таким образом нельзя построить так-

же зависимость быстроты действия от давления на входе насоса (основную откачную характеристику насоса).

Для более точного расчета действительной быстроты действия можно использовать следующую формулу:

$$S_d = S_r \lambda_n - V_{обр} = \lambda_n m F_B h n_1 - m (G_{ут} - G_{пр}) \frac{R_r T_{вх}}{p_{вх}} = \lambda_n m F_B h n_1 - m \frac{R_r T_{вх}}{p_{вх}} \left[ \int_0^{2\pi n} \frac{(U_r^{ут} + U_p^{ут})(p_i - p_{i-2\pi})}{R_r T_i} di - \int_0^{2\pi n} \frac{(U_r^{пр} + U_p^{пр})(p_{i+2\pi} - p_i)}{R_r T_{i+2\pi}} di \right], \quad (9.66)$$

где  $\lambda_n$  — коэффициент потерь вследствие неполного заполнения серповидной полости;  $V_{обр}$  — суммарный расход газа через все щелевые каналы спирального механизма;  $R_r$  — газовая постоянная;  $G$  — массовый расход газа;  $p_{вх}$ ,  $T_{вх}$  — давление и температура газа в откачиваемом объеме;  $U_r$ ,  $U_p$  — проводимости торцового (между торцом спирали и основанием диска) и радиального (между профильными поверхностями спиралей) щелевых каналов;  $p_i$ ,  $T_i$  — давление и температура в полости при  $i$ -м угле поворота приводного вала;  $p_{i+2\pi}$ ,  $T_{i+2\pi}$  и  $p_{i-2\pi}$ ,  $T_{i-2\pi}$  — давление и температура газа в полости, из которой притекает газ (предыдущая полость), и в полости, куда утекает газ (последующая полость).

Индексы «ут» и «пр» относятся соответственно к каналам, через которые газ притекает в полость и утекает из нее.

Коэффициентом потерь  $\lambda_n$  в практических расчетах можно пренебречь, поскольку скорость газа при заполнении серповидных полостей незначительна.

Проводимость щелевых каналов между профильными поверхностями спиралей определяется по уравнению

$$U = \frac{\sqrt{2R_r T_6} \cdot \xi(1 + \tau) \delta h}{9\pi \left[ 1 + \sqrt{1 + \alpha(1 - \tau^2)} \xi^2 \right]}, \quad (9.67)$$

где  $T_6$  — температура на входе в щель;  $\tau = p_m/p_6$  (здесь  $p_m$  — давление на выходе из щели;  $p_6$  — давление на входе в щель);  $\delta$  — величина минимального зазора между

спиралями;  $\xi = \frac{\delta^2 p_6}{\eta \sqrt{R_r T_6} l_3}$ ,  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости газа;

$l_3 = \sqrt{\delta \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}}$  — эквивалентная длина канала, где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны спиралей в точке контакта;

$$\alpha = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + c_3 z^3 - 0,00129 \tau^{0,397 \xi}; \text{ здесь } z = \frac{\ln(\tau)}{\ln(\tau) - 1};$$

$$c_0 = \frac{0,0008}{1 + 0,00013 \xi^3} + \frac{775}{10^6 + 0,202 \xi^3} + \frac{0,00088 \xi^3}{10^6 + 0,362 \xi^3};$$

$$c_1 = -0,00153 + \frac{0,0103 \xi^2}{2544 + \xi^2 + 0,0000275 \xi^4}; \quad c_2 = \frac{284,6}{9086 + \xi^2} + \frac{0,0105 \xi^2}{58153 + \xi^2} + \frac{0,0137 \xi^3}{1,11 \cdot 10^7 + \xi^3};$$

$$c_3 = - \left( \frac{0,00805 \xi^2}{36345 + \xi^2} + \frac{39823}{1,646 \cdot 10^6 + \xi^3} + \frac{0,0129 \xi^3}{6,93 \cdot 10^6 + \xi^3} \right).$$

Проводимость между торцевой поверхностью спирали, ограничивающей серповидную полость, и основанием ответного диска

$$U = \frac{\delta^3 L p_6 (1 + \tau)}{12 b \eta \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\alpha (1 - \tau^2) p_6^2 \delta^4}{6 \eta^2 b^2 R_r T_6}} \right)}, \quad (9.68)$$

где  $\alpha = c_0 + c_1 \ln(\tau + 0,03) + c_2 \ln^2(\tau + 0,03)$  [здесь  $c_0 = 0,0687 - 0,00581 \ln(1/\xi) - 0,001 \ln^2(1/\xi)$ ;

$c_1 = -0,264 - 0,0677 \ln(1/\xi) - 0,00452 \ln^2(1/\xi)$ ;

$c_2 = -0,0711 - 0,0163 \ln(1/\xi) - 0,000142 \ln^2(1/\xi)$ ];

$\xi = \frac{\delta^2 p_6}{b \eta \sqrt{R_r T_6}}$ ;  $L$  – длина спирали, ограничивающая серповидную полость.

Для получения зависимостей  $p = f(i)$  и  $T = f(i)$  решается система дифференциальных уравнений тела переменной массы:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{di} &= \frac{k-1}{V_i} \left( \frac{dQ_i}{di} + G_{i+2\pi} h_{i+2\pi} - G_i h_i - \frac{k}{k-1} p_i \frac{dV_i}{di} \right); \\ \frac{dT}{di} &= \frac{(k-1)T_i}{p_i V_i} \left[ \frac{dQ_i}{di} + \frac{k-1}{k} (G_{i+2\pi} - G_i) h_i + G_{i+2\pi} (h_{i+2\pi} - h_i) - p_i \frac{dV_i}{di} \right], \end{aligned} \right\} \quad (9.69)$$

где  $Q_i$  – внешняя подведенная теплота;  $G_{i+2\pi}$ ,  $G_i$  – соответственно секундные приход и расход газа;  $V_i$  – объем рабочей полости;  $h_{i+2\pi}$ ,  $h_i$  – энтальпия соответственно притекающего и утекающего газа;  $k$  – показатель адиабаты.

Система уравнений решается численно, за начальные данные принимаются  $p_{i=0} = p_{вх}$  и  $T_{i=0} = T_{вх}$ . Так как в начале расчета параметры газа в предыдущей полости и последующей неизвестны, расчет ведется методом последовательных приближений. Для замыкания системы уравнений рассчитывается зависимость объема серповидной полости от угла поворота  $V = f(i)$ .

Полученные в результате решения системы уравнений (9.69) функции  $p = f(i)$  и  $T = f(i)$  подставляются в формулу (9.66) и определяется действительная быстрота действия СПВН.

Данный подход позволяет дифференцированно учитывать индивидуальные особенности каждого спирального меха-

низма, выявлять влияние любых факторов на откачные характеристики и с учетом полученных результатов расчетов проектировать более совершенные насосы.

## 9.5. ПЛАСТИНЧАТО-РОТОРНЫЕ И ПЛАСТИНЧАТО-СТАТОРНЫЕ НАСОСЫ

### 9.5.1. Общие вопросы

Пластинчато-роторные вакуумные насосы – ПРВН (со смазкой и сухие, маслозаполненные и с масляным уплотнением) выпускают с числом пластин две и более. ПРВН с масляным уплотнением выполняют обычно с двумя пластинами в роторе, а пластинчато-статорные – с одной пластиной в корпусе. Эти насосы предназначены для откачки воздуха, газов, не вступающих в реакции с маслами и материалом деталей насосов, и парогазовых смесей, предварительно очищенных от капельной влаги и механических примесей, а также для поддержания низкого и среднего вакуума в герметичных объемах.



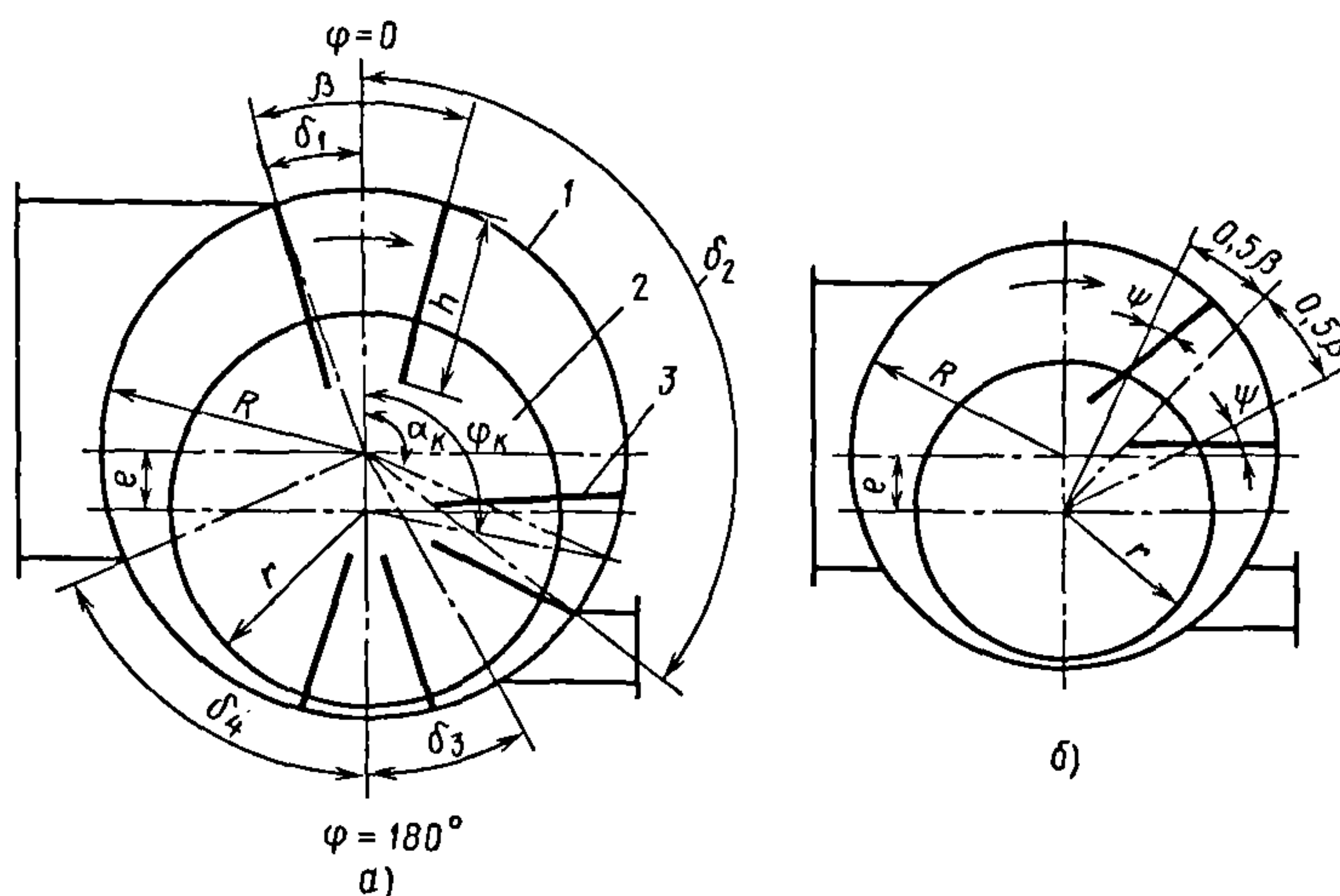


Рис. 9.53. Схемы многопластинчатых ПРВН с радиальными (а) и наклонными (б) пластинами

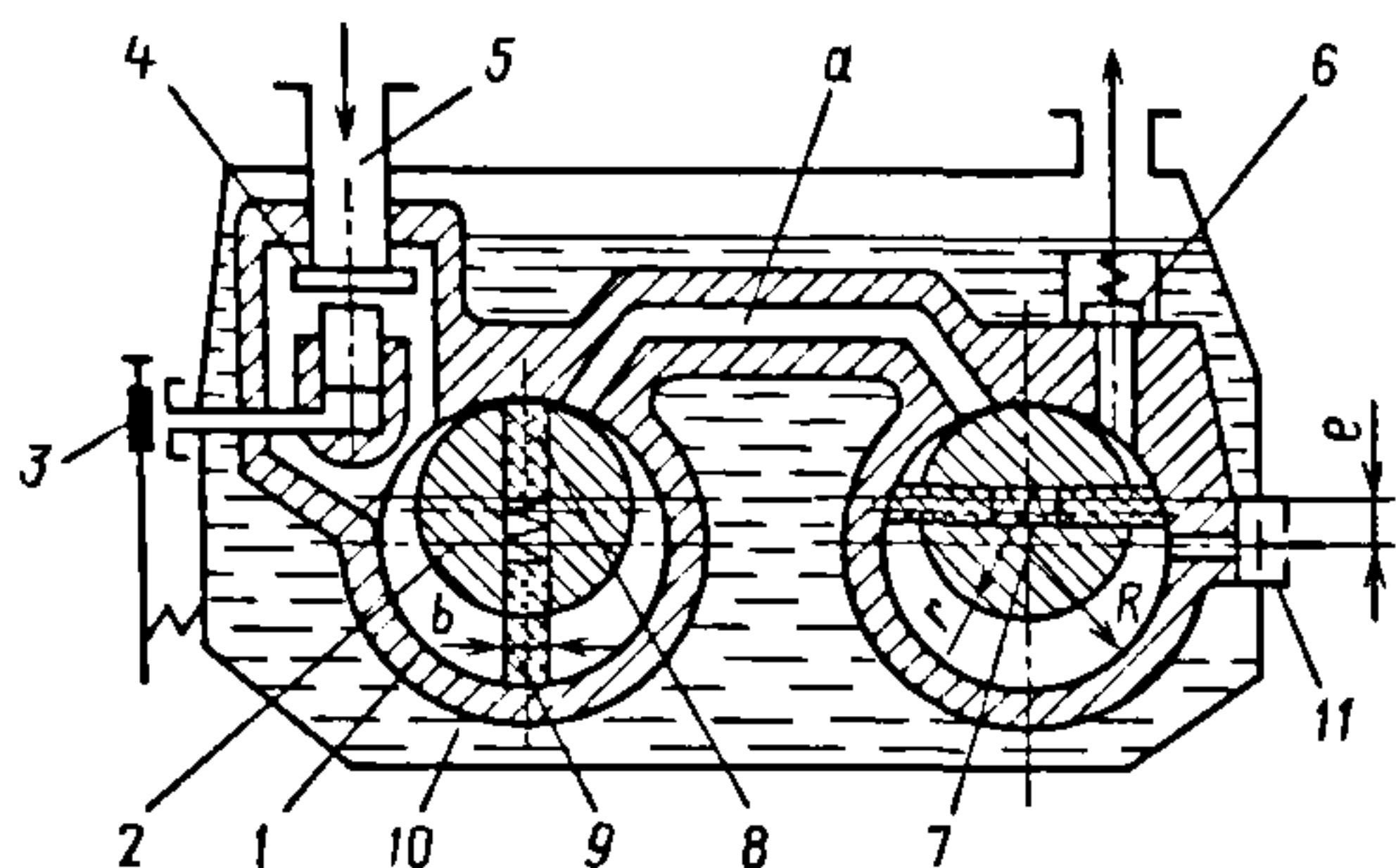
В цилиндрической расточке корпуса 1 ПРВН с числом пластин, большим двух (рис. 9.53, а и б), эксцентрично расположен цилиндрический ротор 2. В роторе выполнены пазы, в которые вставлены пластины 3 из металла, асботекстолита, пластмассы или антифрикционных материалов. При вращении ротора пластины под действием центробежной силы выходят из пазов и прижимаются к цилиндрической поверхности расточки корпуса. При этом серпообразное пространство между ротором и цилиндрической расточкой корпуса делится на отдельные рабочие ячейки. При угле поворота ротора  $\varphi = 180 \dots 0^\circ$  объемы рабочих ячеек увеличиваются, они соединяются со всасывающим окном и заполняются откачиваемым газом. Когда объем рабочей ячейки достигает максимального значения, она отходит от всасывающего окна.

При дальнейшем вращении ротора объемы рабочих ячеек уменьшаются и в них происходит внутреннее сжатие. При соединении рабочих ячеек с нагнетательным окном начинается процесс нагнетания, в течение которого газ подается в нагнетательный трубопровод. В вакуум-

ных насосах выполняют перепускной канал, через который газ из мертвого объема (минимального объема, из которого не может быть вытеснен газ) поступает в первую ячейку сжатия. Перепуск газа увеличивает коэффициент откачки, а следовательно, и быстроту действия вакуумного насоса. Однако при этом возрастают затраты мощности на сжатие газа.

Пластины ПРВН выполняют радиальными (рис. 9.53, а) и наклонными (рис. 9.53, б). Выполнение пластин наклонными позволяет увеличить их длину, а следовательно, и срок службы, уменьшить вероятность заклинивания пластин в пазах ротора (с этой позиции наиболее предпочтительно значение угла наклона пластин  $\psi = 8 \dots 15^\circ$ ), снизить мощность, затрачиваемую по преодолению трения при движении пластин по расточке корпуса и в пазах ротора (при  $\psi = 8 \dots 15^\circ$  это уменьшение не превышает 1...2 % и достигает 30...40 % при  $\psi = 40 \dots 50^\circ$ ).

В маслозаполненных насосах масло отводит теплоту сжатия, смазывает трущиеся детали и уплотняет зазоры. Температура газа в линии нагнетания в этих насосах  $\leq 373$  К.



**Рис. 9.54. Схема ПРВН с масляным уплотнением**

В машинах со смазыванием смазка только смазывает трущиеся поверхности.

В ПРВН с масляным уплотнением внутри цилиндрической расточки корпуса 1 (рис. 9.54) эксцентрично расположен цилиндрический ротор 2. В пазу ротора размещены две пластины 8 и 9 с пружиной 7 между ними. При вращении ротора пластины центробежными силами и силой упругости пружины прижимаются к внутренней расточке корпуса и делят серпообразную полость между ротором и расточкой корпуса на две полости. При вращении вала объем одной полости периодически увеличивается и в нее всасывается газ; в это же время объем другой полости периодически уменьшается и в ней происходит сначала сжатие газа, а при соеди-

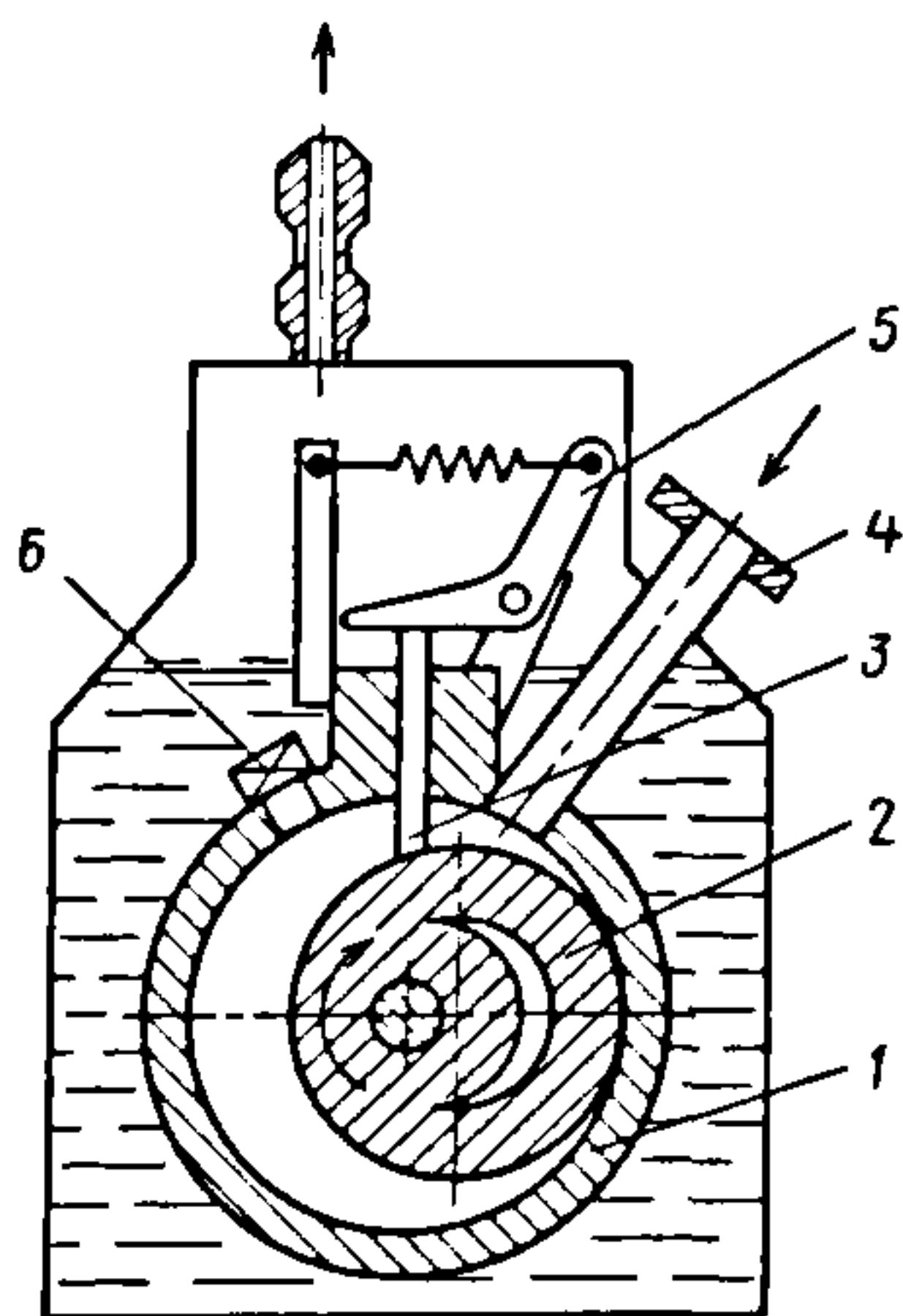
нении с выходным патрубком газ выходит из нее.

ПРВН этого типа выполняют одно- и двухступенчатыми. В двухступенчатых насосах для уменьшения потерь между первой и второй ступенями их соединяют каналом *a*. Клапан *б* на линии нагнетания второй ступени погружен в основной масляный резервуар *10*. В двухступенчатых насосах диаметры внутренних расточек корпусов и роторов ступеней одинаковые, но ротор выхлопной ступени короче ротора первой ступени. Пластины в ступенях смещены относительно друг друга на  $90^\circ$ .

При откачке паров или парогазовых смесей насос снабжается газобалластным устройством 11 для предотвращения конденсации паров. В двухступенчатых насосах газобалластное устройство устанавливается только на второй ступени. Газобалластное устройство имеет лишь две позиции — «открыто» и «закрыто». В открытом положении балластный воздух попадает в полость сжатия второй ступени. Для предотвращения выхлопа газа и выброса масла через газобалластное устройство оно выполняется с обратным клапаном.

В пластинчато-статорных насосах пластина 3 (рис. 9.55) движется возвратно-поступательно в пазу корпуса 1, прижимается к ротору 2 рычажным механизмом 5 и делит серпообразную полость между ротором 2 и корпусом 1 на две рабочие ячейки. Газ всасывается через входной патрубок 4, который перекрывается ротором. Когда входной патрубок 4 открыт, газ входит в рабочую ячейку приблизительно в течение одного оборота ротора. При отделении входного патрубка от рабочей ячейки в ней происходит сжатие газа. Когда разность давлений газа в рабочей ячейке и нагнетательном патрубке превысит потери давления в клапане 6, последний откроется и газ выйдет в нагнетательный патрубок.

Характерная особенность пластинчато-статорных и пластинчато-роторных вакуумных насосов с масляным уплотне-



**Рис. 9.55. Схема ПРВН с масляным уплотнением**



нием – наличие масла в рабочих полостях, заполняющего зазоры и исключаящего перетекание газа через них.

Кроме того, клапаны этих насосов работают под заливом масла, что повышает их герметичность, практически сводит к нулю мертвые объемы, увеличивает быстроту действия насосов и создаваемый вакуум.

Применяемые для насосов масла должны иметь определенную вязкость как при комнатной температуре, чтобы не затруднять его пуск, так и при рабочей (333...343 К) температуре, при которой не должна ухудшаться его смазывающая способность. Масла не должны также окисляться и разлагаться при рабочей температуре, воздействовать на детали насосов; давление паров масла должно быть невелико, чтобы насос обеспечивал низкое предельное остаточное давление.

В момент запуска вакуумного насоса с масляным уплотнением масло часто выбрасывается во всасывающий трубопровод; после останова насоса, если не обеспечено равенство давлений во всасывающем и нагнетательном патрубках, масло под действием атмосферного давления может выдавливаться в вакуумную систему. В связи с этим на всасывающий патрубок 5 устанавливают электромагнитные клапаны 4 и 3 (см. рис. 9.54).

Обычно в насосы заливают ограниченное количество масла. Поэтому для защиты от его заброса в вакуумную систему можно использовать также предохранительную емкость, предусматриваемую непосредственно в насосе или вне его. При останове насоса масло выдавливается в эту емкость. На всасывающем патрубке насосов можно иметь емкость с поплавковым клапаном. Когда масло выдавливается в эту емкость, оно поднимает поплавковый клапан, который перекрывает вакуумную систему. Однако из-за ограниченных объемов такая система защиты недостаточно надежна.

Иногда насосом с масляным уплотнением необходимо откачивать пары,

ограниченно растворимые в масле (например, водяные), легко растворимые в масле (например, трихлорэтилен), и пары или газы, которые химически взаимодействуют с маслом вакуумного насоса.

При откачке паров, ограниченно растворимых в масле, при каждом ходе сжатия, когда давление в рабочей ячейке достигает давления насыщения паров при данной температуре, пары конденсируются. Образовавшийся конденсат вместе с маслом выбрасывается в основной масляный резервуар 10 (см. рис. 9.54).

По мере загрязнения масла в основном резервуаре конденсатом все большее его количество поступает в вакуумный насос. Здесь конденсат на стороне всасывания испаряется и создает противодействие, препятствующее поступлению в насос новых порций смеси пара и газа.

Кроме того, из-за образования водомасляной эмульсии ухудшается смазывание поверхностей трения, что приводит к их быстрому изнашиванию.

При откачке легкорастворимых в масле паров растворяется не только конденсат, но и пар. При этом пар и конденсат равномерно распределяются в масле основного резервуара и не оседают на дно, как это бывает при откачке водяных паров.

При откачке газов и паров, реагирующих с маслами, образуются шлам, осадки и др.

При откачке паров можно использовать прогреваемые насосы, наружную очистку масла или откачку с газобалластом, которая в данном случае наиболее эффективна.

При откачке неагрессивных газов с незначительными примесями паров или газов, взаимодействующих с маслами или материалами деталей насоса, используют ловушки на стороне всасывания, а для откачки паров или газов, взаимодействующих с маслами и деталями насоса, рекомендуются масла с соответствующими добавками.

### 9.5.2. Основы теории и расчета

Быстроту действия определяют по формуле (9.3).

Геометрическая быстрота действия  $S_r$ , м<sup>3</sup>/с, пластинчато-роторных насосов зависит от геометрических размеров и частоты вращения ротора ПРВН:

$$S_r = z f_{\max} l n = C R e l n, \quad (9.70)$$

где  $z$  – число пластин;  $f_{\max}$  – максимальная площадь сечения рабочей ячейки, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина пластины, м;  $n$  – частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>;  $C$  – коэффициент, учитывающий влияние числа пластин;  $R$  – радиус цилиндрической расточки корпуса, м;  $e$  – эксцентриситет (расстояние между осью цилиндрической расточки корпуса и осью ротора), м.

При  $z > 12$  можно принять  $C = 4\pi$ . Значения коэффициента  $C$  в зависимости от числа пластин при относительном эксцентриситете  $\varepsilon = e/R = 0,09 \dots 0,15$  приведены ниже:

$z \dots \dots \dots$	2	3	4	5
$C \dots \dots \dots$	9,9	11,3	11,8	12,1
$z \dots \dots \dots$	6	8	10	12
$C \dots \dots \dots$	12,2	12,3	12,4	12,5

Более точно коэффициент  $C$  можно определить по формуле

$$C = z(\beta + 2 \sin \beta/2 + e \sin \beta/2R - e \beta/2R).$$

Коэффициент откачки  $\lambda$  учитывает объемные потери при всасывании, обусловленные:

перетеканием газа из рабочих ячеек сжатия и нагнетания, в рабочие ячейки всасывания;

натеканием в ячейки всасывания воздуха из атмосферы;

дрессельными потерями на всасывании;

подогревом газа при всасывании;

испарением рабочей жидкости в ячейках всасывания;

переносом газа из защемленного объема в ячейки всасывания.

Защемленный объем равен объему рабочей ячейки, которая в данный момент отошла от окна нагнетания. В защемлен-

ном объеме газ имеет такие же давление и температуру, как и в линии нагнетания. В вакуумных насосах с масляным уплотнением защемленный объем практически полностью заполняется маслом.

Перетекание газа из рабочих ячеек сжатия и нагнетания в рабочие ячейки всасывания для ПРВН сухих и со смазкой определяют по методике, изложенной в разд. 9.3.

При расчете маслозаполненных ПРВН [14] сначала определяют массовый расход газа, кг/с, через сухие щели, а затем его умножают на коэффициент уплотнения  $k_r = G_{п.ж}/G_{п.}$ , где  $G_{п.ж}$  – массовый расход газа через щели с жидкостью;  $G_{п.}$  – то же, через сухие щели.

Коэффициент определяют по эмпирическому уравнению

$$k_r / (1 - k_r) = 0,416 / [k_{ж} / (1 - k_{ж})]^{0,708},$$

где  $k_{ж} = G_{ж.щ}/G_{ж}^*$  – коэффициент заполнения (здесь  $G_{ж.щ}$  – массовый расход жидкости через щель, кг/с;  $G_{ж}^*$  – массовый расход жидкости, уплотняющей щель).

Ошибка при определении коэффициента уплотнения  $k_r \varepsilon \leq 8,5\%$  при  $\alpha = 0,9$  и  $k_{ж} < 0,4$  и  $\varepsilon \leq 19,5\%$  при  $\alpha = 0,9$  и  $k_{ж} = 0,4 \dots 0,7$ , где  $\alpha$  – коэффициент надежности.

Для определения массового расхода жидкости, уплотняющей щель, обозначим  $q_{ж} = G_{ж}^*/f_{щ}$  – удельный массовый расход жидкости, уплотняющей щель, кг/м<sup>2</sup>·с. Здесь  $f_{щ}$  – площадь поперечного сечения щели, м<sup>2</sup>.

В ПРВН щели длинные и узкие, т.е.  $\delta \ll l$  и  $\delta \ll b$ , где  $\delta$ ,  $l$  и  $b$  – соответственно высота, длина и ширина щели, м. Такие щели можно отнести к капиллярам и массовый расход жидкости через них определить по следующим зависимостям:

– для ламинарного течения жидкости,  $Re < 2000$ ,

$$q_{ж} = [(p_2 - p_1)\delta / (12b\nu / \delta)], \quad (9.71)$$



где  $p_2$  и  $p_1$  – соответственно давление перед щелью и за ней, Па;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

– для турбулентного течения жидкости,  $Re > 2000$ ,

$$q_{ж} = [2(p_2 - p_1)] / [\lambda_{тр} b / 2\delta + \zeta_m], \quad (9.72)$$

где  $\lambda_{тр} \approx 0,9/Re^{0,368}$  – коэффициент трения жидкости в щели;  $\zeta \approx 0,1$  – коэффициент местного сопротивления при входе жидкости в щель и выходе из щели.

Удельный массовый расход жидкости, уплотняющей щель, рассчитывают методом последовательных приближений:

– вначале полагают, что течение жидкости в щели ламинарное, определяют  $q_{ж}$  для ламинарного течения и рассчитывают  $Re = 2q_{ж}\delta/\nu$ . Если  $Re \leq 2000$ , то удельный массовый расход жидкости, уплотняющей щель, равен рассчитанному;

– если  $Re > 2000$ , то по рассчитанному  $Re$  определяют  $\lambda_{тр}$ ,  $\zeta_m$  и новое значение  $q_{ж}$ . И так повторяют до тех пор, пока предыдущее значение не будет отличаться от последующего более чем на  $\pm 5\%$ .

Затем определяют массовый расход жидкости, уплотняющей данную щель  $i$ ,

$$G_{жи}^* = q_{жи} f_{ши}$$

и массовый расход жидкости, уплотняющей все щели ПРВН:

$$G_{ж}^* = \sum_1^n G_{жи}^*,$$

здесь  $n$  – число щелей в ПРВН.

Массовый расход жидкости, который подается в рабочие ячейки маслозаполненных ПРВН,  $G_{ж} = (4...7)S$ .

Массовый расход жидкости, который попадает в щели маслозаполненных ПРВН  $G_{ж.щ} = \lambda'_{п.с} G_{ж}$ , где  $\lambda'_{п.с}$  – коэффициент откачки маслозаполненного ПРВН, в который масло не подается.

После этого определяют  $k_{ж}$ ,  $k_r$ ,  $G_{п.ж} = k_r G_{п}$  и  $\lambda'_{п.с} = G_{п.ж} / S_r \rho_{вс}$ , где  $\rho_{вс}$  – плотность газа при условиях всасывания.

При расчете ПРВН с масляным уплотнением для расчета массового расхода газа через щели также используют экспериментальные данные.

При проведении эксперимента известны геометрические размеры экспериментального ПРВН, количество и сорт заливаемого масла. В эксперименте определяются быстрота действия экспериментального ПРВН  $S_э$ , предельное остаточное давление  $p_{0.э}$ , рассчитывается проводимость щелей  $Q_э = S_э p_{0.э}$ .

Через щели ПРВН с масляным уплотнением течет жидкость, в которой растворен газ. При попадании масла в рабочую ячейку всасывания газ частично выходит из масла, заполняет часть объема рабочей ячейки, что приводит к уменьшению быстроты действия ПРВН.

Щели ПРВН с масляным уплотнением также характеризуются как длинные узкие щели:  $\delta \ll l$  и  $\delta \ll b$ , и, следовательно, массовый расход масла через них может рассчитываться по уравнениям (9.71) и (9.72).

Если положить, что проектируемый и экспериментальный ПРВН геометрически и кинематически подобны, а высота и ширина щелей у них одна и та же, то массовый расход газа через щели проектируемого ПРВН можно определить по массовому расходу газа через щели экспериментального ПРВН по уравнению

$$\begin{aligned} Q_{\rho_0} / p_0 &= [Q_э \rho_{0.э} / p_{0.э}] = \\ &= [\Pi(k_s - 1) \rho_0 w v_э] / [\Pi_э(k_{сэ} - 1) \rho_{0.э} w_э v], \end{aligned} \quad (9.73)$$

где индекс «э» относится к экспериментальному ПРВН, величины без индекса – к проектируемому ПРВН;  $\rho_0$  – плотность газа при остаточном давлении  $p_0$  и температуре всасывания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\Pi = (4R + l)$  – периметр щелей, через которые газ перетекает на всасывание, м;  $k_s = S_{r1} / S_{r2}$  – отношение геометрических объемов первой  $S_{r1}$  и второй  $S_{r2}$  ступеней ПРВН;  $w = 2\pi R n$  – окружная скорость конца пластины,  $\text{м}/\text{с}$ .

В ПРВН с двумя пластинами диаметры расточки корпусов, эксцентриситеты и диаметры роторов первой и второй ступеней выполняют одинаковыми, и тогда, если отношение  $l/R$  обозначить как  $k_l$ ,

$$k_s = kl_1 / kl_2.$$

Если предположить, что процесс сжатия в первой ступени двухступенчатого ПРВН изотермический, то давление перед щелями  $p_2 = p_0 S_{r1} / S_{r2}$ , а давление за щелями  $p_1 = p_0$ . Тогда  $p_2 - p_1 = (k_s - 1)p_0$ . Если ПРВН одноступенчатый, то произведение  $(k_s - 1)p_0$  заменяют разностью давлений  $p_n - p_0$ .

При определении периметра щелей считают, что газ течет через две торцовые щели, каждая длиной  $2R$  и одну радиальную щель длиной  $l$ . Как показывает практика, на угле между нагнетательным и всасывающим окнами пластина не выходит из паза и образуется радиальная щель. Это происходит потому, что на этом угле пластина по инерции продолжает входить в паз, а также потому, что на внешний торец пластины действует давление нагнетания. На всех остальных углах пластинах плотно прижимаются к расточке цилиндра и перетекания через радиальную щель равны нулю.

Если в уравнение (9.73) подставим значения  $\Pi$ ,  $k_s$  и  $w$  и решим его относительно  $R$ , то получим:

– если задана скорость  $w$

$$R = [Q p_0 \Pi_s (k_{s3} - 1) p_{0,3}^2 w_3 v] : [2 Q_s p_{0,3} (4 + k_{l1}) (k_s - 1) p_0^2 w v_s], \quad (9.74)$$

– если задана частота вращения  $n$  вала компрессора

$$R = \sqrt{[Q p_0 \Pi_s (k_{s3} - 1) p_{0,3}^2 w_3 v] : [2 \pi n Q_s p_{0,3} (4 + k_{l1}) (k_s - 1) p_0^2 v_s]}. \quad (9.75)$$

Таким образом определяется радиус расточки корпуса и, следовательно, остальные геометрические размеры ПРВН, который будет иметь требуемое остаточное давление.

Коэффициент откачки многопластинчатых ПРВН  $\lambda = 0,50 \dots 0,85$  до давления всасывания  $10 \dots 15$  кПа и падает до нуля при остаточном давлении, которое обычно лежит в пределах  $1,5 \dots 0,7$  кПа. В вакуумных насосах с масляным уплотнением (двухпластинчатых) коэффициент откачки практически постоянен до давления всасывания  $0,133$  Па и  $\lambda = 0,70 \dots 0,85$ , а затем падает до нуля при предельном остаточном давлении всасывания.

Эффективная мощность  $N_e$ , кВт, на валу ПРВН

$$N_e = N_{сж} + N_{мех} + N_{тр}, \quad (9.76)$$

где  $N_{сж}$  – мощность, затрачиваемая на сжатие и перенос газа, кВт;  $N_{мех}$  – мощность, теряемая в уплотнениях и подшипниках, кВт;  $N_{тр}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление трения при движении пластин в пазах ротора и по цилиндрической расточке корпуса, кВт.

Для ПРВН со смазкой и сухих

$$N_{сж} = [1,05 k p S_r / (k - 1)] [(p_n / p)^{(k-1)/k} - 1], \quad (9.77)$$

где  $k$  – показатель адиабаты откачиваемого газа (для воздуха  $k = 1,41$ );  $p$ ,  $p_n$  – давление соответственно всасывания и нагнетания, кПа.

Для ПРВН маслозаполненных и с масляным уплотнением

$$N_{сж} = [K_N p S_r n_r / (n_r - 1)] \times [(p_n / p)^{(n_r - 1)/n_r} - 1], \quad (9.78)$$

где  $n_r = \ln(p_n / p) / [\ln(p_n / p) - \ln(T_n / T)]$  – температурный показатель политропы сжатия; здесь  $T_n$ ,  $T$  – температура газа соответственно на нагнетании и всасывании;  $K_N$  – эмпирический коэффициент (можно принять  $K_N = 1,18$ ).

Как показывают экспериментальные и практические данные, мощность, затрачиваемая на преодоление трения в уплотнениях и подшипниках,  $\leq 1,5 \dots 2,0$  % от мощности  $N_e$ .

При движении пластины в пазах ротора и по цилиндрической расточке корпуса силы трения возникают от действия внешних сил инерции и сил от перепада



давления, действующего на пластину. Массовыми силами в расчетах обычно пренебрегают из-за их малости. Мощность, затрачиваемая на трение,

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{ц.и}} + N_{\text{п.и}} + N_{\text{ц.}\Delta p} + N_{\text{п.}\Delta p}, \quad (9.79)$$

где  $N_{\text{ц.и}}$  и  $N_{\text{п.и}}$  – мощности, затрачиваемые на преодоление трения соответственно при движении пластины по цилиндрической расточке корпуса и в пазу ротора при действии на пластину только сил инерции;  $N_{\text{ц.}\Delta p}$  и  $N_{\text{п.}\Delta p}$  – то же, при действии на пластину сил от перепада давления.

Для машин с радиальными и наклонными (при  $\psi < 15^\circ$ ) пластинами

$$N_{\text{ц.и}} \approx 2\pi\mu_{\text{ц}}R^2m\omega^2z[1 - (h/2R) + 2e^2/R^2]n;$$

$$N_{\text{п.и}} \approx 8\mu_{\text{ц}}\mu_{\text{р}}Rezm\omega^2n(1 - h/2R + 2e^2/R^2) \times \\ \times (1 + e/h)/(1 - e/h);$$

$$N_{\text{ц.}\Delta p} \approx \mu_{\text{ц}}\mu_{\text{р}}leRpn \lg(p_{\text{н}}/p)k^{0,528} \cdot 10^{1,24e/h + 1,4};$$

$$N_{\text{п.}\Delta p} \approx \mu_{\text{р}}le^2pn \lg(p_{\text{н}}/p)k^{0,291} \cdot 10^{1,175e/h + 1,325};$$

где  $m$  – масса пластин, кг;  $\omega = 2\pi n$  – угловая скорость ротора, рад/с;  $\mu_{\text{ц}}$  и  $\mu_{\text{р}}$  – коэффициенты трения пластины соответственно по цилиндрической расточке корпуса и в пазу ротора;  $h$  – высота пластины, м.

Для насосов со смазкой, имеющих чугунные корпус и ротор и стальные пластины,  $\mu_{\text{ц}} = 0,06 \dots 0,08$ ;  $\mu_{\text{р}} = 0,21$ ; если пластины выполнены из асботекстолита и температура нагнетания лежит в пределах  $T_{\text{н}} = 398 \dots 433$  К,  $\mu_{\text{ц}} = \mu_{\text{р}} = 0,08 \dots 0,09$ .

Для маслозаполненных насосов и насосов с масляным уплотнением с пластинами из асботекстолита:

– при использовании вязких масел

$$\mu_{\text{ц}} = \mu_{\text{р}} = 0,103 (\lg w)^{-0,461};$$

– в случае применения масел с малой вязкостью

$$\mu_{\text{ц}} = \mu_{\text{р}} = 0,0945 (\lg w)^{-0,461},$$

где  $w = 2\pi Rn$  – средняя скорость скольжения пластин по цилиндру, м/с.

Мощность, кВт, затрачиваемую на перемещение жидкости в ПРВН с масляным уплотнением, определяют по формуле

$$N_{\text{ж}} = (1 - \lambda)S_{\text{г}}(p_{\text{н}} - p), \quad (9.80)$$

а для режима с предельным остаточным давлением – по формуле

$$N_{\text{ж}} = (S_{\text{г}} - S)(p_{\text{н}} - p_0). \quad (9.81)$$

Методика расчета геометрических размеров состоит в следующем.

Задавшись коэффициентом откачки  $\lambda$ , из уравнения (9.3) находят  $S_{\text{г}}$  и из уравнения (9.70) вычисляют  $R$  по формуле

$$R = [2\pi S_{\text{г}} / (C\epsilon k_l w)]^{0,5}, \quad (9.82)$$

где  $k_l = l/R = 3,5 \dots 5,0$  – относительная длина ротора;  $\epsilon = e/R = 0,09 \dots 0,15$  – относительный эксцентриситет.

Для двухпластинчатых ПРВН относительный эксцентриситет увеличивают до 0,024, а высоту пластины выполняют равной  $3e$  вместо  $(3,5 \dots 4)e$  для многопластинчатых ПРВН.

Среднюю скорость  $w$ , м/с, скольжения пластин по цилиндру принимают, исходя из требования обеспечения заданного срока службы пластин: для стальных пластин 12...13, для асботекстолитовых 15...18, для графитовых и фторопластовых с наполнителями 6...10.

Определив радиус  $R$  по формуле (9.82), его округляют до ближайшего значения из ряда нормальных линейных размеров и находят частоту вращения ротора  $n = w/(2\pi R)$ .

По полученной частоте вращения ротора подбирают асинхронный двигатель; при этом мощность определяют, задавшись изотермическим КПД  $\eta_{\text{из}} = 0,25 \dots 0,60$  для многопластинчатых ПРВН и для двухпластинчатых вакуумных насосов  $\eta_{\text{из}} = 0,30 \dots 0,65$ . Эффективная мощность

$$N_e = N_{\text{из}}/\eta_{\text{из}},$$

где  $N_{\text{из}} = pS_{\text{г}} \ln(p_{\text{н}}/p)$  – изотермическая мощность сжатия.

Затем вычисляют эксцентриситет  $e = \epsilon R$ , длину ротора  $l = k_l R$ , радиус ротора

$r = R - e$ , высоту пластины  $h = (3,5 \dots 4,0)e$  для многопластинчатых ПРВН и  $h = (3 \dots 8,7)e$  для двухпластинчатых, глубину паза  $h_n = h + (0,5 \dots 1,0)10^{-3}$ . Рассчитывают мощность, затрачиваемую на сжатие, по формуле (9.77) или (9.78), мощность на трение пластин по формуле (9.79), мощность на перемещение жидкости по формулам (9.80) и (9.81) и эффективную мощность по формуле (9.76), приняв  $N_{\text{мех}} = (0,010 \dots 0,015)N_e$ .

Угол закрытия всасывающего окна  $\delta_1$  для многопластинчатых вакуумных насосов (см. рис. 9.53, а) принимают  $\delta_1 = (0,6 \dots 1,0)\beta$ , где  $\beta = 2\pi/z$  — угол между двумя соседними пластинами. Угол  $\delta_2$  открытия нагнетательного окна определяют, исходя из условия обеспечения заданного внутреннего отношения давления  $\epsilon_{\text{вн}}$  в вакуумном насосе, под которым понимают отношение давления  $p_2$  в рабочей ячейке, расположенной непосредственно перед нагнетательным окном, к давлению  $p_1$  в рабочей ячейке, в данный момент отсоединенной от всасывающего окна.

Для ПРВН с достаточной точностью давление  $p_1$  можно принять равным давлению всасывания  $p$ , а давление  $p_2$  — для многопластинчатых ПРВН равным барометрическому при  $\epsilon = p_n/p \leq 3$  и при  $\epsilon > 3$  конструктивно из условия обеспечения скорости движения газа в нагнетательном окне  $2 \dots 3$  м/с.

Предположив, что в рабочей ячейке сжимается постоянное количество газа, отношение давления  $p_\phi$  в текущей ячейке к давлению всасывания  $p$  для маслозаполненных машин можно определить по формуле

$$p_\phi/p = \{(\beta + 2 \sin \beta/2 + e \sin \beta/2R - e\beta/2R)/[\beta + 2(\sin \beta/2) \cos \varphi + e \sin \beta \times \cos 2\varphi/2R - e\beta/2R]\}^{n_T};$$

для машин со смазкой и сухих по этой же формуле, приняв  $n_T = k$ .

$p_\phi = p_2$ , когда рабочая ячейка повернется на угол  $\varphi = \varphi_k$  (см. рис. 9.53), и тогда

$$\cos \varphi_k = -0,5F \pm (0,25F - E)^{0,5},$$

где  $F = 2R \sin (0,5\beta)/(e \sin \beta)$ ;  $E = MR/(e \sin \beta)$ .

Здесь

$$M = \beta - 0,5e\beta/R - 0,5e \sin \beta/R - A/\epsilon_{\text{вн}}^{1/n_T},$$

где  $A = \beta + 2 \sin (\beta/2) + 0,5e \sin \beta/R - 0,5e\beta/R$ ;  $\beta = 2\pi/z$ .

Угол  $\delta_2 = \alpha_k + \beta/2$ ; здесь

$$\alpha_k = \arccos [\cos \varphi_k - (e \sin^2 \varphi_k)/R].$$

Угол закрытия нагнетательного окна  $\delta_3$  в многопластинчатых ПРВН предпочтительно принимать равным  $0,5\beta$ , так как в этом случае заземленный объем минимален. Однако из-за перетекания газа через радиальный зазор между цилиндрической расточкой корпуса и ротором угол  $\delta_3$  увеличивают до  $\beta$ , а угол  $\delta_4$  принимают в пределах  $(1,5 \dots 2,5)\beta$  при числе пластин  $z > 10$ ; при  $z < 10$  принимают  $\delta_3 + \delta_4 = (1,0 \dots 2,5)\beta$ .

В ПРВН с масляным уплотнением угол  $\delta_3$  принимают минимальным, конструктивно приближая кромку закрытия нагнетательного отверстия как можно ближе к вертикальной оси (см. рис. 9.54). Остальные углы определяют конструктивно.

Геометрическая быстрота действия пластинчато-статорных насосов

$$S_r = \pi R^2 [1 - (r/R)^2] l n, \quad (9.83)$$

где  $R$  — радиус цилиндрической расточки корпуса насоса, м;  $r$  — радиус ротора, м;  $l$  — длина ротора, м;  $n$  — частота вращения вала насоса,  $\text{с}^{-1}$ .

Коэффициент откачки  $\lambda$  при расчете вакуумных насосов принимают  $\lambda = 0,70 \dots 0,85$  и из формулы (9.3) определяют геометрическую быстроту действия. Затем задаются относительными параметрами: длиной ротора  $l/R = 1,5 \dots 3,5$ ; отношением радиуса ротора к радиусу расточки корпуса  $r/R = 0,7 \dots 0,9$ . Частоту вращения ротора принимают  $n = 8,3 \dots 46,7 \text{ с}^{-1}$ . После выбора относительных параметров по формуле (9.83) находят радиус расточки корпуса и остальные размеры насоса.

Максимальная эффективная мощность при давлении всасывания  $p = 26,7 \dots 40,0$  кПа

$$N_e = N_{\text{из}}/\eta_{\text{из}}, \quad (9.84)$$



где  $\eta_{из}$  – условный изотермический КПД, характеризующий термодинамическое совершенство рабочего процесса, газодинамические и механические потери для пластинчато-статорных насосов;  $\eta_{из} = 0,40 \dots 0,55$ .

### 9.5.3. Характеристики вакуумных насосов

ПРВН с масляным уплотнением типа НВР предназначены для откачки из герметичных объемов от атмосферного до предельного остаточного давления воздуха, пожаро-, взрывобезопасных и нетоксичных газов, паров и парогазовых смесей, не агрессивных к материалам конструкции насоса и рабочей жидкости, предварительно очищенных от капельной влаги и механических загрязнений.

Насосы широко используются в электронной, радиотехнической, химической и других отраслях промышленности для получения низкого и среднего вакуу-

ма как самостоятельно, так и в качестве насосов предварительного разрежения при работе с высоковакуумными насосами.

Эти насосы входят в агрегаты АВР и АВД, которые состоят из пластинчато-роторного и двухроторного вакуумных насосов.

Характеристики ПРВН типа НВР [15] приведены в табл. 9.13, а зависимости быстроты действия от давления всасывания на рис. 9.56.

Условное обозначение вакуумных насосов: Н – насос, В – вакуумный, Р – роторный, цифра перед буквами – номер модификации, цифра после букв – быстрота действия,  $\text{дм}^3/\text{с}$ , буквы после цифры: Д – двухступенчатый, М – модернизированный.

Практически все насосы имеют однотипную конструкцию: на центральной стойке 1 с одной стороны смонтирован вакуумный насос 2, а с другой – электродвигатель 3 (рис. 9.57). Вход и выход из насоса могут выполняться в виде фланцев или оливок.

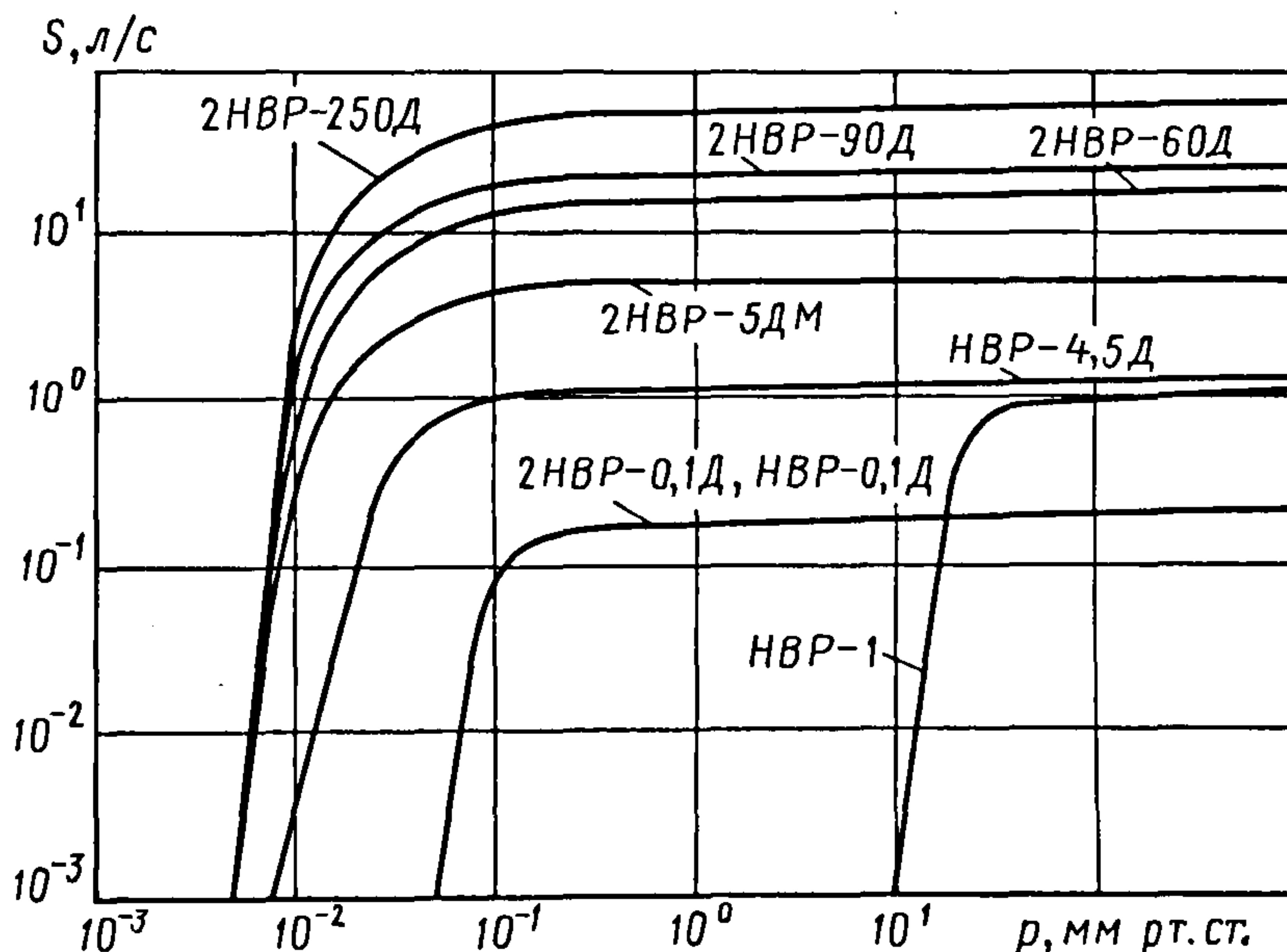


Рис. 9.56. Зависимость быстроты действия вакуумных насосов типа НВР от давления на входе

9.13. Технические характеристики ПРВН типа НВР

Параметр	НВР-0,1Д	2НВР-0,1Д	НВР-1	НВР-4,5Д	2НВР-5ДМ	2НВР-60Д	2НВР-90Д	2НВР-250Д
Быстрота действия в диапазоне давлений на входе от атмосферного до 0,26 кПа (2 мм рт. ст.), м <sup>3</sup> /ч (л/с)	0,4 (0,12)		36 (1)	4,5 (1,25)	19,8 (5,5)	60 (17,6)	90 (25,0)	230 (63)
Предельное остаточное давление, кПа (мм рт. ст.), не более, при применении масла: ВМ-1С ТУ 38.101-1187-88:								
а) парциальное без газобалласта	2·10 <sup>-4</sup> (1,52·10 <sup>-3</sup> )			3,3·10 <sup>-5</sup> (2,5·10 <sup>-4</sup> )		1,0·10 <sup>-5</sup> (7,5·10 <sup>-5</sup> )		
б) полное без газобалласта	6,7·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-2</sup> )		1,33 (10)	1,1·10 <sup>-3</sup> (8·10 <sup>-3</sup> )		6,7·10 <sup>-4</sup> (5·10 <sup>-3</sup> )		
в) полное с газобалластом	—			6,7·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-2</sup> )	2,6·10 <sup>-3</sup> (2,0·10 <sup>-2</sup> )	6,7·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-2</sup> )		
ВМ-6 ТУ 38.041-58-3-90:								
а) парциальное без газобалласта			—	4,0·10 <sup>-4</sup> (3,0·10 <sup>-3</sup> )	1,3·10 <sup>-5</sup> (1·10 <sup>-4</sup> )	2,7·10 <sup>-5</sup> (2·10 <sup>-4</sup> )		
б) полное без газобалласта	—		1,33 (10)	1,99·10 <sup>-3</sup> (1,5·10 <sup>-2</sup> )		1,3·10 <sup>-3</sup> (1·10 <sup>-2</sup> )		
в) полное с газобалластом			—	1,06·10 <sup>-2</sup> (8,0·10 <sup>-2</sup> )		6,7·10 <sup>-3</sup> (5,0·10 <sup>-2</sup> )		
Наибольшее рабочее давление, кПа (мм рт. ст.)	1,33 (10)			1,33 (10)	0,133 (1)	1,33 (10)		
Объем откачиваемого сосуда, м <sup>3</sup> , не более	0,07		0,7	1	3,5	12		25
Наибольшее давление паров воды на входе в насос, кПа (мм рт. ст.)	1,33 (10)				2,66 (20)			
Количество рабочей жидкости, заливаемой в насос, л	0,05		0,14 <sub>0,015</sub>	0,5 <sub>0,15</sub>	1,2 ± 0,1	6		14
Габаритные размеры, мм, не более:								
длина	189(209)***	224	250	340	555	850		1080
ширина	71		143	130**	170	300**		330**
высота	93	118	190	191**	280	400**		526**
Масса, кг, не более*	1,7	2,5	8	10	26	100		210

\* Без учета рабочей жидкости.

\*\* Без учета фильтра.

\*\*\* С таходатчиком ТС-21042.

Примечание. Быстрота действия и предельное остаточное давление обеспечиваются при температуре окружающего и откачиваемого воздуха 10...25 °С и атмосферном давлении на выходе. В насосе 2НВР-250Д предусмотрено водяное охлаждение. Расход воды составляет 6 л/мин.



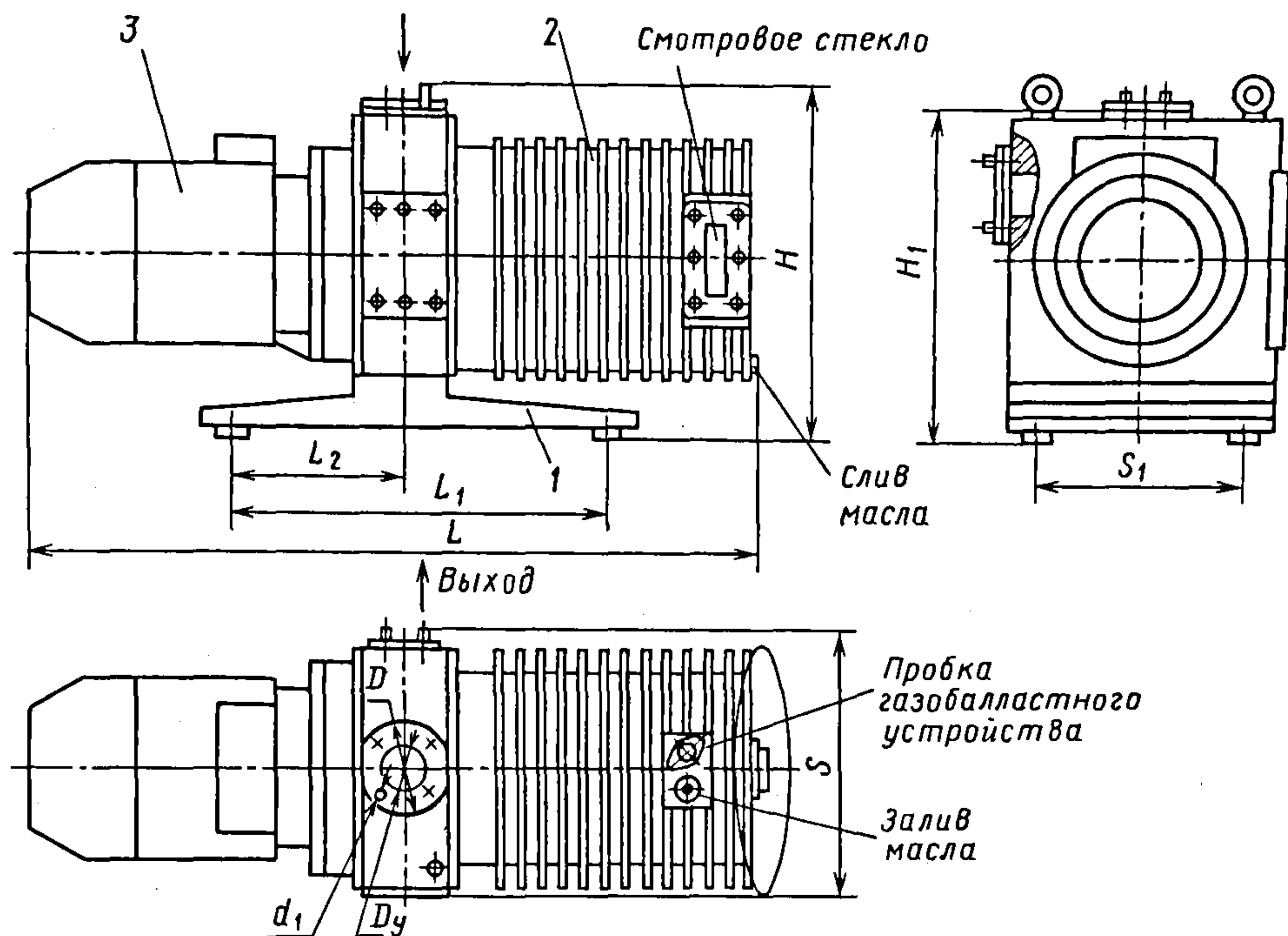


Рис. 9.57. Габаритный чертеж вакуумных насосов НВР-60Д, НВР-90Д и НВР-250Д

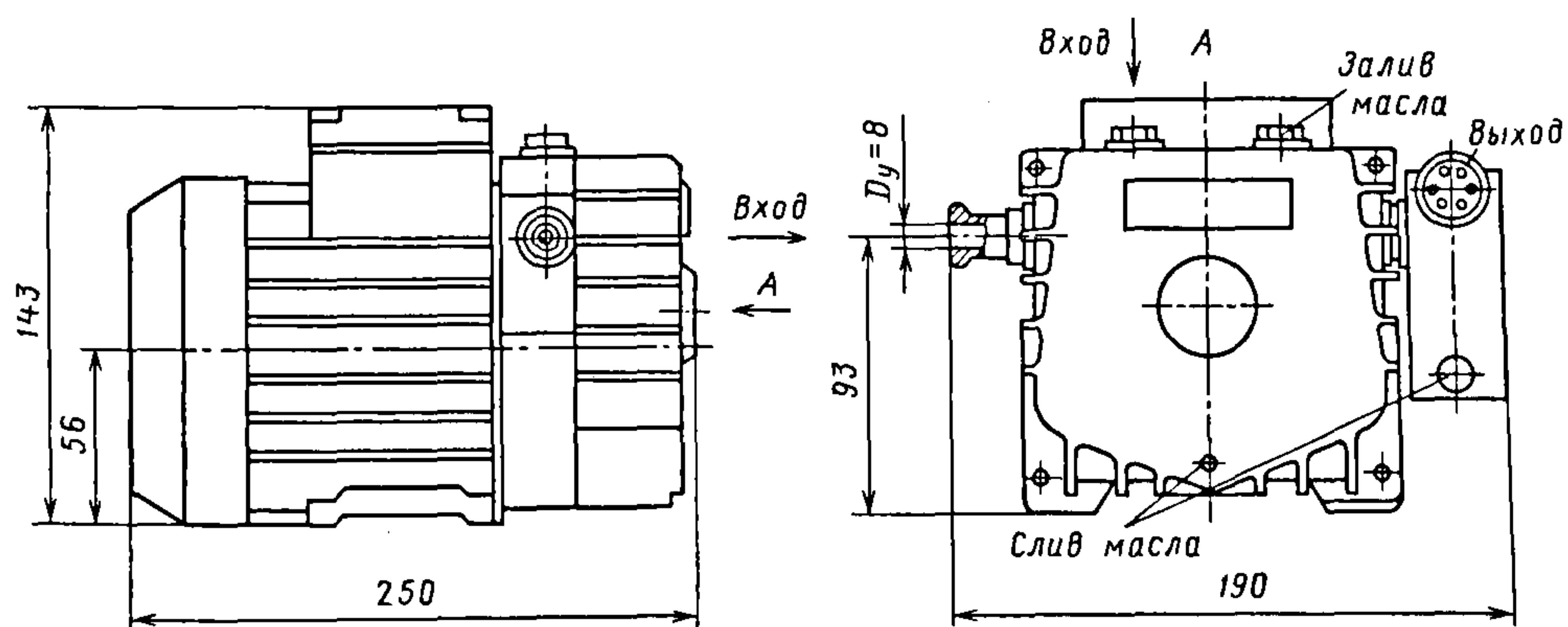


Рис. 9.58. Габаритный чертеж вакуумного насоса НВР-1

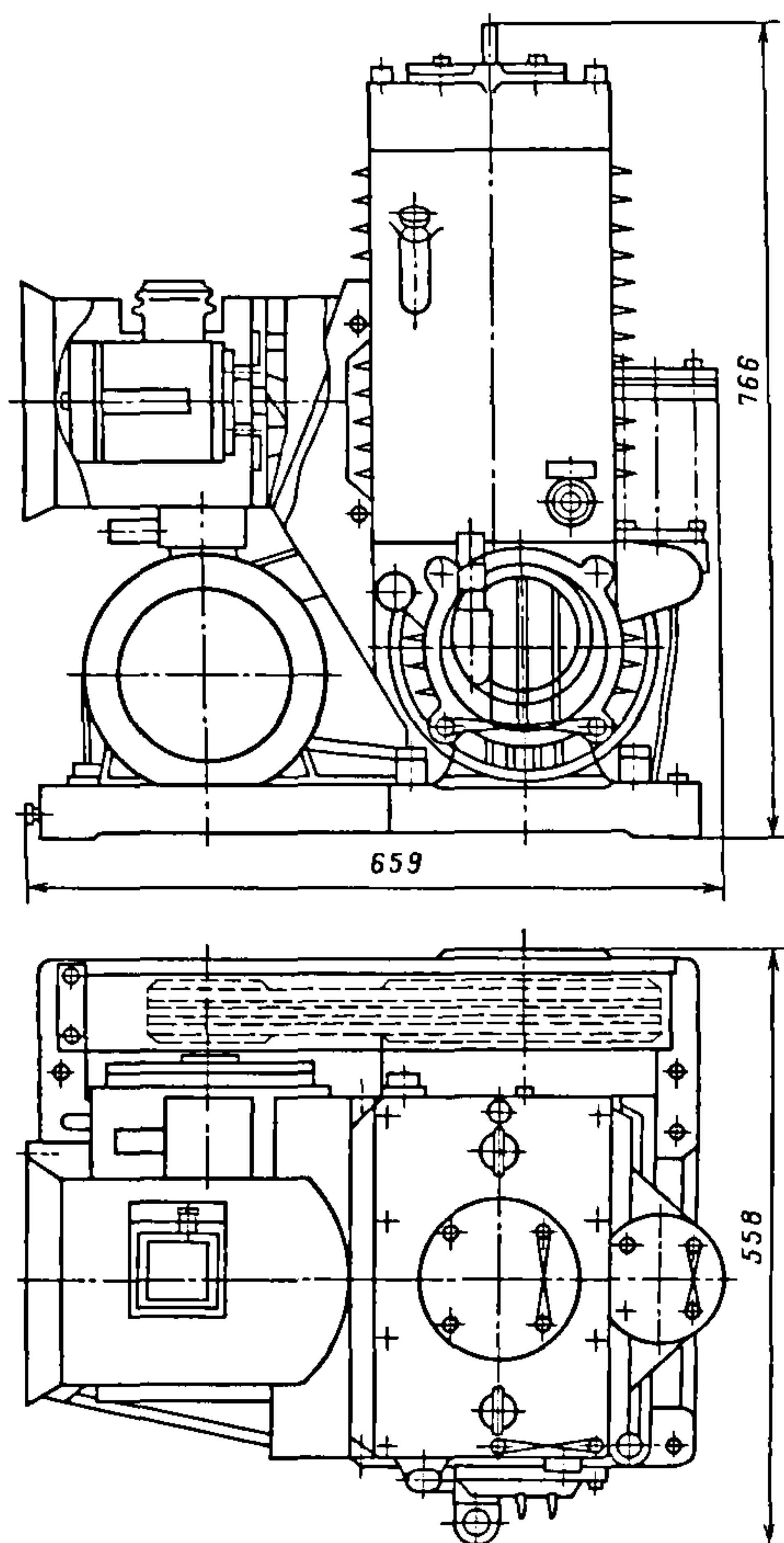


Рис. 9.59. Габаритный чертеж вакуумного насоса НВР-20С

Насос НВР-1 смонтирован на валу фланцевого электродвигателя (рис. 9.58).

Наша промышленность также выпускает одноступенчатый пластинчатороторный насос НВР-20С с принудительным воздушным охлаждением (рис. 9.59).

Насос предназначен для откачки из резервуаров объемом до  $270 \text{ м}^3$ : из герметичных вакуумных систем, из теплоизоляционных полостей резервуаров и трубопроводов криогенных систем. Он также используется для вакуумирования адсорбентов при регенерации адсорбентов в пе-

риоды послемонтажных, регламентных и ремонтных работ. Насос откачивает от атмосферного до предельного остаточного давления воздух, химически не активные, не взрыво- и пожароопасные газы, пары и парогазовые смеси, предварительно очищенные от капельной влаги и механических примесей. Насос рассчитан на работу как в стационарных, так и в передвижных установках при температурах: откачиваемой среды  $-40 \dots +50 \text{ }^\circ\text{C}$ , окружающей среды  $5 \dots 65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Техническая характеристика насоса НВР-20С

Быстрота действия в диапазоне рабочих давлений на входе от атмосферного до  $0,13 \text{ кПа}$  ( $1 \text{ мм рт. ст.}$ ), л/с ..... 20

Предельное остаточное давление, кПа (мм рт. ст.), не более:

– парциальное без газобалласта  $6,7 \cdot 10^{-4}$  ( $5 \cdot 10^{-3}$ )

– полное без газобалласта .....  $6,7 \cdot 10^{-3}$  ( $5 \cdot 10^{-2}$ )

– полное с газобалластом .....  $0,13 \dots 1,1$  3 ( $1 \dots 10$ )

Давление паров воды на входе, кПа (мм рт. ст.), не более ..... 2,35(17,6)

Мощность, потребляемая электродвигателями, кВт, не более:

– привода насоса ..... 2,2

– привода вентилятора ..... 0,08

Питание насоса от промышленной сети трехфазного переменного тока напряжением, В (частотой 50 Гц) ..... 380

Количество масла, заливаемого в насос, л ..... 7

Масса, кг, не более ..... 230

Также отечественная промышленность выпускает машины, которые могут работать как в качестве вакуумных насо-



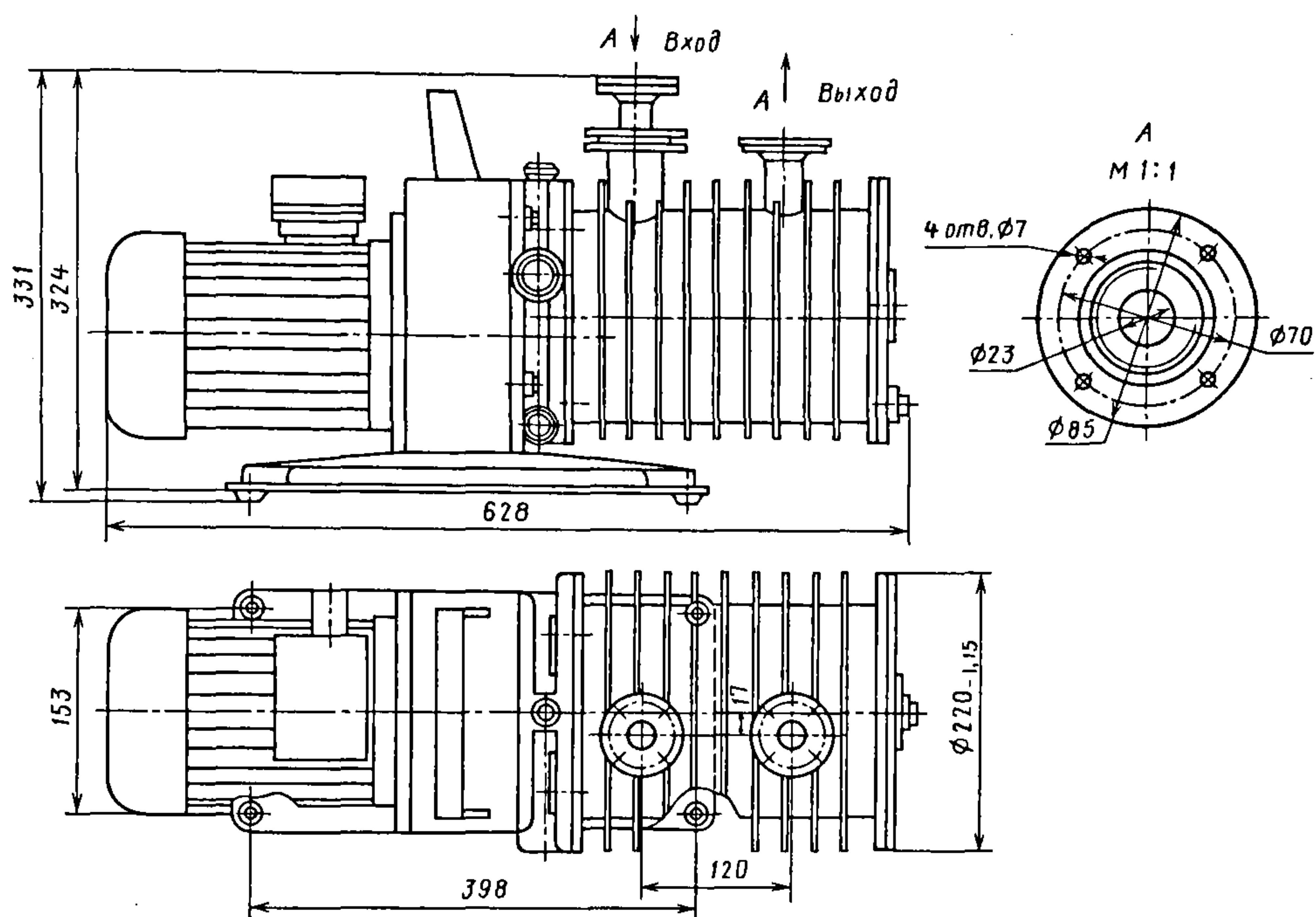


Рис. 9.60. Габаритный чертеж вакуумного насоса НВР-5ДГ

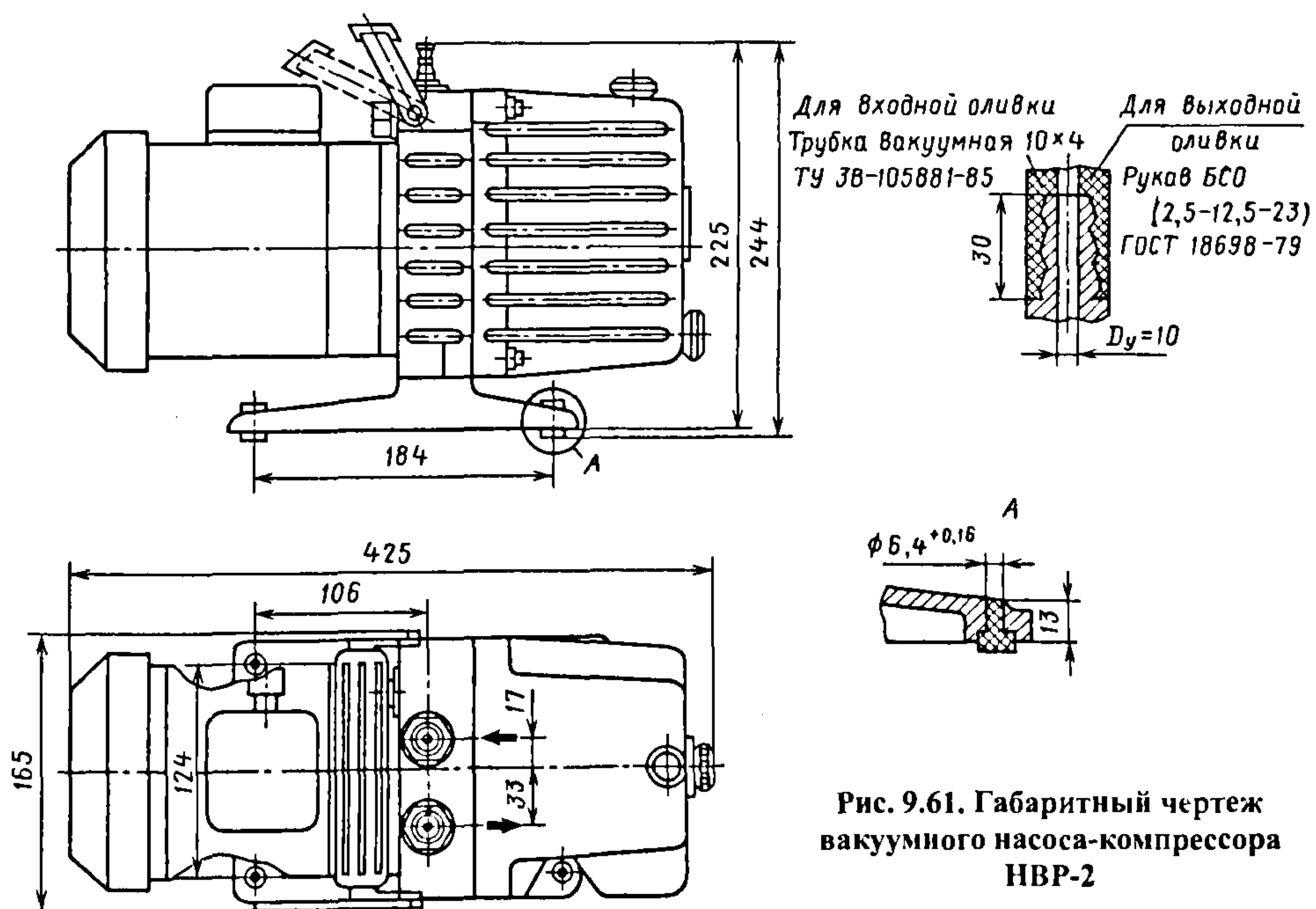


Рис. 9.61. Габаритный чертеж вакуумного насоса-компрессора НВР-2

сов, так и в роли компрессоров. К ним относится герметичный пластинчатороторный насос НВР-5ДГ (рис. 9.60) и вакуумный насос-компрессор ВНК-2 (рис. 9.61).

Насос НВР-5ДГ предназначен для откачки из герметичных объемов и перекачки в герметичные объемы до абсолютного давления 202 кПа (0,2 МПа) воздуха, а также редких и токсичных газов с содержанием кислорода  $\leq 21\%$  по объему при нормальных условиях, не конденсирующихся и не воздействующих на материалы конструкции насоса и рабочую жидкость.

#### Техническая характеристика насоса НВР-5ДГ

Быстрота действия насоса в диапазоне давлений на входе от атмосферного до 0,26 кПа (2 мм рт. ст.), л/с . . . . . 5

Предельное остаточное давление, кПа (мм рт. ст.), не более, при применении масла:

ВМ-1С, ВМ-5С ТУ 38.101-1187-88:

- а) парциальное без газобалласта  $2,6 \cdot 10^{-5}$  ласта . . . . .  $(2 \cdot 10^{-4})$
- б) полное без газобалласта  $6,7 \cdot 10^{-3}$  (5,0  $\cdot 10^{-2}$ )

ВМ-6 ТУ 38.401-58-3-90:

- а) парциальное без газобалласта  $6,7 \cdot 10^{-3}$  ласта . . . . .  $(5,0 \cdot 10^{-2})$
- б) полное без газобалласта  $1,3 \cdot 10^{-3}$  (1  $\cdot 10^{-2}$ )

Наибольшее рабочее давление, кПа (мм рт. ст.) . . . . . 2,66 (20)

Объем откачиваемого сосуда, м<sup>3</sup> 3,5

Количество рабочей жидкости, заливаемой в насос, л . . . . . 2,1

Наибольшая величина натекания внутрь насоса и вытекает из насоса, л·Па/с (л·ммк рт. ст./с), не более . . . . .  $1 \cdot 10^{-4}$  (8  $\cdot 10^{-4}$ )

Наибольшая величина натекания в откачиваемый объем при останове насоса л·Па/с (л·ммк рт. ст./с), не более . . . . .  $1 \cdot 10^{-2}$  (8  $\cdot 10^{-2}$ )

Абсолютное выпускное давление, кПа (кгс/см<sup>2</sup>) . . . . . 50,7...202 (0,5...2)

Мощность электродвигателя, кВт 0,75

Напряжение сети, В . . . . . 380

Частота, Гц . . . . . 50

Масса (без учета рабочей жидкости), кг . . . . . 50

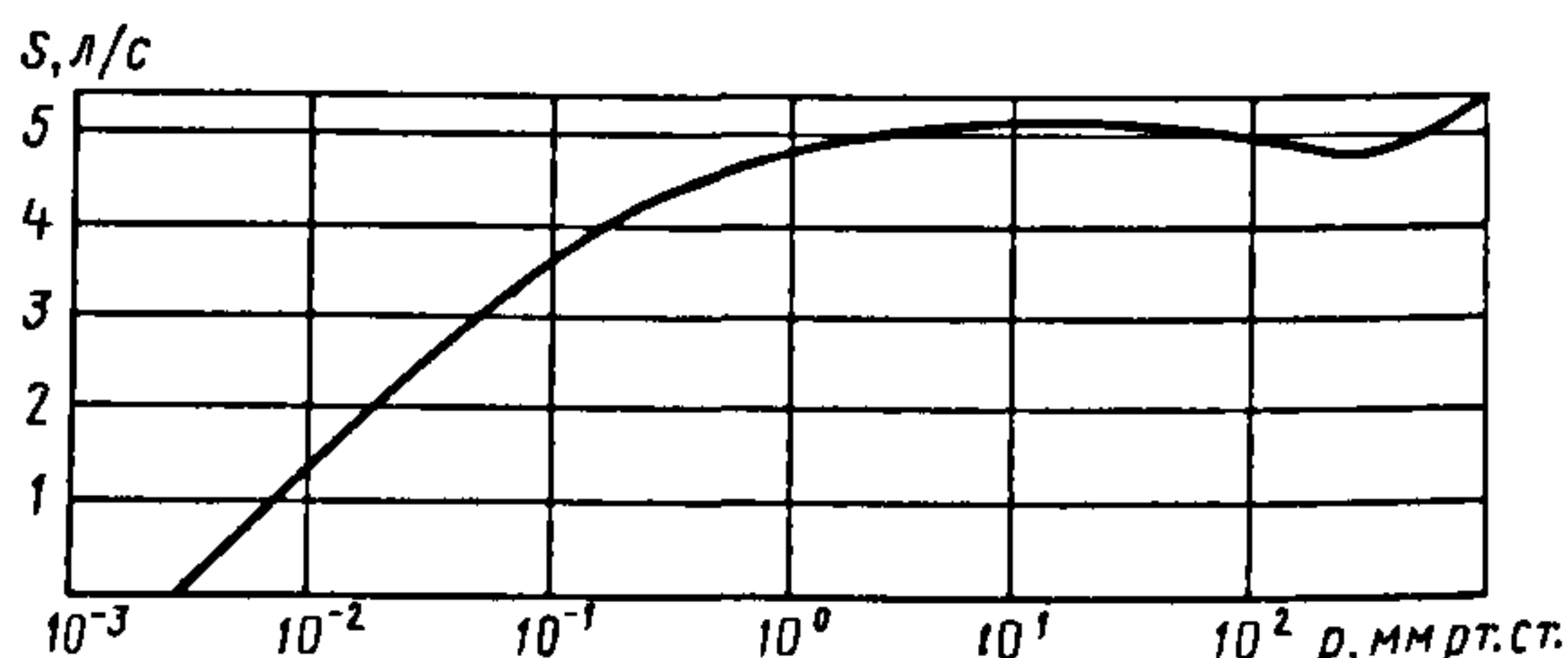
Зависимость быстроты действия от давления на входе в насос НВР-5ДГ приведена на рис. 9.62.

Вакуумный насос-компрессор ВНК-2 предназначен для откачки воздуха, химически неактивных газов, не конденсирующихся и не воздействующих на материалы конструкции и рабочую жидкость. Вакуумный насос-компрессор ВНК-2 откачивает газы и воздух от атмосферного до предельного остаточного давления или сжимает указанные среды максимум до 202 кПа.

Применяется вакуумный насос-компрессор ВНК-2 в полиграфической, радио-, электротехнической и других отраслях промышленности.

При откачивании газа из замкнутого объема вакуумный насос-компрессор работает в режиме вакуумного насоса, а при сжатии газа — в режиме компрессора с открытым входным ниппелем.

Рис. 9.62. Зависимость быстроты действия от входного давления для вакуумного насоса НВР-5ДГ





**Техническая характеристика насоса-компрессора ВНК-2**

Быстрота действия при давлении на входе 100 МПа (750 мм рт. ст.), л/с . . . . . 2,5

Предельное остаточное давление, Па (мм рт. ст) . . . 0,665·10<sup>4</sup>(50)

Абсолютное давление нагнетания при атмосферном давлении на входе, кПа (кгс/см<sup>2</sup>) . . . . . 202 (2)

Частота вращения электродвигателя (синхронного), об/мин . . . . . 3000

Мощность электродвигателя, кВт . . . . . 1,1

Габаритные размеры, мм . . 425×165×244

Масса, кг . . . . . 24

**Пример расчета.** Исходные данные: быстрота действия  $S$  в интервале давлений 133,3...101 300 Па составляет 0,02 м<sup>3</sup>/с; предельное остаточное давление  $p_o = 0,01$  Па;

давление нагнетания  $p_n = 101,3$  кПа; откачиваемый газ – воздух, температура воздуха на всасывании  $T = 293$  К; вакуумный насос – с масляным уплотнением; материал пластин – асбо-текстолит.

Определить геометрические размеры и мощность ПРВН.

При расчете используем экспериментальные данные наиболее близкого по производительности стандартного насоса НВПР 16-0.66, у которого быстрота действия в интервале давлений 133,3...101 300 Па  $S_s = 0,016$  м<sup>3</sup>/с, предельное остаточное давление  $p_{o,s} = 0,66$  Па, частота вращения вала  $n_s = 23,7$  с<sup>-1</sup>, масса масла, заливаемого в насос,  $G_m = 1,25$  л, длина ротора первой ступени  $l_{1s} = 0,130$  м, радиус ротора первой ступени  $r_{1s} = 0,042$  м, радиус расточки корпуса первой ступени  $R_{1s} = 0,0555$  м, эксцентриситет первой ступени  $e_{1s} = 0,0135$ , длина ротора второй ступени  $l_{2s} = 0,0401$  м, радиус ротора второй ступени  $r_{2s} = 0,042$  м, радиус расточки корпуса второй ступени  $e_{2s} = 0,0135$ . Для смазывания экспериментального насоса и рассчитываемого применяется одно и то же масло ВМ-1С по ТУ 38.10111187-88, следовательно  $\nu = \nu_s$ . Данные расчета сведены в табл. 9.14.

9.14. Данные расчета

Параметр	Способ определения	Результат
Быстрота действия $S$ , м <sup>3</sup> /с	Исходные данные	0,02
Предельное остаточное давление $p_o$ , Па		0,01
Давление нагнетания $p_n$ , Па		101 300
Температура воздуха на всасывании $T$ , К		293
Относительный эксцентриситет $\varepsilon = e/R$	Принимают	0,24
Относительная длина ротора:	Принимают	
первой ступени $k_{11} = l_1/R$		3
второй ступени		0,7
Коэффициент $k_s$	$k_s = k_{11} / k_{12}$	4,29
Частота вращения вала ПРВН $n$ , с <sup>-1</sup>	Принимают	50
Коэффициент откачки $\lambda$		0,5
Геометрическая быстрота действия ПРВН	$S_{г1} = S / \lambda$	0,04
Проводимость щелей ПРВН, м <sup>3</sup> ·Па/с	$Q = S_{г1} p_o$	0,0004
Газовая постоянная воздуха $R_g$ , Дж/(кг·К)	–	287,2

Продолжение табл. 9.14

Параметр	Способ определения	Результат
Плотность воздуха на всасывании ПРВН	$\rho_0 = p_0 / R_f T$	$1,19 \cdot 10^{-7}$
Геометрическая быстрота действия, м <sup>3</sup> /с: экспериментального насоса	$S_{r13} = CR_{13}e_{13}l_{13}n_3$	0,023
второй ступени экспериментального насоса	$S_{r23} = CR_{23}e_{23}l_{23}n_3$	$7,05 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент откачки экспериментального насоса	$\lambda = S / S_{r13}$	$\lambda = 0,7$
Коэффициент $k_{S3}$	$k_{S3} = S_{r13} / S_{r23}$	3,24
Периметр щелей экспериментального насоса, м	$\Pi_3 = 4R_{13} + l_{13}$	0,352
Проводимость щелей экспериментального насоса, м <sup>3</sup> ·Па/с	$Q_3 = S_{r13}p_{0.3}$	0,015
Окружная скорость на периферии пластины экспери- ментального насоса, м/с	$w_3 = 2\pi R_{13}n_3$	8,26
Радиус расточки корпуса первой и второй ступеней R, м	По формуле (9.75)	0,042
То же	Округляют	0,045
Окружная скорость на периферии пластины, ПРВН, м/с	$w_3 = 2\pi R_1 n$	14,14
Эксцентриситет ПРВН, м	$e = \varepsilon R$	0,011
Длина ротора, м: первой ступени ПРВН	$l_1 = k_1 / R$	0,135
второй ступени ПРВН	$l_2 = k_2 / R$	0,0315
Радиус ротора первой и второй ступеней ПРВН, м	$r = R - e$	0,034
Геометрическая быстрота действия ПРВН, м <sup>3</sup> /с	$S_{r1} = CR e l_1 n$	0,331
Геометрическая быстрота действия второй ступени ПРВН, м <sup>3</sup> /с	$S_{r2} = CR e l_2 n$	$7,72 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент откачки ПРВН	$\lambda = S / S_{r1}$	0,605
Высота пластины, м	$h = 3e$	0,033
Длина пружины в сжатом состоянии, м	$l_{np} = 2r - 4e$	0,024
Рабочее давление всасывания экспериментального насо- са $p_3$ , Па	Принимают	0,133
Давление всасывания второй ступени экспери- ментального насоса $p_{23}$ , Па		1,33
Плотность газа на всасывании экспериментального на- соса, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_3 = p_3 / R_f T$	$1,58 \cdot 10^{-6}$
Массовое количество газа, откачиваемое экспери- ментальным насосом, кг/с	$m_3 = S \rho_3$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Температура газа на всасывании второй ступени экс- периментального насоса, К	Принимают	300
Плотность газа на всасывании второй ступени экс- периментального насоса, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{23} = p_{23} / R_f T_{23}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент откачки второй ступени экспери- ментального насоса	$\lambda = m_3 / S_{r23} \rho_{23}$	0,23
Рабочее давление всасывания ПРВН $p$ , Па	Принимают	0,133
Давление всасывания второй ступени ПРВН $p_2$ , Па		1,33
Плотность газа на всасывании ПРВН, кг/м <sup>3</sup>	$\rho = p / R_f T$	$1,58 \cdot 10^{-6}$
Массовое количество газа, откачиваемое ПРВН, кг/с	$m = S \rho$	$3,16 \cdot 10^{-8}$
Температура газа на всасывании второй ступени ПРВН, К	Принимают	300
Плотность газа на всасывании второй ступени ПРВН, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2 = p_2 / R_f T_2$	$1,5 \cdot 10^{-5}$



Продолжение табл. 9.14

Параметр	Способ определения	Результат
Коэффициент откачки второй ступени ПРВН	$\lambda_2 = m / S_{r2} \rho_2$	0,265
Степень повышения давления: в первой ступени ПРВН	$\sigma_1 = p_2 / p$	10
во второй ступени ПРВН	$\sigma_2 = p_n / p_2$	$7,62 \cdot 10^4$
Температура газа на нагнетании второй ступени ПРВН $T_n$ , К	Принимают	345
Температурный показатель условной политропы сжатия газа: в первой ступени ПРВН	$n_{T1} = \ln \sigma_1 / [\ln \sigma_1 - \ln (T_2 / T)]$	1,01
во второй ступени ПРВН	$n_{T2} = \ln \sigma_2 / [\ln \sigma_2 - \ln (T_n / T_2)]$	
Мощность, затрачиваемая на сжатие газа, Вт: в первой ступени ПРВН	$N_{сж1} = [p S_{r1} n_{T1} / (n_{T1} - 1)] \times$ $\times [(p_2 / p)^{(n_{T1}-1)} - 1]$	10,25
во второй ступени ПРВН	$N_{сж2} = [p S_{r2} n_{T1} / (n_{T1} - 1)] \times$ $\times [(p_n / p_2)^{(n_{T1}-1)} - 1]$	123,84
в ПРВН	$N_{сж} = N_{сж1} + N_{сж2}$	134,09
Угловая скорость вала ПРВН, $c^{-1}$	$\omega = \pi n$	314,16
Плотность асботекстолита, $кг/м^3$	$\rho_{пл}$	1600
Толщина пластины, м	$\delta_{пл}$	0,008
Масса пластины, кг: первой ступени ПРВН	$m_1 = \rho_{пл} \delta_{пл} h l_1$	0,057
второй ступени ПРВН	$m_2 = \rho_{пл} \delta_{пл} h l_2$	0,0133
Коэффициент трения пластины при скольжении по внутренней расточке корпуса и в пазу ротора	$\mu_u = \mu_p = 0,103 (\lg w)^{-0,461}$	0,0675
Мощность, затрачиваемая на трение, Вт: в первой ступени ПРВН	$N_{тр1} = N_{u,u1} + N_{n,u1} + N_{u,\Delta p1} +$ $+ N_{n,\Delta p1}$	475,23
во второй ступени ПРВН	$N_{тр2} = N_{u,u2} + N_{n,u2} + N_{u,\Delta p2} +$ $+ N_{n,\Delta p2}$	110,89
в первой и второй ступенях ПРВН	$N_{тр} = N_{тр1} + N_{тр2}$	586,12
Мощность, затрачиваемая на перемещение жидкости в рабочем режиме ПРВН, Вт	$N_{ж} = S_{r1} (1 - \lambda) (p_2 - p) + S_{r2} \times$ $\times (1 - \lambda_2) (p_n - p_2)$	574,43
Мощность, затрачиваемая на привод ПРВН в рабочем режиме, кВт	$N_e = 1,02 (N_{сж} + N_{тр} + N_{ж})$	1,18
Мощность, затрачиваемая на перемещение жидкости в режиме предельного остаточного давления ПРВН, кВт	$N_{ж.0} = (S_{r1} - S) (p_n - p_0)$	1,325

Окончание табл. 9.14

Параметр	Способ определения	Результат
Степень повышения давления в режиме предельного остаточного давления ПРВН	$\sigma_{10} = p_n / p_0$	$1,013 \cdot 10^7$
Температурный показатель условной политропы сжатия газа в режиме предельного остаточного давления ПРВН	$n_{10} = \ln \sigma_{10} / [\ln \sigma_{10} - \ln(T_n - T)]$	1,01
Мощность, затрачиваемая на сжатие газа в режиме предельного остаточного давления ПРВН, Вт	$N_{сж10} = [p_0 S_{г1} n_{10} / (n_{10} - 1)] \times [\sigma_{сж}^{(n_{10}-1)/n_{10}} - 1]$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
Мощность, затрачиваемая на привод ПРВН в режиме предельного остаточного давления, кВт	$N_{eo} = 1,02(N_{сж.10} + N_{тр} + T_{ж.0})$	1,95
Мощность привода, кВт	$N_{дв} = 1,1N_{eo}$	2,15

## 9.6. ПЛУНЖЕРНЫЕ НАСОСЫ

### 9.6.1. Общие вопросы

Плунжерные вакуумные насосы предназначены для обеспечения и поддержания в замкнутом герметичном объеме низкого и среднего вакуума.

В герметичном корпусе 1 одноступенчатого плунжерного насоса (рис. 9.63) расположен ротор 2, который получает движение от эксцентрика 3, установленного на валу 4. Ротор совершает поступательно-вращательное движение, причем его плоский участок (пластина) движется в цилиндрических направляющих 5, вращающихся вокруг своей оси.

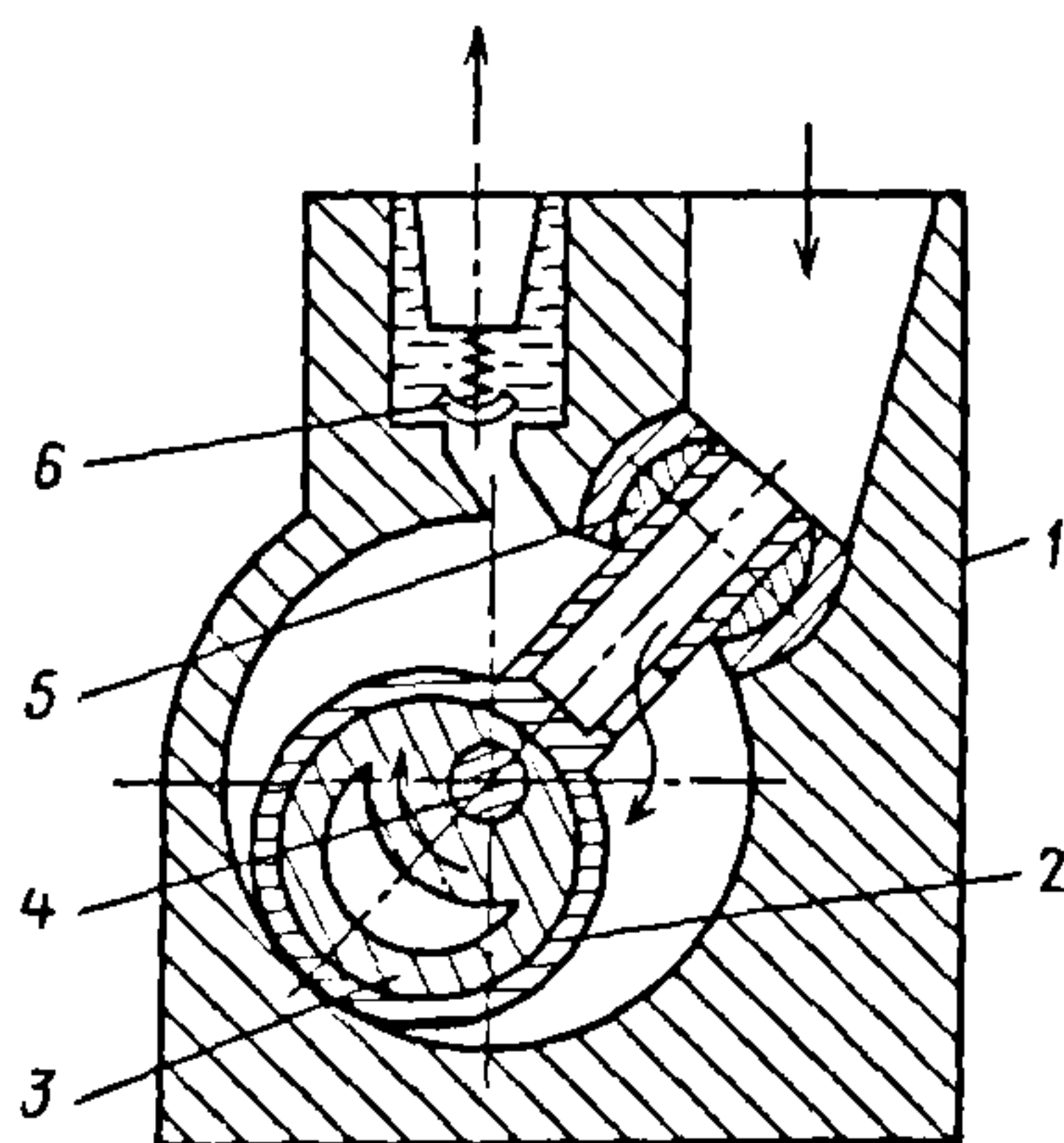


Рис. 9.63. Схема плунжерного вакуумного насоса

При вращении ротора в определенные моменты времени полость всасывания насоса через всасывающее окно в пластине сообщается с рабочей камерой и последняя заполняется откачиваемым газом. Всасывание заканчивается при разединении указанных полостей, при этом ротор совершает практически полный оборот.

Во время следующего оборота объем рабочей камеры уменьшается и происходит сжатие до давления, при котором открывается выпускной клапан 6 и газ выходит через маслоотделитель в атмосферу.

Таким образом, полный цикл работы плунжерного вакуумного насоса совершается за два оборота вала.

Для рассматриваемого насоса характерны надежность, сравнительно высокая быстрота действия, малый износ поверхностей ротора и корпуса насоса вследствие бесконтактного скольжения ротора в цилиндре. Вакуумное масло, заполняя зазоры между движущимися частями, препятствует перетеканию газа через них. Размещение выпускного клапана в масляной ванне также повышает его герметичность.

Однако наличие масла в вакуумной полости насоса может приводить к увеличению предельного остаточного давления из-за выделения растворенных газов и наличия различных примесей. К недостаткам такой конструкции насоса следует отнести также значительную неуравновешенность движущихся масс.



Кроме того, проектируются плунжерные вакуумные насосы (рис. 9.64), в которых на одном валу расположены роторы 1 и 2, с эксцентриками, смещенными один относительно другого на  $180^\circ$ . Такие насосы могут быть как одно- (рис. 9.65, а), так и двухступенчатыми (рис. 9.65, б).

В одноступенчатом исполнении обе рабочие полости, образуемые корпусом и роторами, подсоединены ко всасывающему патрубку, т.е. работают параллельно. Подобная конструкция насоса характеризуется высокой удельной быстротой действия, равномерностью откачки и несколько сниженной неуравновешенностью движущихся масс.

В двухступенчатом исполнении одна рабочая полость подсоединена к всасывающему патрубку, а другая соединена с нагнетанием первой, т.е. полости работают последовательно. Такая конструкция насоса характеризуется низким остаточным давлением и несколько сниженной неуравновешенностью движущихся масс.

**Определение основных размеров.**  
Теоретическая быстрота действия,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$$S_r = nV_n,$$

где  $n$  – частота вращения вала,  $\text{с}^{-1}$ ;  $V_n = F_n l$  – объем рабочей камеры насоса в момент отсоединения от всасывающего патрубка,  $\text{м}^3$  ( $F_n$  – площадь поперечного сечения камеры в момент закрытия всасывающего окна;  $l$  – длина камеры).

Объем рабочей камеры плунжерных насосов

$$V_n = \pi R^2 [1 - (r/R)^2] l,$$

где  $R$  – радиус цилиндрической расточки корпуса насоса;  $r$  – радиус ротора.

Теоретическая быстрота действия,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  
 $S_r = \pi R^2 [1 - (r/R)^2] l n.$

Соотношение между действительной быстротой действия  $S$  (с учетом потерь производительности на всасывании) и теоретической  $S_r$  оценивают коэффициентом откачки  $\lambda = S/S_r$ .

Типичная зависимость быстроты действия от давления всасывания  $p$  (рис. 9.66)

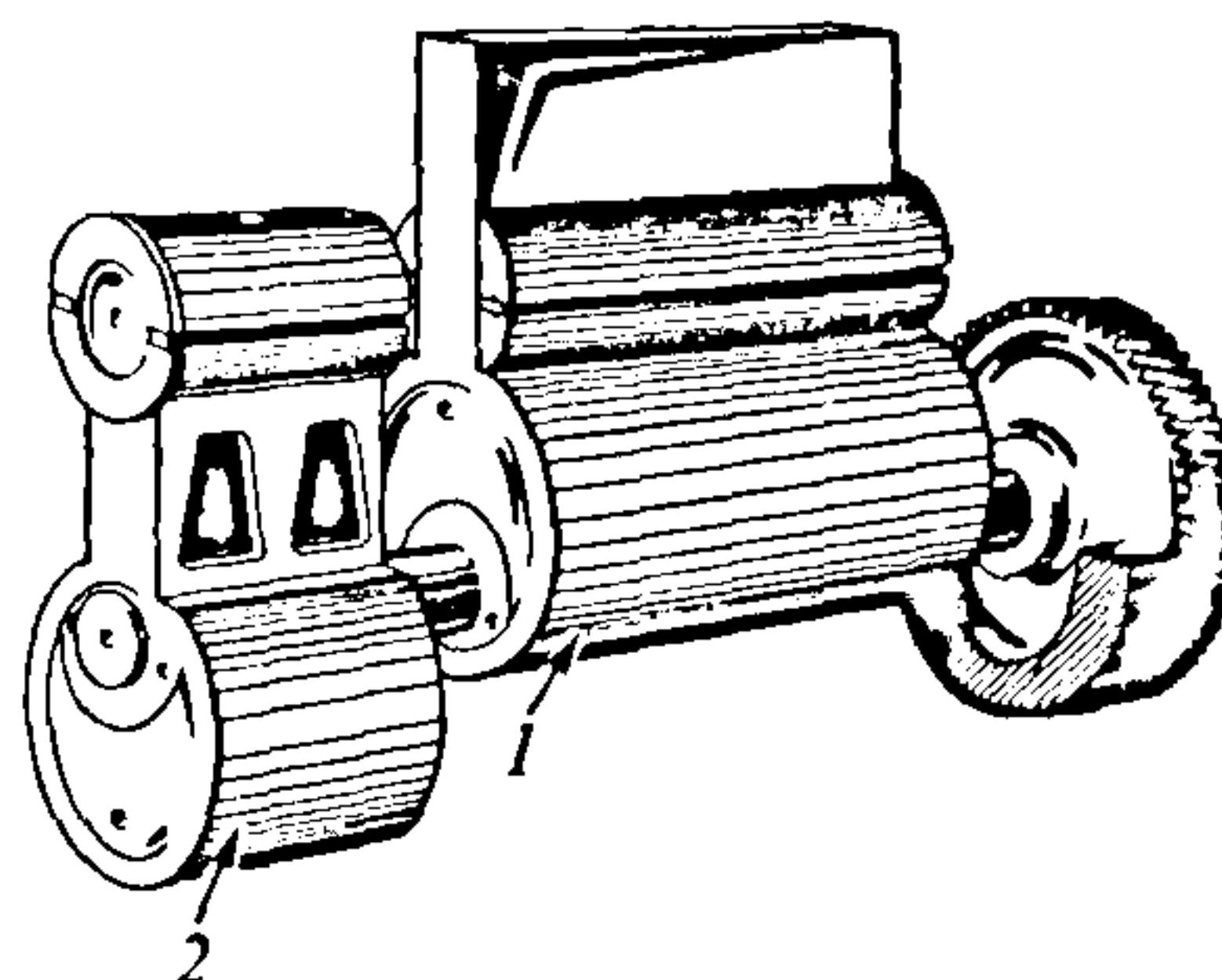
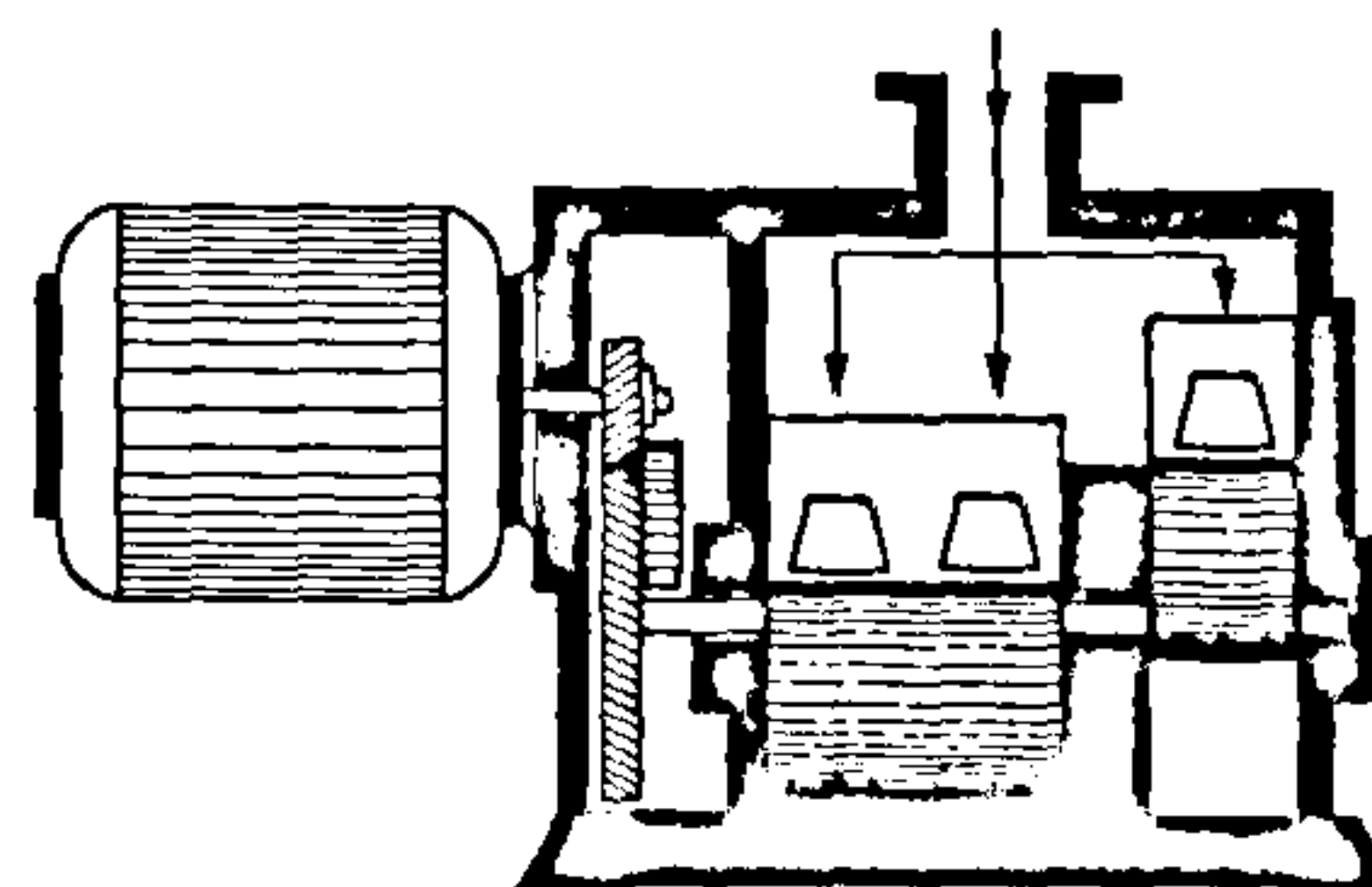
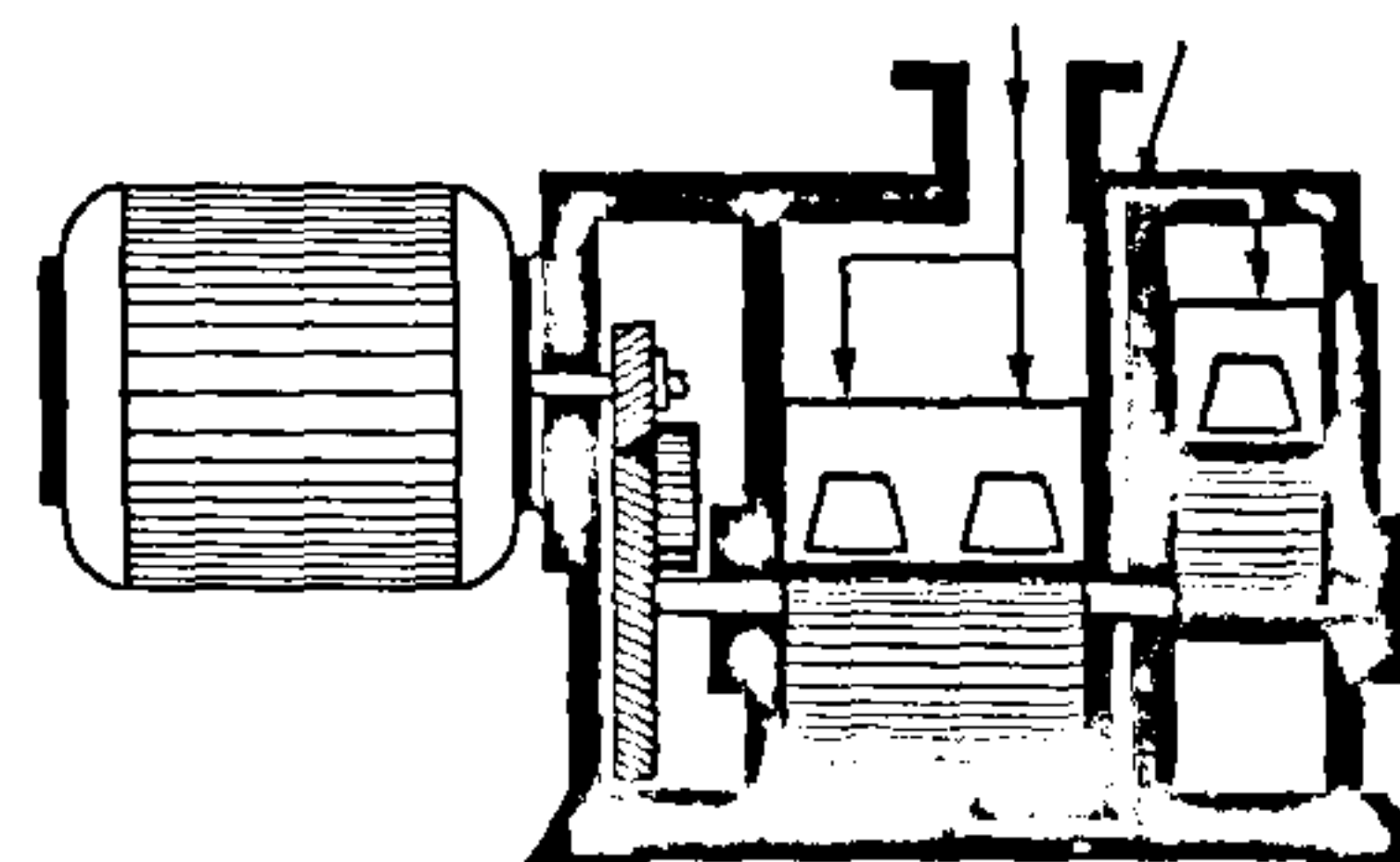


Рис. 9.64. Вал плунжерного вакуумного насоса с двумя роторами



а)



б)

Рис. 9.65. Плунжерные вакуумные насосы с двумя роторами:

а – одноступенчатые; б – двухступенчатые

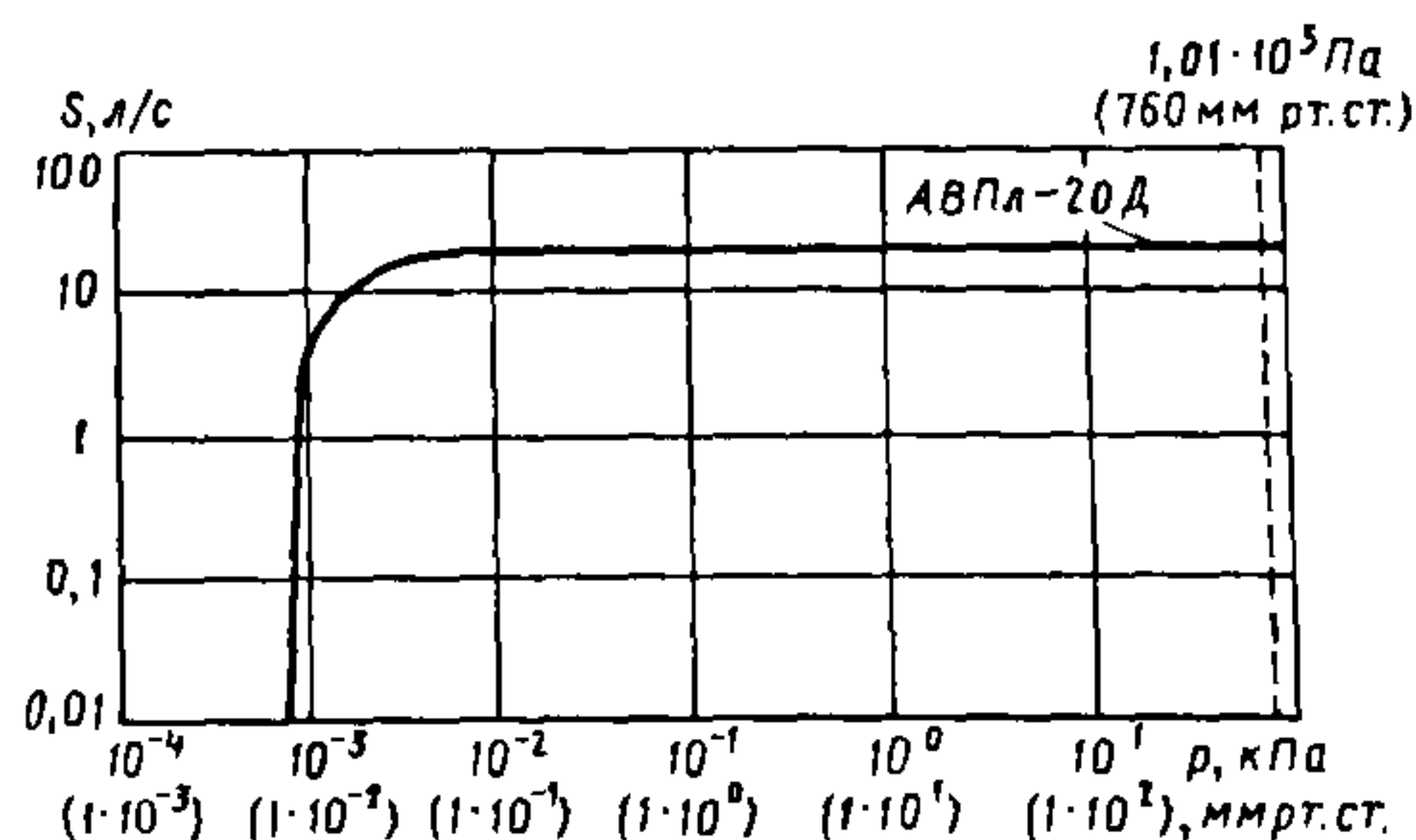


Рис. 9.66. Типовая откачная характеристика плунжерного вакуумного насоса.

Зависимость быстроты действия от входного давления агрегата АВПл-20Д

показывает, что при возрастании  $p$  быстрота действия увеличивается, а затем, с определенного давления, практически не изменяется.

Максимальные значения коэффициента откачки для плунжерных вакуумных насосов с масляным уплотнением  $\lambda = 0,70 \dots 0,85$ .

Методика расчета плунжерных вакуумных насосов состоит в следующем. Выбрав коэффициент откачки  $\lambda$  в указанном диапазоне, определяют теоретическую быстроту действия  $S_r$  при заданном значении  $S$ . Частоту вращения ротора плунжерных вакуумных насосов с масляным уплотнением выбирают в интервале  $n = 8,3 \dots 46,7 \text{ с}^{-1}$  в зависимости от быстроты действия (чем последняя больше, тем ниже частота вращения).

Задаются значениями относительных параметров:

отношением радиуса ротора к радиусу цилиндра  $r/R = 0,7 \dots 0,9$ ;

относительным эксцентриситетом  $e/R = 0,1 \dots 0,3$  (интервалы изменения параметров позволяют уменьшить габаритные размеры насоса при достаточной степени уравновешенности движущихся элементов);

относительной длиной ротора в ступени  $l/R = 1,5 \dots 3,5$ .

По выбранным значениям относительных параметров и рассчитанной теоретической скорости действия насоса находят радиус цилиндра  $R$ , а затем остальные основные размеры насоса:  $e$ ,  $r$  и  $l$ .

Эффективную мощность  $N_e$  на валу насоса определяют по его работе в режиме максимальной мощности. Мощность  $N_e$  зависит от давления всасывания  $p$ ; обычно максимальные значения  $N_e$  соответствуют  $p = 26,7 \dots 40,0 \text{ кПа}$ .

Эффективная мощность, Вт,

$$N_e = (p S_r / \eta) \ln (p_n / p),$$

где  $\eta$  – условный полный изотермический КПД;  $p_n$  – давление на выходе.

Для плунжерных вакуумных насосов –  $\eta = 0,40 \dots 0,55$ .

При откачке сред со значительным содержанием пара в процессе сжатия во внутренней полости насоса может образовываться конденсат. Он выпадает, когда в камере насоса давление становится равным давлению насыщения пара  $p_{\text{нас}}$  при температуре пара в рабочей камере насоса, которая практически равна температуре поверхности камеры насоса. Конденсат смешивается с рабочим маслом, что ведет к резкому ухудшению характеристик вакуумного насоса и повышению предельного остаточного давления  $p_0$ .

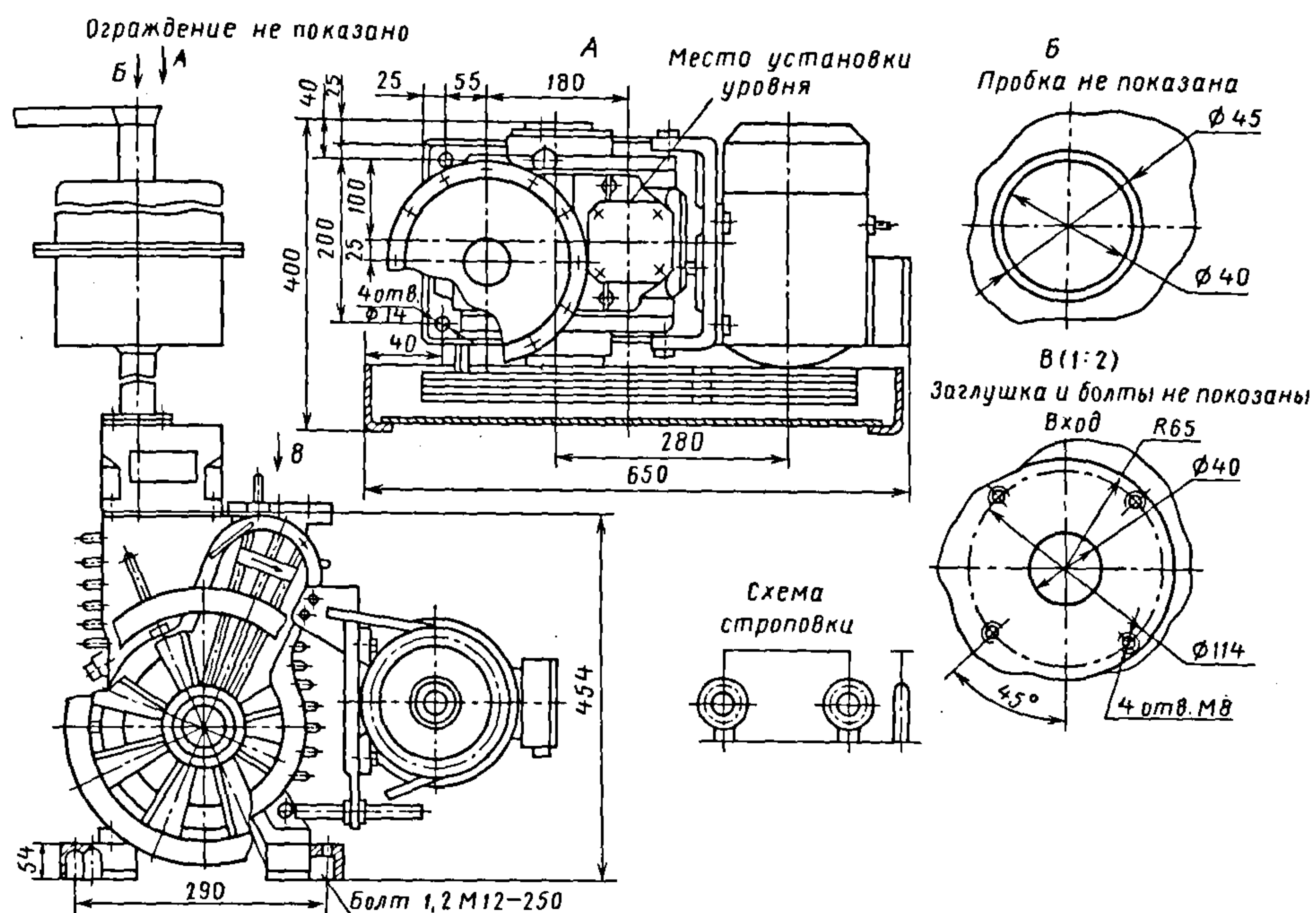
В то же время при выпадении конденсата из парогазовой смеси давление в рабочей полости практически не меняется, и выпускной клапан не открывается до тех пор, пока масса скопившегося конденсата не будет достаточна для того, чтобы открыть клапан. Открытие происходит вследствие гидравлического удара.

Работу вакуумных насосов с масляным уплотнением при откачке конденсирующихся паров можно обеспечить методом выделения конденсата из масла и удаления его из вакуумной полости, а также методом, основанным на предотвращении конденсации в процессе сжатия. Применение первого метода ограничено существенным усложнением конструкции насоса, поэтому в вакуумной технике в основном используют второй метод.

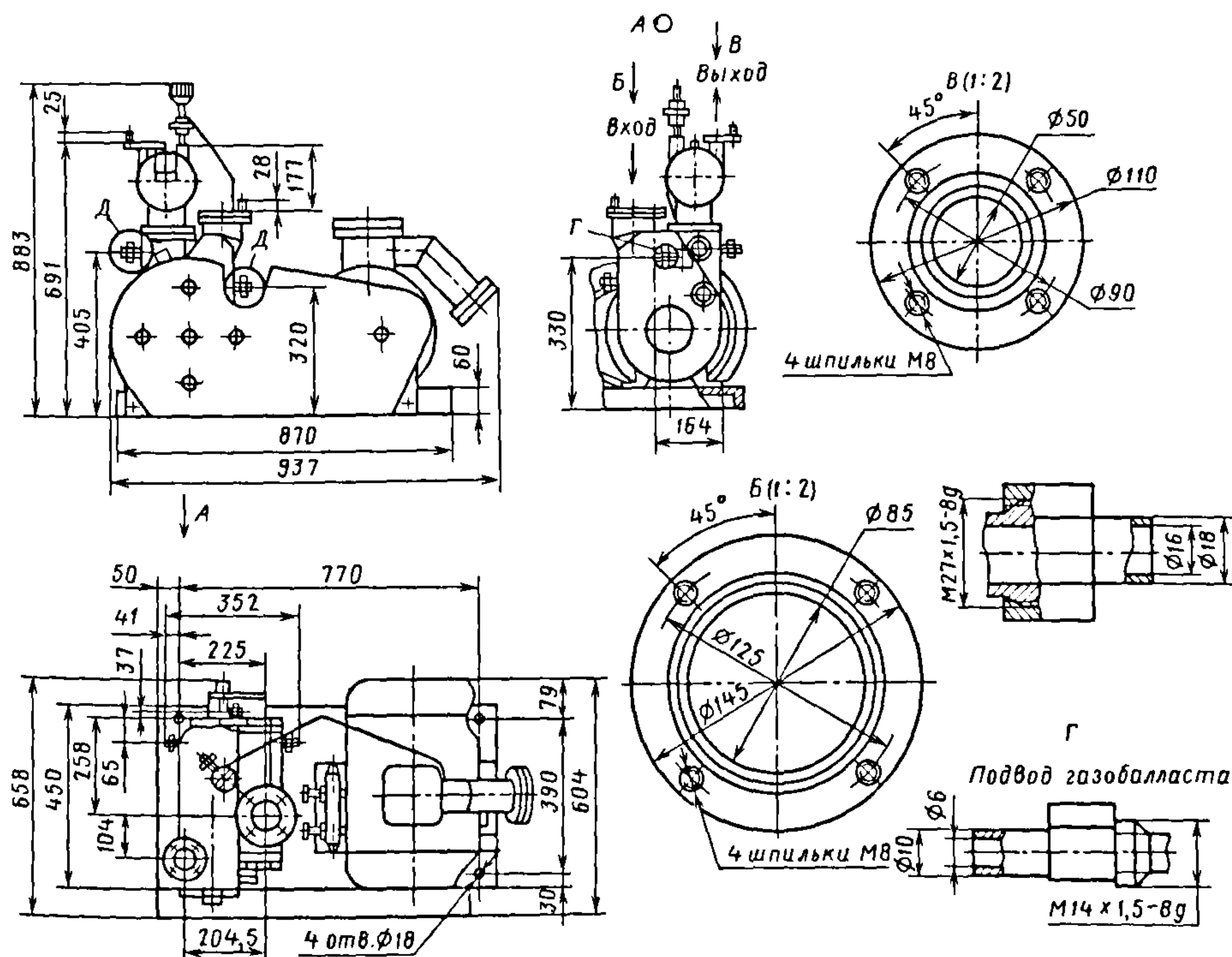
Для исключения образования конденсата парогазовую смесь подогревают, чтобы повысить давление до значения, при котором срабатывает выпускной клапан, либо в процессе работы напускают некоторое количество газа (газовый балласт) во внутреннюю полость насоса для достижения необходимого давления нагнетания до момента образования конденсата. Последний способ наиболее практичен и нашел применение в газобалластных плунжерных насосах.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает плунжерный вакуумный агрегат АВПл-20Д (рис. 9.67) и плунжерный вакуумный насос НВ-25ДН (рис. 9.68).





**Рис. 9.67. Плунжерный вакуумный агрегат АВПл-20Д**



**Рис. 9.68. Плунжерный вакуумный насос НВ-25ДН**

Зависимость быстроты действия от входного давления агрегата АВПл-20Д приведена на рис. 9.66.

Агрегат АВПл-20Д предназначен для откачки из герметичных сосудов от атмосферного до предельного остаточного давления воздуха, взрыво- и пожаробезопасных, нетоксичных газов, паров и парогазовых смесей, предварительно очищенных от капельной влаги и механических загрязнений и не агрессивных к вакуумному маслу и материалам конструкции агрегата.

Агрегат снабжен маслоотделителем и фильтром из тонковолокнистых синтетических материалов, обеспечивающих высокую степень очистки нагнетаемых газов от капель и масляного тумана. Масло возвращается из маслоотделителя в масляную камеру агрегата. Маслоотделитель агрегата обеспечивает защиту окружающей среды от загрязнений и экономию вакуумного масла при эксплуатации агрегата.

#### Техническая характеристика агрегата АВПл-20Д

Быстрота действия в диапазоне давлений от атмосферного до 0,26 кПа (2 мм рт. ст.), л/с 20  
Предельное остаточное давление, кПа (мм рт. ст.), не более:

– парциальное без газобалласта  $6,7 \cdot 10^{-6}$  ( $5 \cdot 10^{-5}$ )  
– полное без газобалласта  $4,7 \cdot 10^{-4}$  ( $3,6 \cdot 10^{-3}$ )  
– полное с газобалластом  $8,2 \cdot 10^{-4}$  ( $6,2 \cdot 10^{-3}$ )

Наибольшее давление, кПа (мм рт. ст.):

– паров воды 3,3 (25)  
– входное 40 (300)

Объем откачиваемого герметичного сосуда, м<sup>3</sup>, не более 10

Мощность электродвигателя, кВт 2,2

Число оборотов двигателя, мин<sup>-1</sup> 1500

Тип двигателя Асинхронный, трехфазный

Количество масла, заливаемого в агрегат, л  $2,2^{+0,5}$

Масса (без учета масла), кг, не более 170

Плунжерный вакуумный насос НВ-25ДН двухступенчатый с масляным уплотнением. Этот насос предназначен

для откачки насыщенных паров высокоагрессивных, токсичных и взрывоопасных газов при изменении давления на входе в насос от атмосферного до предельного остаточного.

#### Техническая характеристика вакуумного насоса

Быстрота действия насоса в диапазоне давлений во входном сечении от атмосферного давления до  $1,33 \cdot 10^{-1}$  кПа (1 мм рт. ст.) с закрытым газобалластным устройством, л/с, не менее 25  
Предельное остаточное давление во входном сечении насоса при откачке воздуха, Па (мм рт. ст.), не более:

– с учетом паров рабочей жидкости при закрытом газобалластном устройстве  $1,3 (1 \cdot 10^{-2})$   
– парциальное по воздуху при закрытом газобалластном устройстве с учетом паров рабочей жидкости  $1,3 \cdot 10^{-2} (1 \cdot 10^{-4})$   
– с напуском газобалластного азота с избыточным давлением  $(40 \pm 10)$  кПа 13 ( $1 \cdot 10^{-1}$ )

Допустимое избыточное давление на выходе насоса, кПа (кгс/см<sup>2</sup>), не более 50 (0,5)  
Рабочая жидкость Синтетическое масло

Количество рабочей жидкости, заливаемой в насос, л 3

Охлаждение насоса Водяное  
Параметры воды, подаваемой в насос:

– расход, л/ч 3000  
– температура, °С, не более 29  
– давление, МПа (кгс/см<sup>2</sup>) 0,4 (4)

Газ для газобалласта, продувки и напуска Газообразный азот

Давление газобалластного азота на входе в работающий насос во время продувки и напуска, кПа (мм рт. ст.), не более 4 (30)

Поток балластного газа для газобалласта, л·кПа/с (л·мм рт.ст.) 186 (1400)

Мощность, потребляемая электродвигателем насоса в диапазоне давления на входе 33...40 кПа (250...300 мм рт. ст.), кВт, не более 5,4



### 9.6.2. Расчет газобалластных насосов

Газовый балласт напускают в рабочую камеру как плунжерных, так и пластинчато-роторных и пластинчато-статорных насосов с масляным уплотнением. Считая процесс сжатия в рабочей камере насосов изотермическим, условие предотвращения конденсации можно выразить зависимостью [6]

$$Q_6 \geq S p_n (p_{\phi}/p_{\text{нас}} - 1 - p_r/p_n),$$

где  $Q_6$  — поток газового балласта, Па·м<sup>3</sup>/с;  $S$  — быстрота действия газобалластного насоса, м<sup>3</sup>/с;  $p_{\phi}$  — форвакуумное давление, при котором происходит выпуск парогазовой смеси из насоса, Па;  $p_{\text{нас}}$  — давление насыщенных паров при рабочей температуре внутренней поверхности камеры насоса, Па;  $p_r$  — парциальное давление неконденсирующегося газа в смеси на входе в камеру, Па;  $p_n$  — парциальное давление пара в смеси на входе в камеру, Па.

Если в парогазовой смеси преобладают пары ( $p_r < p_n$ ), то

$$Q_6 \geq S p_n (p_{\phi}/p_{\text{нас}} - 1).$$

Если температуры смеси на входе в насос и на поверхности камеры различаются и температура смеси в процессе сжатия становится равной температуре камеры, то

$$Q_6 \geq S (T_n/T) p_n (p_{\phi}/p_{\text{нас}} - 1 - p_r/p_n),$$

где  $T_n$  — температура внутренней поверхности рабочей камеры насоса;  $T$  — температура парогазовой смеси на входе в насос.

Расхождение значений потоков  $Q_6$ , найденных без учета и с учетом изменения температуры смеси, в широком диапазоне давления  $\leq 10...15\%$ .

Для напуска газа в конструкции газобалластных насосов предусмотрены специальные дозаторные устройства (рис. 9.69), позволяющие регулировать поток газового балласта для улучшения эксплуатационных характеристик насоса. Эти устройства размещают в непосредственной близости от выпускного клапана. Газ попадает в насос через трубопровод 2 и обратный клапан 1 дозаторного устройства.

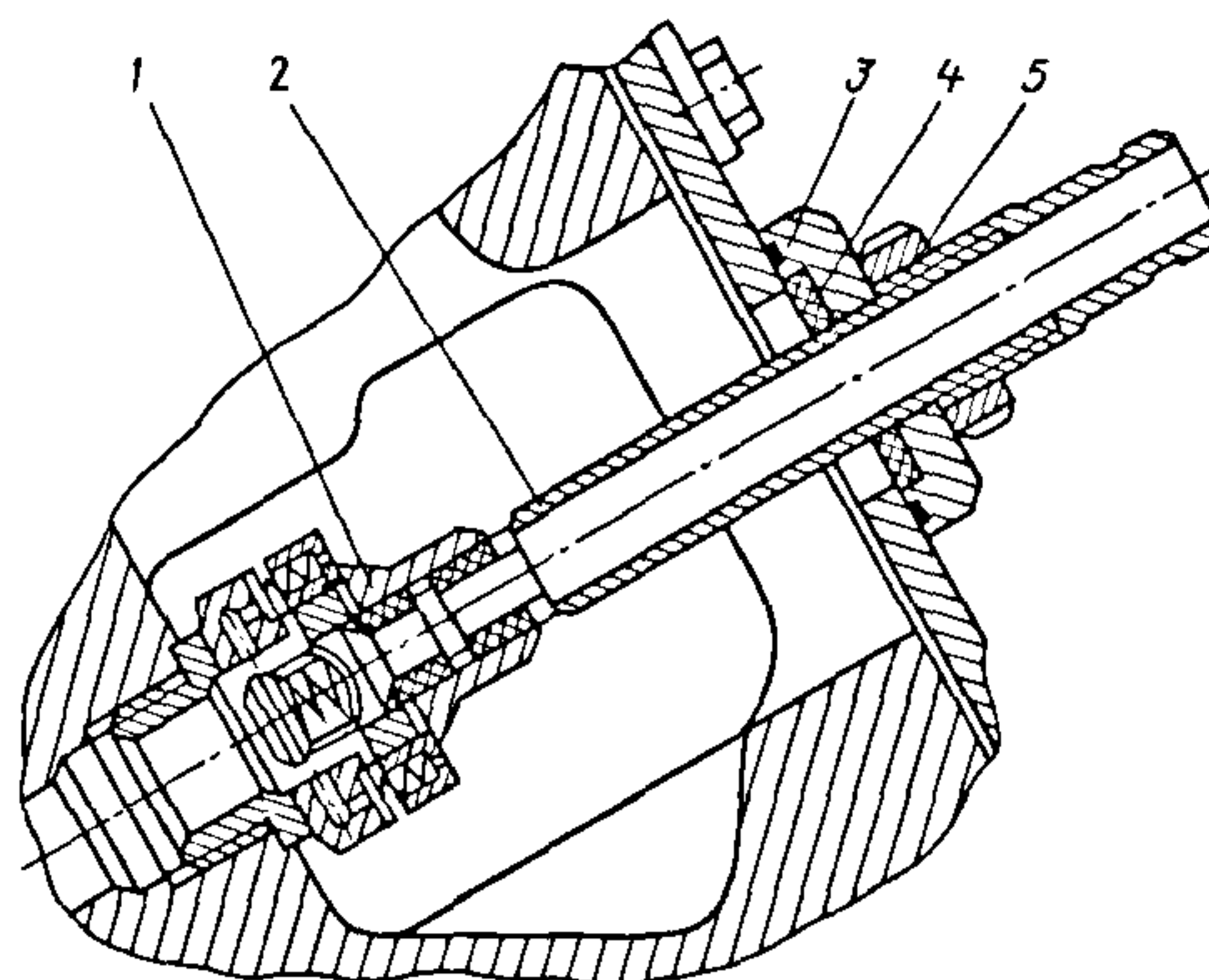


Рис. 9.69. Дозаторное устройство

Тарелка (или шарик) обратного клапана отходит от седла под действием силы от перепада давления атмосферного и в камере сжатия вакуумного насоса и силы со стороны пружины. В случае прекращения подачи газа пружина тарельчатого клапана прижимает тарелку к седлу, обеспечивая герметичность рабочей камеры насоса. Для герметизации трубопровода предназначен уплотнитель 4, расположенный во фланце 3. Фланец зажимается гайкой 5.

Работа вакуумного насоса с открытым дозаторным устройством приводит к увеличению создаваемого предельного остаточного давления, а также затрачиваемой мощности. Предельное остаточное давление для двухступенчатых плунжерных насосов повышается в 4–10 раз, для одноступенчатых — примерно в 60 раз. Мощность особенно сильно возрастает при сравнительно малом давлении всасывания. При отключении дозаторного устройства откачные характеристики достаточно быстро восстанавливаются вследствие удаления конденсата, образовавшегося до напуска газового балласта, и очистки рабочего масла от растворенных в нем примесей.

Различная степень влияния газового балласта на предельное, остаточное давление в одно- и двухступенчатых насосах обусловлена тем, что в двухступенчатых насосах дозаторные устройства размеще-

ны только в выхлопной ступени и общее отношение давления в них изменяется незначительно.

Для снижения давления всасывания целесообразно также использовать газобалластные устройства при откачке газов, не конденсирующихся при рабочих условиях в насосе, но способных растворяться в рабочем масле.

### 9.6.3. Рабочие жидкости для механических вакуумных насосов

Применение рабочих жидкостей в механических вакуумных насосах с масляным уплотнением обусловлено необходимостью увеличения степени герметичности рабочих камер, уменьшения потерь производительности из-за влияния мертвого объема и потерь мощности на трение, снижения температуры пар трения и, следовательно, интенсивности их изнашивания.

Однако наличие рабочей жидкости в камере насоса отрицательно влияет на его откачные характеристики и прежде всего на предельное остаточное давление. В связи с этим в качестве рабочих жидкостей применяют специальные вакуумные масла, к которым предъявляют следующие требования:

- сравнительно низкое давление насыщенного пара при рабочей температуре во внутренней полости насоса;
- достаточная вязкость, обеспечивающая сравнительно равномерное покрытие поверхности при длительной работе насоса в соответствующих температурных режимах;
- малая склонность к окислению;

- достаточная термическая стойкость;
- небольшая пенистость и токсичность;
- отсутствие химического взаимодействия с конструкционными материалами насоса.

С учетом этих требований отечественной промышленностью освоено производство для механических вакуумных насосов вакуумных масел ВМ-1С (ТУ 38.10111187–88), ВМ-4 и ВМ-6 (ТУ 38.401-58-3–90), характеристики которых приведены в табл. 9.15.

Вакуумные масла получают из малосернистой беспарафинистой нефти путем глубокой очистки с применением вакуумной дистилляции и из синтетических жидкостей.

Минеральные вакуумные масла ВМ-4 и ВМ-6 имеют давление пара  $5,3 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^{-3}$  Н/м<sup>2</sup> ( $4 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.) при температуре 293 К.

## 9.7. ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН) широко применяют для откачки газов в электротехнической, электронной, атомной, авиационной, химической и других отраслях промышленности.

По сравнению с другими высоковакуумными средствами откачки ТМН обладают следующими преимуществами:

- удаляют газ из сосуда, а не сорбируют его на рабочих органах, как крионасосы, электрофизические насосы различного типа, адсорбционные насосы;

### 9.15. Характеристика вакуумных масел

Марка масла	Технические условия	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	Температура вспышки, °С	Цвет, ед. ЦНТ
ВМ-1С	ТУ 38.10111187–88	≥ 35	В открытом тигле ≥ 243	Бесцветное
ВМ-4	ТУ 38.401-58-3–90	48...57	В закрытом тигле ≥ 205	≤ 7
ВМ-6		≥ 40	В открытом тигле ≥ 216	≤ 4,5



— не загрязняют среду откачиваемого сосуда парами углеводородов или другими рабочими веществами, как диффузионные насосы, насосы с распылением титана и др.;

— отличаются большой быстротой действия при откачке газов с малой молекулярной массой, обычно трудно удаляемых из вакуумных установок.

Эти преимущества ТМН определяют области их применения: создание и поддержание остаточного давления в пределах  $10^{-7} \dots 10^{-10}$  Па при откачке сосудов, для которых недопустимо загрязнение сред парами углеводородов и другими рабочими веществами; откачка неконденсирующихся газов ( $H_2$ , He, Ne) в высоковакуумных системах.

Конструктивная схема двухпоточного ТМН, предложенного Беккером, приведена на рис. 9.70, а. В корпусе 2 с неподвижными статорными дисками 4 вращается ротор 1, представляющий собой вал с рабочими колесами 3. Последние выполняют либо в виде дисков с выфрезерованными косыми радиальными пазами, либо в форме лопаточных колес (лопатки устанавливаются под определенным углом к торцевой поверхности втулки).

В первом случае в статорных колесах пазы располагают зеркально по отношению к пазам роторных колес (рис. 9.70, б). Во втором случае статорные колеса изготавливают с лопатками, установленными зеркально по отношению к лопаткам рабочего колеса под тем же углом. Для удобства

монтажа статорные колеса обычно выполняют разрезными по диаметру.

Ротор насоса установлен на подшипниках качения. Всасывающий патрубок расположен в средней части корпуса. Нагнетательные полости, размещенные по торцам корпуса насоса, объединены общим патрубком, к которому подсоединен форвакуумный насос.

Распространены ТМН с вертикальным расположением вала (рис. 9.70, в), в которых уменьшено сопротивление на всасывании. Иногда для установки ротора используют магнитную подвеску или газовые подшипники.

Насос приводится в действие от электродвигателя через мультипликатор либо от высокооборотного электродвигателя, ротор которого расположен на валу ТМН.

ТМН работают последовательно с форвакуумными насосами, создающими предельное остаточное давление, как правило,  $1,0 \dots 10^{-1}$  Па. Для исключения возможности проникновения паров углеводородов из рабочих полостей форвакуумных насосов в полость ТМН, что особенно вероятно при останове агрегата, целесообразнее создание высоковакуумных механических насосов с комбинированной проточной частью на останове ТМН (рис. 9.70, г). В этом случае в качестве форвакуумных можно использовать молекулярные ступени 5 в сочетании с вихревыми или динамического действия. Систему сопел ступени динамического действия образуют рабочий вращающийся диск 6 и профилированные статорные элементы 7.

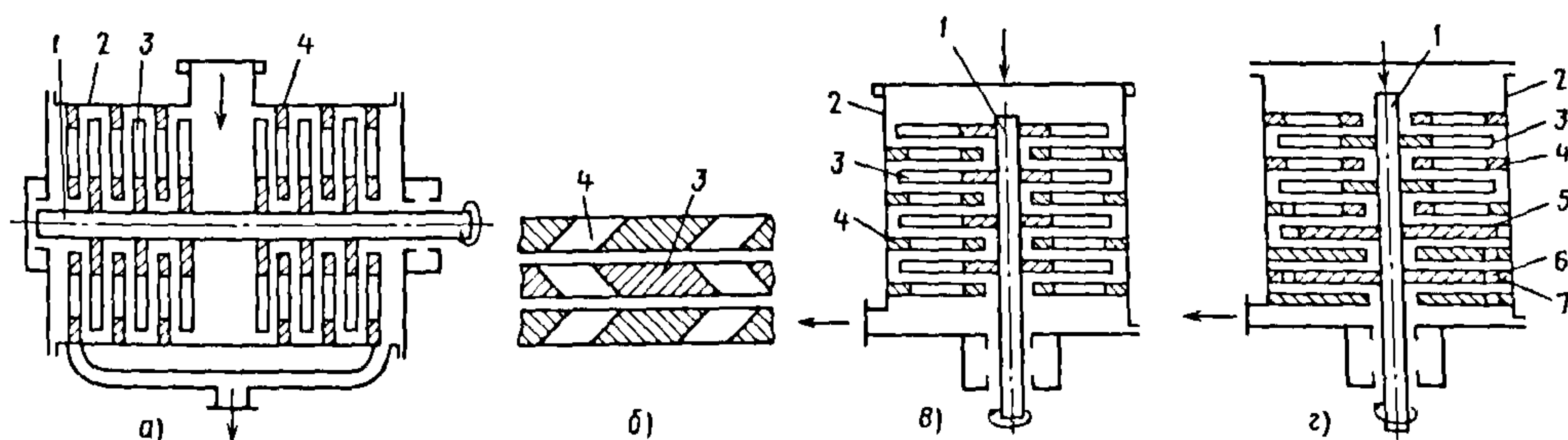


Рис. 9.70. Конструктивные схемы ТМН

Технические характеристики ТМН венной промышленностью, приведены в (рис. 9.71, 9.72), выпускаемых отечест- табл. 9.16.

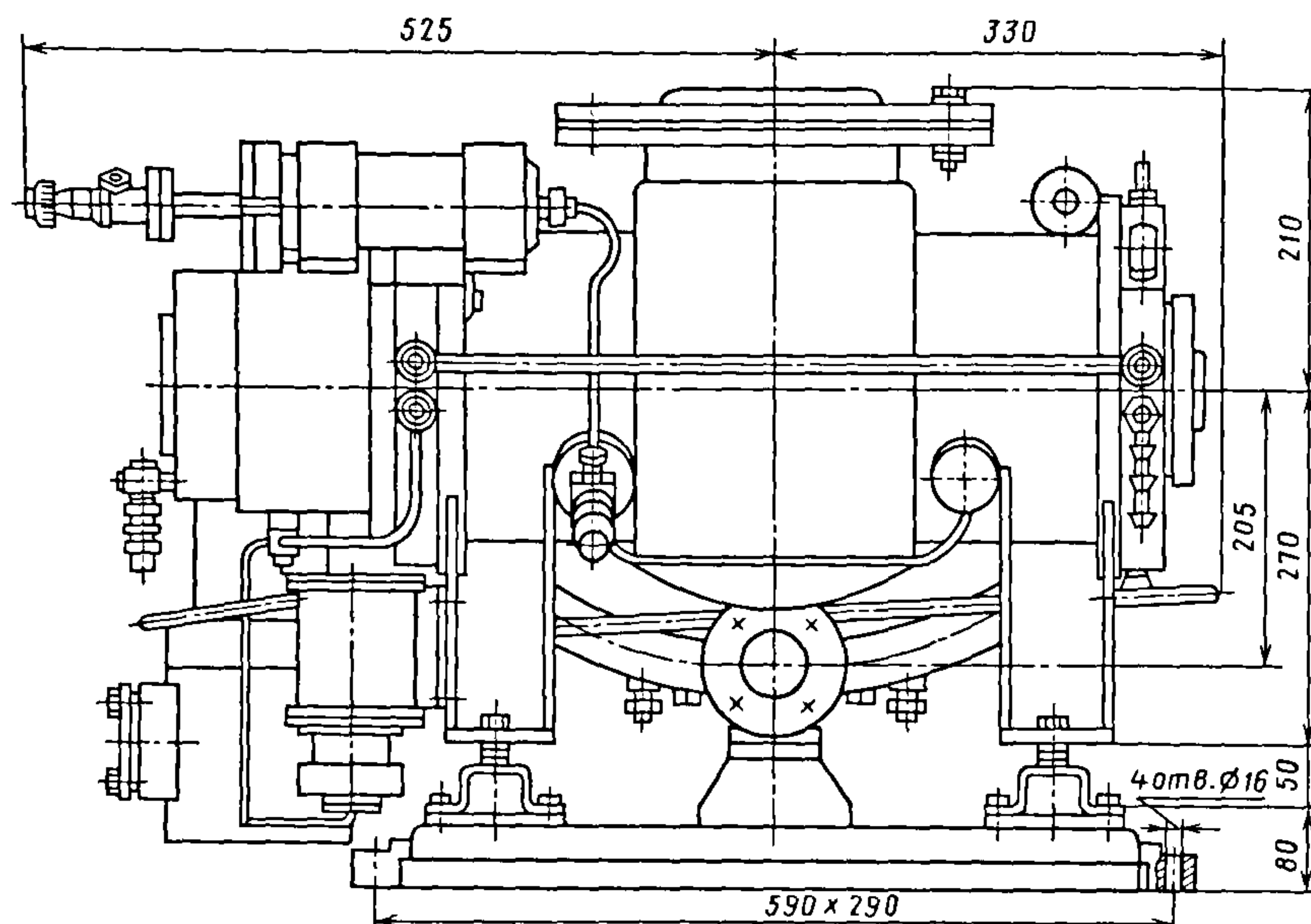


Рис. 9.71. Насос ТМН-500

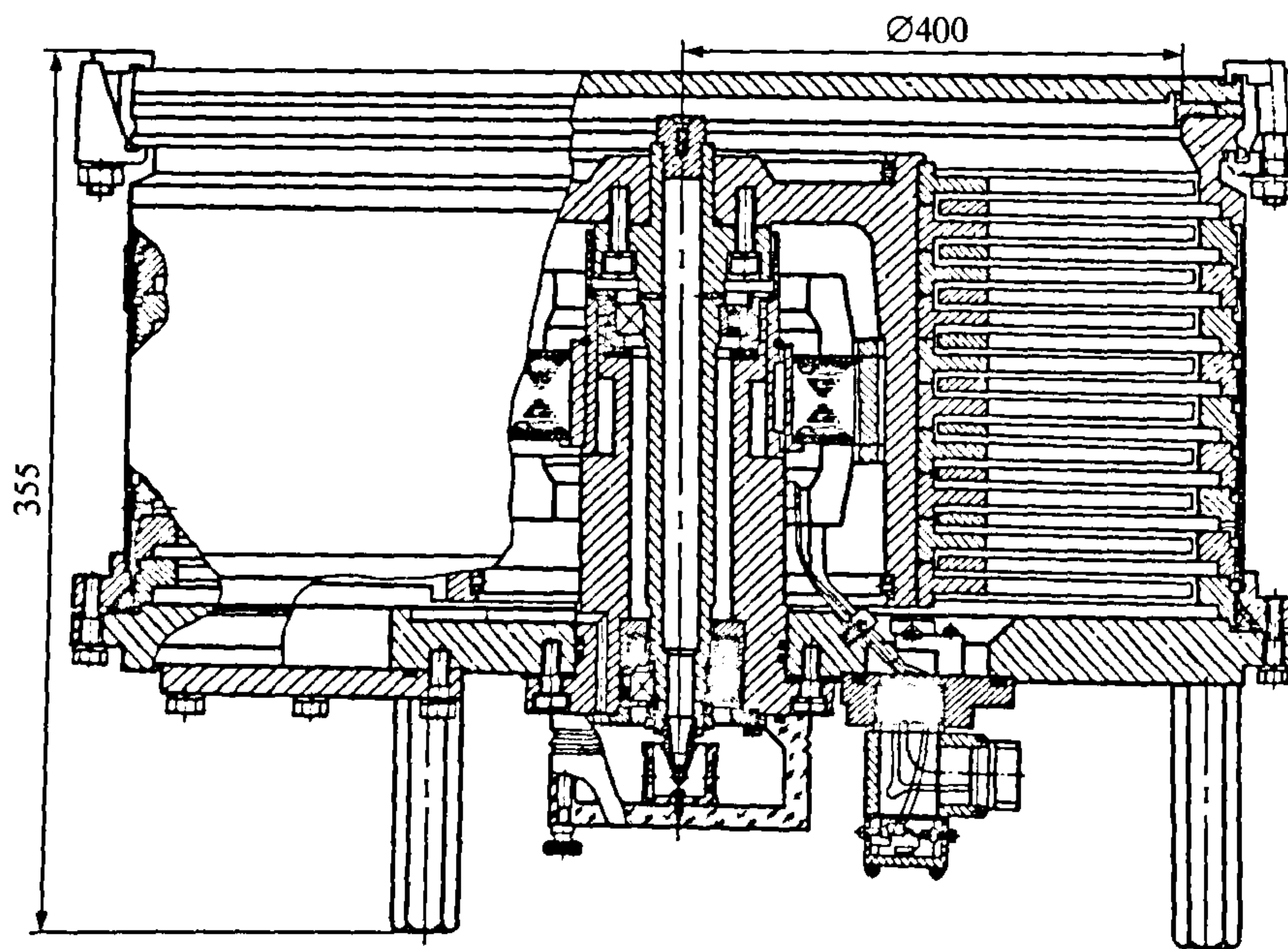


Рис. 9.72. Насос НВТ-3500



9.16. Технические характеристики ТМН отечественного производства

Параметр	Фирма											
	ООО «Призма» (г. Искитим)				ЦКБМ (г. Санкт-Петербург)							ОАО "Измеритель" (г. Санкт-Петербург)
	НВТ-100-041	НВТ-450-01	НВТ-1000-029	01 АБ-1500-004	ВВ-50	ВВ-150	ВВ-500	ТМНГ-5000	ТМНГ-10000	ТМН-150/63		
Быстродействие насоса, л/с:	100	400	1000	720								
		—			50	150	500	5000	10000	150		
Предельное остаточное давление, Па		$1,0 \cdot 10^{-5}$		$6,6 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$			$1,3 \cdot 10^{-6}$	
Максимальная потребляемая мощность, Вт	100	1200	1500		30		400				200	
Охлаждение	Без притудительного	Водяное	Водяное	Водяное/воздушное	Воздушное	Водяное					Воздушное	
					—				Масляная			
Вид смазки	Консистентная			Масляная								
Высоковязный фланец с $D_y$ , мм	100	160	250	63	100	200	400	750			150	
Масса, кг	5,5	25	30	2,7	6	32	415	960			3,5	

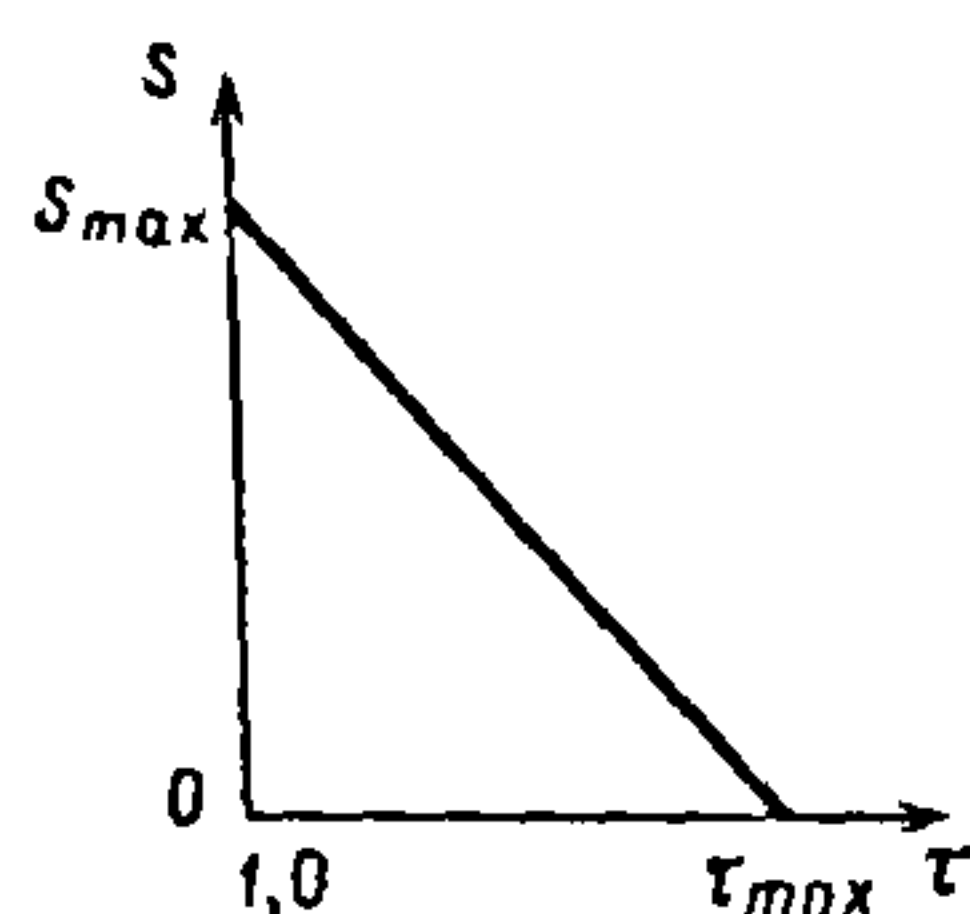


Рис. 9.73. Откачная характеристика рабочего колеса ТМН

Технические характеристики ТМН (рис. 9.7.1 и 9.7.2), выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 9.16.

В ТМН допускаются сравнительно большие осевые и радиальные зазоры — до 1,0...2,5 мм в зависимости от размеров рабочих колес.

Данные масс-спектрометрических измерений парциального давления в откачиваемом сосуде и экспериментальные сведения, полученные при стендовых испытаниях ТМН и в реальных условиях на откачных постах, свидетельствуют о высоких эксплуатационных характеристиках ТМН и, в частности, обеспечении безмасляной откачки. При эксплуатации ТМН, особенно при останове и последующем пуске, для обеспечения чистоты вакуума необходимо соблюдать некоторые меры, заключающиеся в предотвращении проникновения паров углеводородов через остановленный насос в откачиваемый сосуд.

Миграцию паров масла форвакуумного насоса удастся предотвратить напуском во всасывающую полость ТМН осушенного воздуха. Через несколько минут после включения, когда вращающийся ротор насоса препятствует проникновению паров углеводородов во всасывающую полость насоса, открывается клапан, установленный на трубопроводе, соединяющем форвакуумный насос с ТМН. После достижения номинальной частоты вращения ротора всасывающая полость насоса соединяется с откачиваемым объемом.

Ресурс ТМН с подшипниками качения определяется ресурсом подшипников, который составляет (в зависимости от материала и формы сепараторов, класса точности их изготовления и конструктивного исполнения насоса в целом) 10 000...30 000 ч и более.

**Теория ТМН.** Откачная характеристика (зависимость быстроты действия от отношения давления) ТМН определяется прежде всего откачными характеристиками рабочих колес, зависящими от двух основных параметров: 1) максимальной быстроты откачки  $S_{\max}$  при отношении значения давления на колесе, равном 1; 2) максимального значения отношения давления  $\tau_{\max}$  при скорости откачки, равной нулю (рис. 9.73).

Теоретические зависимости максимальной вероятности перехода через межлопаточный канал рабочего колеса и создаваемого им максимального отношения давлений от геометрических характеристик межлопаточных каналов или пазов (рис. 9.74) получены на основании теоретических моделей перехода молекул газа через колесо с учетом законов взаимодействия их со стенками межлопаточных каналов.

Принцип перехода молекул газа через вращающееся рабочее колесо основан на различии сопротивлений межлопаточных каналов, образованных двумя соседними лопатками или стенками выфрезерованного паза, для потока молекул в прямом и обратном направлениях.

Вероятность перехода молекул газа на противоположную сторону рабочего колеса определяется числом молекул, перешедших на нее, по отношению к общему числу молекул, поступивших на вход в межлопаточные каналы колеса, и зависит от геометрии канала, окружной скорости колеса, скорости теплового движения молекул, а также от закона взаимодействия молекул со стенками межлопаточных каналов. В установившемся режиме при равенстве температур газа и неизменности функций распределения молекул по их тепловым скоростям на сторонах пониженного I—I и повышенного II—II давления (см. рис. 9.75) число молекул, переходящих через вращающееся рабочее колесо, можно выразить уравнением

$$F_I \cdot 0,25 N_I v_a K = \\ = 0,25 N_I v_a K_I F_I - 0,25 N_{II} v_a K_{II} F_2, \quad (9.85)$$



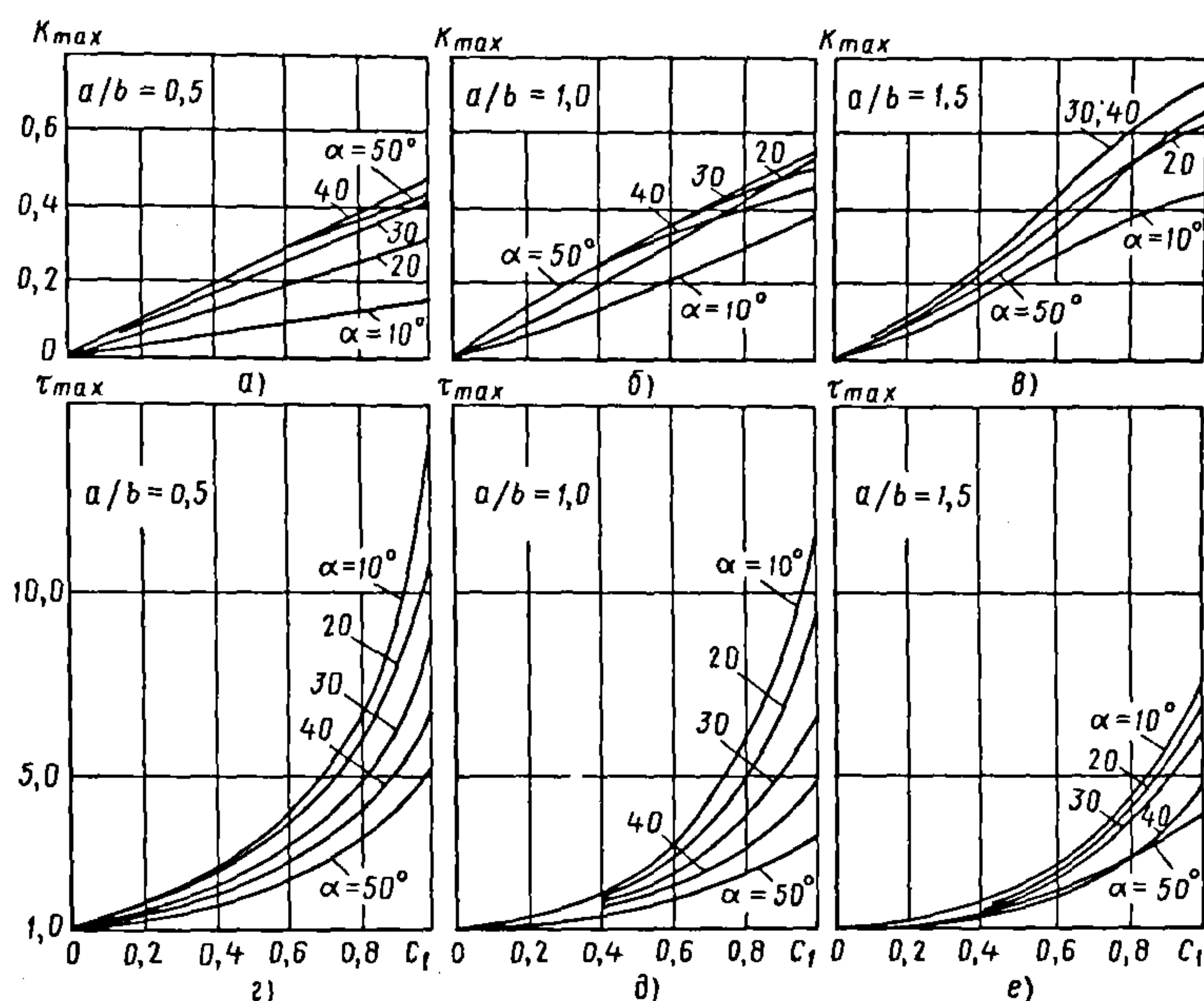


Рис. 9.74. Зависимость максимальной вероятности  $K_{\max}$  (а и б) и максимального отношения давлений  $\tau_{\max}$  (г–е) от относительной скорости  $c_1$  при различных значениях  $\alpha$  и  $a/b$

где  $N_I$  и  $N_{II}$  – концентрации молекул газа на стороне соответственно пониженного или повышенного давления;  $v_a$  – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул;  $K$  – результирующая вероятность перехода молекул через межлопаточные каналы рабочего колеса;  $K_I$  и  $K_{II}$  – вероятности перехода молекул со стороны соответственно пониженного и повышенного давления;  $F_1$  – суммарная площадь входного сечения межлопаточных каналов со стороны всасывания;  $F_2$  – то же, со стороны нагнетания.

Значения вероятностей  $K$ ,  $K_I$  и  $K_{II}$  для данного радиального сечения межлопаточных каналов или пазов постоянны и не зависят от концентрации молекул или давления. Поток молекул газа [см. формулу (9.85)], переходящих через рабочее колесо, соответствует его быстроте действия:

$$S = 0,25 N_I v_a K F_1 / N_I = 0,25 v_a K F_1 = 36,4 F K \sqrt{\frac{T}{M}},$$

где  $T$  – температура газа,  $K$ ;  $M$  – молекулярная масса.

Для каналов с параллельными стенками уравнение (9.85) может быть представлено в виде

$$K = K_I - K_{II} \tau, \quad (9.86)$$

где  $\tau = N_{II}/N_I$  – отношение концентраций (давлений).

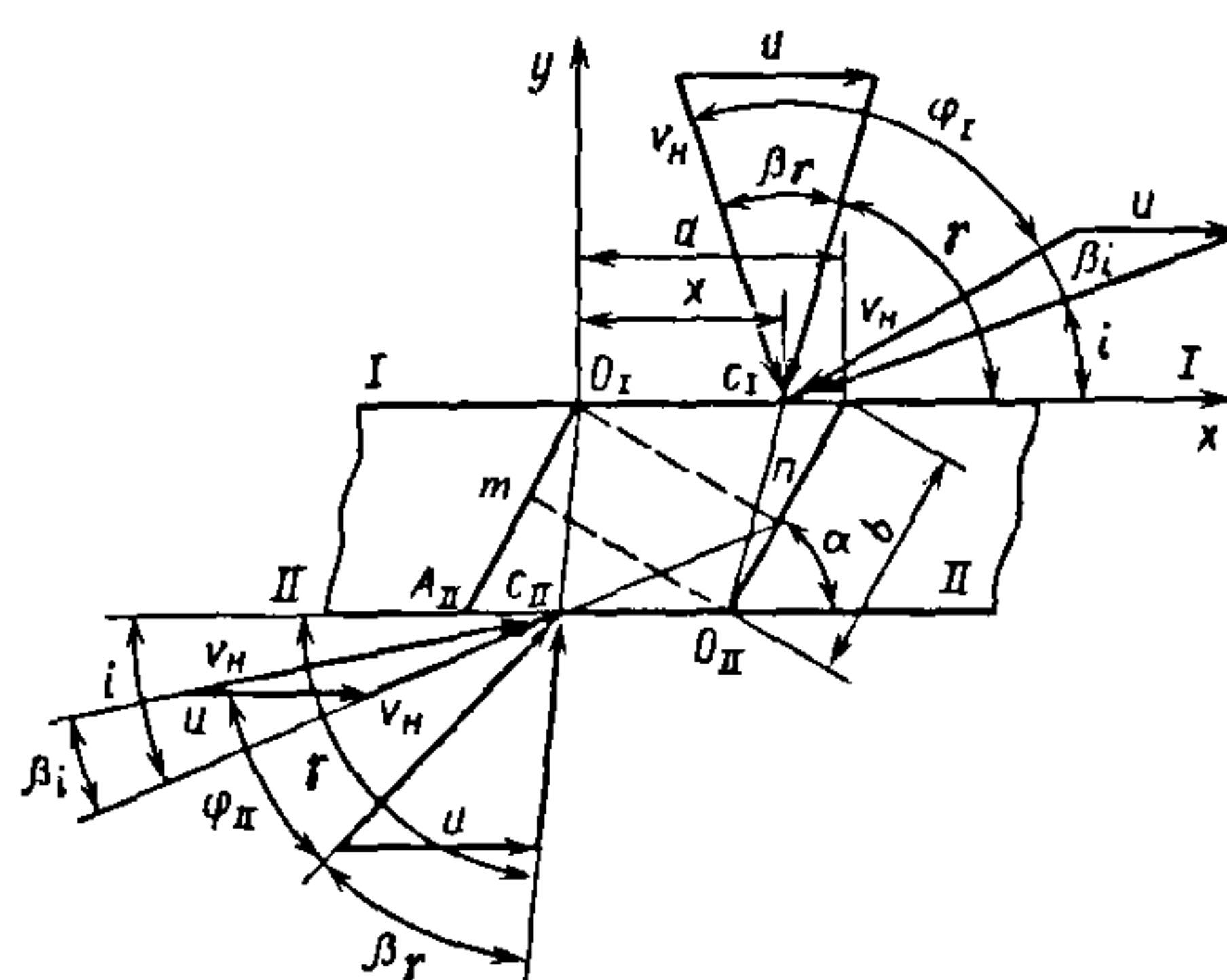


Рис. 9.75. Теоретическая модель перехода молекул газа через межлопаточные каналы рабочего колеса при постоянстве их скорости и отражения от поверхности каналов в преимущественном направлении

Анализ уравнения (9.86) показывает линейность зависимости текущего значения  $K$ , а следовательно, и скорости откачки  $S$  рабочего колеса от отношения давлений.

Максимальное значение  $K_{\max}$ , пропорциональное максимальной скорости откачки  $S_{\max}$ , м<sup>3</sup>/с, соответствует отношению давлений на рабочем колесе  $\tau = 1,0$ ,

$$K_{\max} = K_I - K_{II}, \quad (9.87)$$

$$S_{\max} = 36,4 K_{\max} F \sqrt{T/M}, \quad (9.88)$$

где  $F$  — суммарная площадь входного сечения межлопаточных каналов рабочего колеса, м<sup>2</sup>.

Максимальное отношение давлений при  $S = 0$

$$\tau_{\max} = K_I / K_{II}. \quad (9.89)$$

Таким образом, для получения откачной характеристики рабочего колеса ТМН (см. рис. 9.73) необходимо определить два основных параметра:  $S_{\max}$  (или  $K_{\max}$ ) и  $\tau_{\max}$ .

Обычно при построении теоретической модели процесса перехода молекул через межлопаточные каналы рабочего колеса с целью определения основных параметров откачной характеристики принимают следующие допущения:

— режим течения газа в рабочей полости насоса молекулярный;

— распределение молекул по скоростям по обе стороны от рабочего колеса соответствует закону Максвелла;

— движение молекул в канале рабочего колеса (т.е. в плоскостях, перпендикулярных к торцовым поверхностям колес) двумерное;

— температуры газа и внутренних поверхностей насоса в процессе откачки постоянны;

— взаимодействие молекул газа со стенками межлопаточного канала или паза при переходе на противоположные стороны рабочего колеса подчиняется диффузному, зеркальному или обоим законам одновременно.

Геометрическая структура межлопаточного канала (рис. 9.76) характеризуется углом  $\alpha$  установки лопатки или наклона паза и соотношением ширины  $a$  канала к его длине  $b$ . Значения результирующей вероятности  $K_{\max}$  молекул газа через межлопаточные каналы, имеющие различные геометрические параметры  $\alpha$  и  $a/b$  при разных отношениях  $c_1 = u/v_n$  скорости движения канала к наиболее вероятному значению тепловой скорости  $v_n$ , в предположении диффузного отражения молекул от поверхности лопаток или стенок пазов приведены в табл. 9.17 [79].

Результирующая вероятность перехода молекул газа через межлопаточные каналы или пазы с одной стороны рабочего колеса на другую можно определить с помощью теоретической модели, в которой взаимодействие молекул со стенками канала или паза подчиняется диффузному ( $K_{\max N}$ ) и зеркальному ( $K_{\max Z}$ ) законам одновременно:

$$K_{\max} = \sigma_n K_{\max N} + (1 - \sigma_n) K_{\max Z}, \quad (9.90)$$

где  $\sigma_n$  — коэффициент, учитывающий число молекул, переходящих через межлопаточный канал и отражаемых поверхностью стенок канала или паза в преимущественном направлении (за направление отражения молекул газа принимают наименее вероятное направление диффузного закона, совпадающее с нормалью к поверхности стенок межлопаточного канала);

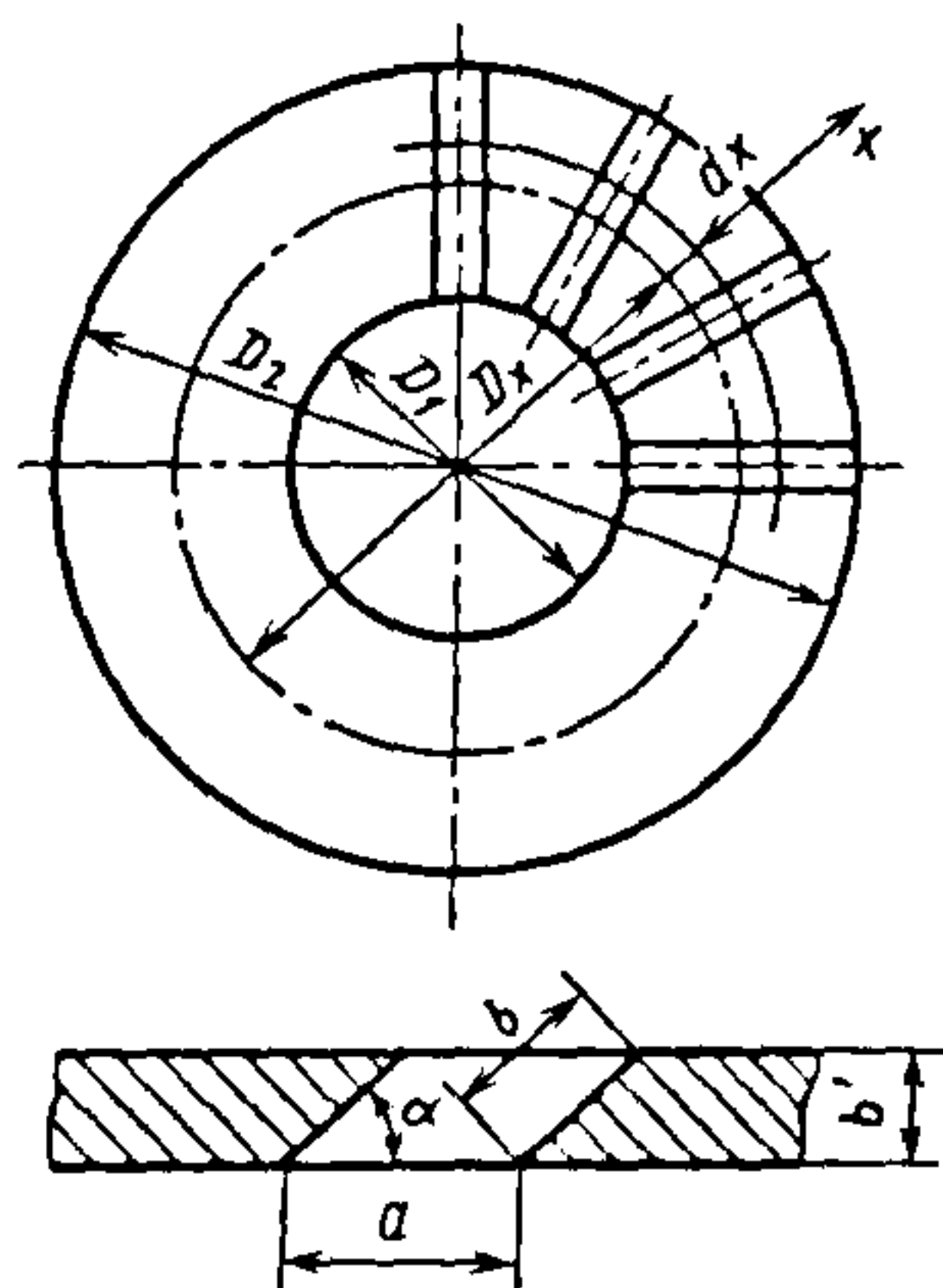


Рис. 9.76. Схема к расчету дискового рабочего колеса



9.17. Значения вероятностей перехода через межлопаточный канал и максимального отношения давлений

Показатель	$\alpha, ^\circ$	$c_1$	Значение показателя при $a/b$								
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$K_I$	10	0,2	0,0565	0,0831	0,1171	0,1714	0,2634	0,3557	0,4314	0,4922	0,5416
$K_{II}$			0,0344	0,0515	0,0738	0,1104	0,1908	0,2855	0,3668	0,4332	0,4877
$K_{\max}$			0,0221	0,0316	0,0433	0,0610	0,0725	0,0702	0,0645	0,0590	0,0538
$\tau_{\max}$			1,6410	1,6150	1,5880	1,5520	1,3800	1,2460	1,1760	1,1360	1,1100
$K_I$	10	0,4	0,0715	0,1042	0,1452	0,2081	0,3024	0,3917	0,4638	0,5215	0,5682
$K_{II}$			0,0269	0,0405	0,0584	0,0872	0,1589	0,2525	0,3355	0,4043	0,4611
$K_{\max}$			0,0446	0,0637	0,0868	0,1209	0,1435	0,1392	0,1283	0,1173	0,1072
$\tau_{\max}$			2,6560	2,5720	2,4880	2,3860	1,9030	1,5510	1,3820	1,2900	1,2330
$K_I$	10	0,6	0,0893	0,1288	0,1772	0,2477	0,3420	0,4275	0,4959	0,5506	0,5944
$K_{II}$			0,0213	0,0323	0,0465	0,0689	0,1305	0,2214	0,3054	0,3760	0,4348
$K_{\max}$			0,0680	0,0965	0,1305	0,1788	0,2115	0,2061	0,1905	0,1743	0,1596
$\tau_{\max}$			4,1840	3,9860	3,8030	3,5950	2,6200	1,9310	1,6240	1,4610	1,3670
$K_I$	10	0,8	0,1097	0,1565	0,2124	0,2891	0,3815	0,4628	0,5272	0,5784	0,6199
$K_{II}$			0,0173	0,0263	0,0379	0,0550	0,1062	0,1928	0,2768	0,3488	0,4092
$K_{\max}$			0,0924	0,1302	0,1746	0,2342	0,2754	0,2700	0,2504	0,2297	0,2107
$\tau_{\max}$			6,3440	5,9480	5,6110	5,2620	3,5940	2,4010	1,9050	1,6590	1,5150
$K_I$	10	1,0	0,1324	0,1868	0,2501	0,3311	0,4204	0,4971	0,5575	0,6056	0,6445
$K_{II}$			0,0144	0,0220	0,0315	0,0447	0,0858	0,1667	0,2498	0,3226	0,3844
$K_{\max}$			0,1179	0,1648	0,2185	0,2865	0,3346	0,3304	0,3078	0,2830	0,2601
$\tau_{\max}$			9,1830	8,4920	7,9370	7,4140	4,9000	2,9820	2,2320	1,8770	1,6770
$K_I$	10	1,2	0,1570	0,2192	0,2893	0,3728	0,4582	0,5301	0,5868	0,6317	0,6680
$K_{II}$			0,0124	0,0189	0,0269	0,0373	0,0693	0,1434	0,2247	0,2978	0,3605
$K_{\max}$			0,1446	0,2002	0,2623	0,3356	0,3889	0,3868	0,3621	0,3339	0,3076
$\tau_{\max}$			12,6500	11,5800	10,7400	10,0100	6,6100	3,7000	2,6120	2,1220	1,8530
$K_I$	10	1,4	0,1831	0,2529	0,3291	0,4135	0,4945	0,5619	0,6148	0,6567	0,6906
$K_{II}$			0,0110	0,0167	0,0237	0,0320	0,0562	0,1228	0,2014	0,2742	0,3376
$K_{\max}$			0,1721	0,2362	0,3054	0,3815	0,4383	0,4391	0,4134	0,3825	0,3530
$\tau_{\max}$			16,6300	15,1100	13,9100	12,9300	8,7990	4,5770	3,0530	2,3950	2,0460

Продолжение табл. 9.17

Показатель	$\alpha, ^\circ$	$c_1$	Значение показателя при $a/b$								
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$K_I$	10	1,6	0,2103	0,2875	0,3687	0,4527	0,5291	0,5921	0,6414	0,6687	0,7120
$K_{II}$			0,0100	0,0152	0,0213	0,0282	0,0461	0,1047	0,1800	0,2630	0,3157
$K_{max}$			0,2002	0,2723	0,3474	0,4245	0,4830	0,4873	0,4614	0,4058	0,3963
$\tau_{max}$			20,9800	18,9700	17,3500	16,0500	11,4800	5,6530	3,5630	2,5430	2,2550
$K_I$		0,2	0,1509	0,2042	0,2578	0,3181	0,3850	0,4519	0,5097	0,5578	0,5983
$K_{II}$			0,0958	0,1327	0,1706	0,2158	0,2750	0,3426	0,4058	0,4611	0,5084
$K_{max}$			0,0551	0,0716	0,0872	0,1023	0,1104	0,1092	0,1035	0,0967	0,0899
$\tau_{max}$			1,5750	1,4500	1,5110	1,4740	1,4000	1,3190	1,2550	1,2100	1,1770
$K_I$		0,4	0,1862	0,2490	0,3105	0,3765	0,4449	0,5076	0,5609	0,6051	0,6417
$K_{II}$			0,0763	0,1065	0,1378	0,1750	0,2278	0,2924	0,3563	0,4169	0,4638
$K_{max}$			0,1100	0,1425	0,1728	0,2015	0,2171	0,2153	0,2045	0,1912	0,1779
$\tau_{max}$			2,4420	2,3370	2,2540	2,1510	1,9530	1,7360	1,5740	1,4620	1,3840
$K_I$		0,6	0,2259	0,2983	0,3671	0,4367	0,5036	0,5621	0,6160	0,6504	0,5832
$K_{II}$			0,0614	0,0864	0,1120	0,1419	0,1866	0,2467	0,3100	0,3687	0,4206
$K_{max}$			0,1644	0,2119	0,2551	0,2948	0,3170	0,3154	0,3007	0,2817	0,2626
$\tau_{max}$			3,6770	3,4520	3,2770	3,0780	2,6990	2,2780	1,9700	1,7640	1,6240
$K_I$		0,8	0,2685	0,3503	0,4253	0,4965	0,5604	0,6139	0,6575	0,6930	0,7221
$K_{II}$			0,0505	0,0714	0,0925	0,1162	0,1525	0,2065	0,2675	0,3263	0,3795
$K_{max}$			0,2180	0,2789	0,3328	0,3804	0,4078	0,4073	0,3900	0,3667	0,3426
$\tau_{max}$			5,3140	4,9070	4,5970	4,2750	3,6730	2,9720	2,4580	2,1240	1,9030
$K_I$		1,0	0,3125	0,4030	0,4828	0,5539	0,6136	0,6620	0,7009	0,7329	0,7578
$K_{II}$			0,0427	0,0604	0,0782	0,0969	0,1254	0,1223	0,2295	0,2873	0,3409
$K_{max}$			0,2698	0,3425	0,4047	0,4571	0,4882	0,4897	0,4713	0,4449	0,4169
$\tau_{max}$			7,3170	6,6670	6,1770	5,7180	4,8940	3,8420	3,0540	2,5490	2,2230
$K_I$		1,2	0,3563	0,4544	0,5375	0,6070	0,6624	0,7059	0,7402	0,7677	0,7901
$K_{II}$			0,0372	0,0526	0,0678	0,0828	0,1045	0,1438	0,1962	0,2519	0,3051
$K_{max}$			0,3191	0,4018	0,4697	0,5242	0,5579	0,5620	0,5440	0,5159	0,4850
$\tau_{max}$			9,5810	8,6370	7,9320	7,3330	6,3400	4,9080	3,7720	3,0430	2,5900



Продолжение табл. 9.17

Показатель	$\alpha, ^\circ$	$c_t$	Значение показателя при $a/b$									
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
$K_I$	20	1,4	0,3982	0,5027	0,5877	0,6550	0,7061	0,7451	0,7754	0,7994	0,8189	
$K_{II}$			0,0333	0,0470	0,0603	0,0727	0,0889	0,1208	0,1676	0,2202	0,2722	
$K_{max}$			0,3650	0,4557	0,5274	0,5823	0,6172	0,6243	0,6077	0,5792	0,5467	
$\tau_{max}$			11,9600	10,6900	9,7500	9,0130	7,9450	6,1670	4,6250	3,6300	3,0080	
$K_I$	20	1,6	0,4369	0,5464	0,6323	0,6972	0,7445	0,7796	0,8065	0,8274	0,8320	
$K_{II}$			0,0305	0,0430	0,0548	0,0654	0,0775	0,1026	0,1435	0,1924	0,2570	
$K_{max}$			0,4064	0,5034	0,5774	0,6318	0,6671	0,6770	0,6629	0,6350	0,5750	
$\tau_{max}$			14,3200	12,7200	11,5310	10,6600	9,6110	7,5980	5,6210	4,3020	3,2370	
$K_I$	30	0,2	0,2493	0,3194	0,3810	0,4392	0,4945	0,5448	0,5888	0,6264	0,6585	
$K_{II}$			0,1672	0,2191	0,2664	0,3142	0,3654	0,4176	0,4669	0,5112	0,5502	
$K_{max}$			0,0821	0,1003	0,1146	0,1250	0,1291	0,1272	0,1219	0,1152	0,1083	
$\tau_{max}$			1,4910	1,4590	1,4300	1,3980	1,3530	1,3050	1,2610	1,2250	1,1970	
$K_I$	30	0,4	0,2978	0,3771	0,4449	0,5058	0,5602	0,6074	0,6473	0,6808	0,7090	
$K_{II}$			0,1361	0,1800	0,2202	0,2614	0,3078	0,3581	0,4079	0,4542	0,4957	
$K_{max}$			0,1617	0,1972	0,2247	0,2444	0,2524	0,2493	0,2394	0,2266	0,2133	
$\tau_{max}$			2,1880	2,0960	2,0200	1,9350	1,8200	1,6960	1,5870	1,4990	1,4300	
$K_I$	30	0,6	0,3483	0,4363	0,5088	0,5707	0,6228	0,6660	0,7015	0,7309	0,7552	
$K_{II}$			0,1117	0,1488	0,1827	0,2172	0,2575	0,3042	0,3529	0,3999	0,4430	
$K_{max}$			0,2366	0,2874	0,3261	0,3534	0,3653	0,3618	0,3486	0,3310	0,3120	
$\tau_{max}$			3,1190	2,9310	2,7840	2,6270	2,4180	2,1890	1,9880	1,8280	1,7050	
$K_I$	30	0,8	0,3979	0,4934	0,5693	0,6307	0,6798	0,7187	0,7500	0,7753	0,7962	
$K_{II}$			0,0933	0,1250	0,1536	0,1819	0,2157	0,2573	0,3034	0,3496	0,3934	
$K_{max}$			0,3046	0,3684	0,4157	0,4488	0,4641	0,4615	0,4466	0,4257	0,4027	
$\tau_{max}$			4,2650	3,9470	3,7060	3,4670	3,1520	2,7940	2,4720	2,2180	2,0240	

Продолжение табл. 9.17

Показатель	$\alpha, ^\circ$	$c_1$	Значение показателя при $a/b$								
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$K_I$	30	1,0	0,4437	0,5454	0,6233	0,6835	0,7293	0,7643	0,7916	0,8134	0,8312
$K_{II}$			0,0799	0,1073	0,1317	0,1549	0,1822	0,2179	0,2600	0,3044	0,3478
$K_{max}$			0,3638	0,4380	0,4916	0,5286	0,5471	0,5464	0,5316	0,5090	0,4834
$\tau_{max}$			5,5530	5,0810	4,7320	4,4130	4,0020	3,5080	3,0440	2,6720	2,3900
$K_I$		1,2	0,4831	0,5896	0,6688	0,7276	0,7704	0,8021	0,8262	0,8451	0,8602
$K_{II}$			0,0703	0,0946	0,1157	0,1348	0,1564	0,1859	0,2233	0,2647	0,3066
$K_{max}$			0,4128	0,4951	0,5531	0,5927	0,6140	0,6162	0,6029	0,5804	0,5536
$\tau_{max}$			6,8700	6,2360	5,7800	5,3960	4,9250	4,3140	3,7000	3,1930	2,8050
$K_I$		1,4	0,5143	0,6245	0,7046	0,7623	0,8030	0,8321	0,8537	0,8703	0,8834
$K_{II}$			0,0635	0,0854	0,1042	0,1203	0,1372	0,1608	0,1928	0,2305	0,2702
$K_{max}$			0,4508	0,5392	0,6005	0,6420	0,6658	0,6713	0,6609	0,6398	0,6132
$\tau_{max}$			8,0950	7,3170	6,7650	6,3390	5,8530	5,1740	4,4270	3,7760	3,2690
$K_I$		1,6	0,5362	0,6494	0,7306	0,7880	0,8275	0,8549	0,8747	0,8896	0,9012
$K_{II}$			0,0587	0,0787	0,0958	0,1097	0,1231	0,1416	0,1682	0,2016	0,2385
$K_{max}$			0,4775	0,5707	0,6348	0,6782	0,7044	0,7134	0,7065	0,6888	0,6628
$\tau_{max}$			9,1380	8,2500	7,6290	7,1800	6,7200	6,0390	5,1990	4,4120	3,7790
$K_I$	40	0,2	0,3369	0,4165	0,4804	0,5348	0,5820	0,6228	0,6578	0,6877	0,7133
$K_{II}$			0,2401	0,3030	0,3558	0,4040	0,4500	0,4935	0,5336	0,5696	0,6016
$K_{max}$			0,0968	0,1135	0,1247	0,1308	0,1320	0,1293	0,1242	0,1181	0,1117
$\tau_{max}$			1,4030	1,3750	1,3500	1,3240	1,2930	1,2620	1,2330	1,2070	1,1860
$K_I$		0,4	0,3883	0,4754	0,5433	0,5986	0,6444	0,6823	0,7139	0,7404	0,7624
$K_{II}$			0,2001	0,2550	0,3014	0,3446	0,3877	0,4303	0,4712	0,5090	0,5443
$K_{max}$			0,1882	0,2205	0,2419	0,2540	0,2567	0,2520	0,2427	0,2312	0,2191
$\tau_{max}$			1,9400	1,8650	1,8030	1,7370	1,6620	1,5860	1,5150	1,4540	1,4030



Окончание табл. 9.17

Показатель	$\alpha, ^\circ$	$c_1$	Значение показателя при $a/b$								
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$K_I$	40	0,6	0,4366	0,5302	0,6009	0,6561	0,6997	0,7345	0,7626	0,7856	0,8047
$K_{II}$			0,1675	0,2151	0,2554	0,2931	0,3318	0,3721	0,4123	0,4508	0,4865
$K_{max}$			0,2691	0,3151	0,3459	0,3630	0,3679	0,3625	0,3503	0,3349	0,3182
$\tau_{max}$			2,6070	2,4650	2,3530	2,2380	2,1090	1,9740	1,8500	1,7430	1,6540
$K_I$	40	0,8	0,4781	0,5769	0,6495	0,7041	0,7456	0,7775	0,8026	0,8227	0,8391
$K_{II}$			0,1421	0,1836	0,2184	0,2507	0,2843	0,3207	0,3589	0,3968	0,4330
$K_{max}$			0,3360	0,3933	0,4311	0,4535	0,4614	0,4568	0,4437	0,4259	0,4061
$\tau_{max}$			3,3640	3,1420	2,9730	2,8090	2,6230	2,4240	2,2360	2,0730	1,9380
$K_I$	40	1,0	0,5099	0,6128	0,6868	0,7409	0,7807	0,8104	0,8331	0,8510	0,8654
$K_{II}$			0,1232	0,1597	0,1900	0,2172	0,2455	0,2774	0,3123	0,3484	0,3840
$K_{max}$			0,3867	0,4530	0,4968	0,5237	0,5352	0,5330	0,5208	0,5026	0,4814
$\tau_{max}$			4,1380	3,8360	3,6150	3,4110	3,1800	2,9220	2,6680	2,4430	2,2530
$K_I$	40	1,2	0,5301	0,6363	0,7118	0,7660	0,8049	0,8332	0,8545	0,8708	0,8839
$K_{II}$			0,1095	0,1422	0,1688	0,1919	0,2153	0,2421	0,2730	0,3064	0,3404
$K_{max}$			0,4206	0,4941	0,5430	0,5741	0,5897	0,5911	0,5815	0,5645	0,5434
$\tau_{max}$			4,8420	4,4780	4,2160	3,9920	3,7390	3,4410	3,1300	2,8420	2,5960
$K_I$	40	1,4	0,5326	0,6474	0,7249	0,7801	0,8191	0,8470	0,8675	0,8831	0,8953
$K_{II}$			0,0997	0,1294	0,1534	0,1732	0,1924	0,2144	0,2409	0,2708	0,3025
$K_{max}$			0,4369	0,5180	0,5720	0,6069	0,6267	0,6326	0,6266	0,6123	0,5982
$\tau_{max}$			5,4040	5,0020	4,7260	4,5040	4,2580	3,9500	3,6020	3,2610	2,9600
$K_I$	40	1,6	0,5362	0,6476	0,7275	0,7846	0,8247	0,8531	0,8736	0,8890	0,9010
$K_{II}$			0,0926	0,1202	0,1421	0,1596	0,1754	0,1933	0,2153	0,2417	0,2702
$K_{max}$			0,4436	0,5274	0,5854	0,6250	0,6493	0,6598	0,6583	0,6477	0,6308
$\tau_{max}$			5,7890	5,3870	5,1190	4,9160	4,7010	4,4140	4,0580	3,6830	3,3340

$1 - \sigma_n$  — разность, учитывающая число молекул, переходящих через рабочее колесо и взаимодействующих с поверхностью межлопаточного канала или паза по зеркальному закону.

Значение  $K_{\max}$  определяют по формуле (9.87), а максимальное отношение давлений — по формуле (9.89), в которых  $K_I$  и  $K_{II}$  — вероятности перехода молекул газа через межлопаточный канал со сторон I и II соответственно:

$$K_I = \sigma_{IN} K_{IN} + (1 - \sigma_{IN}) K_{I3};$$

$$K_{II} = \sigma_{IIN} K_{IIN} + (1 - \sigma_{IIN}) K_{II3},$$

где  $\sigma_{IN}$  и  $\sigma_{IIN}$  — коэффициенты учета числа молекул, переходящих через межлопаточный канал соответственно со стороны I—I на сторону II—II и со стороны II—II на сторону I—I и отражаемых поверхностью стенок межлопаточного канала или паза в преимущественном направлении, т.е. а направлении нормали.

Наиболее простые выражения для определения вероятностей перехода молекул через межлопаточные каналы на противоположные стороны рабочего колеса (со стороны I—I на сторону II—II, и наоборот) получены на основании теоре-

тической модели (см. рис. 9.75), в которой за направление отражения молекул газа от стенок межлопаточного канала принято преимущественное, а скорости всех молекул одинаковы и равны наиболее вероятной скорости  $v_n$  теплового движения молекул.

В этом случае максимальная вероятность перехода молекул через межлопаточный канал

$$K_{\max} = (\varphi_{I\text{ср}} - \varphi_{II\text{ср}}) / \pi = K_I - K_{II}, \quad (9.91)$$

где

$$K_I = \varphi_{I\text{ср}} / \pi; \quad K_{II} = \varphi_{II\text{ср}} / \pi. \quad (9.92)$$

Средние значения углов  $\varphi_{I\text{ср}}$  и  $\varphi_{II\text{ср}}$ , характеризующих вероятности перехода молекул через межлопаточные каналы рабочего колеса со стороны пониженного давления на сторону повышенного и в обратном направлении и обозначающих, что все молекулы, соударяющиеся с набегающей стенкой лопатки, переходят на сторону повышенного давления, а молекулы, соударяющиеся с уходящей поверхностью лопатки, — на сторону пониженного давления ( $\beta_i = i = 0$ ) (см. рис. 9.75), определяют по формулам

$$\varphi_{I\text{ср}} = \gamma_{\text{ср}} + \beta_{\gamma\text{ср}}; \quad \varphi_{II\text{ср}} = \gamma_{\text{ср}} - \beta_{\gamma\text{ср}}, \quad (9.93)$$

где

$$\gamma_{\text{ср}} = \alpha - \frac{\sin \alpha}{2a/b} \ln \left| (a/b)^2 - 2(a/b) \cos \alpha + 1 \right| + \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{a/b} \right) \left[ 0,5\pi - \alpha + \arctg \frac{a/b - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right]; \quad (9.94)$$

$$\begin{aligned} \beta_{\gamma\text{ср}} = & \arcsin [(u/v_n) \sin \alpha] + \left( \frac{1 - \cos \alpha}{a/b} \right) \left\{ \arctg \frac{\sqrt{1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha}}{(u/v_n) \sin \alpha} - \right. \\ & - \arctg \left\{ \frac{\sqrt{[(a/b) - \cos \alpha]^2 + [1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha]}}{(u/v_n) \sin \alpha} \right\} - \frac{(u/v_n) \sin \alpha}{a/b} \times \\ & \times \ln \left| \frac{-\cos \alpha + \sqrt{1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha}}{(a/b) - \cos \alpha + \sqrt{[(a/b) - \cos \alpha]^2 + [1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha]}} \right| + \frac{\sin \alpha}{2a/b} \times \\ & \times \left\{ \ln \left| \frac{\sqrt{1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha} - (u/v_n) \cos \alpha}{\sqrt{1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha} + (u/v_n) \cos \alpha} \right| - \right. \\ & \left. \left. - \ln \left| \frac{[(a/b) - \cos \alpha]^2 + [1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha] + (u/v_n)[(a/b) - \cos \alpha]}{[(a/b) - \cos \alpha]^2 + [1 - (u^2/v_n^2) \sin^2 \alpha] - (u/v_n)[(a/b) - \cos \alpha]} \right| \right\} \right\}. \quad (9.95) \end{aligned}$$



Тогда максимальная вероятность перехода молекул через рабочее колесо при учете уравнений (9.93)

$$K_{\max} = 2\beta_{\gamma_{\text{ср}}} / \pi. \quad (9.96)$$

Максимальную быстроту откачки колеса определяют по формуле (9.88).

Максимальное отношение величин давления в рабочем колесе ТМН

$$\tau_{\max} = \varphi_{\text{I ср}} / \varphi_{\text{II ср}}. \quad (9.97)$$

Уравнения (9.96) и (9.97) для определения основных параметров откачной характеристики рабочего колеса ТМН применимы при  $c_1 = u/v_n < 0,8$  по принятому допущению.

Ступень ТМН состоит из вращающегося рабочего колеса и расположенного за ним неподвижного статорного колеса, имеющего, как правило, те же размеры, что и роторное.

При рассмотрении процесса перехода молекул газа через межлопаточные каналы или пазы статорного колеса учитывают воздействие вращающихся роторных колес, расположенных по обе стороны от статорного колеса, на скорость теплового движения молекул.

Потоки молекул газа, проходящих через межлопаточные каналы или пазы статорного колеса на его противоположные стороны, определяют, как и для роторного колеса, с учетом влияния окружающей скорости роторных колес, т. е. по формулам (9.92) – (9.95), в зависимости от геометрических параметров межлопаточных каналов и относительной скорости  $c_1$ .

Если с какой-либо стороны статорного колеса нет роторного колеса (в начале или конце пакета рабочих колес), при определении результирующей вероятности перехода молекул газа с этой стороны угол  $\varphi_{\text{ср}} = \gamma_{\text{ср}}$ , т.е.  $K_{\max} = \beta_{\gamma_{\text{ср}}} / \pi$  и  $\tau_{\max} = (\gamma_{\text{ср}} + \beta_{\gamma_{\text{ср}}}) / \gamma_{\text{ср}}$  при отсутствии роторного колеса после статорного,  $\tau_{\max} = \gamma_{\text{ср}} / (\gamma_{\text{ср}} - \beta_{\gamma_{\text{ср}}})$ , если нет роторного колеса перед статорным.

Откачная характеристика рабочего колеса и ее основные параметры (максимальная быстрота откачки и максимальное отношение величин давления) при постоянной относительной скорости  $c_1$  определяются геометрией межлопаточных каналов или пазов.

Выбор угла  $\alpha$  наклона паза или установки лопаток и отношения  $a/b$  для межлопаточного канала при конкретных значениях  $c_1$  определяется требованиями, предъявляемыми к рабочему колесу ТМН.

Первые рабочие колеса ТМН (со стороны всасывания) должны создавать максимально возможную быстроту откачки, так как они определяют быстроту действия вакуумного насоса. Последующие рабочие колеса насоса должны обеспечивать максимально возможное отношение давлений, чтобы необходимое общее их отношение создавалось насосом с возможно меньшим числом рабочих колес.

Из результатов теоретического анализа следует:

- для обеспечения высокой вероятности перехода молекул через рабочее колесо, а значит, и повышенной быстроты откачки при удовлетворительных значениях  $\tau_{\max}$  необходимо выбирать угол наклона паза или установки лопатки в пределах  $\alpha = 35...40^\circ$  при  $a/b = 1,0...1,4$ ;
- для достижения повышенных значений  $\tau_{\max}$  при обеспечении достаточно высоких значений  $K_{\max}$  надо принимать  $\alpha = 10...20^\circ$  при  $a/b = 0,6...0,8$ ;
- для увеличения быстроты откачки рабочего колеса и отношения давлений нужно увеличивать его частоту вращения;
- для улучшения откачной характеристики рабочего колеса практически целесообразна закрутка лопаток по радиусу.

В зависимости от требований, предъявляемых к проектируемому насосу, проводится оптимизация насоса по выбранному критерию: объему машины, диаметру, скорости действия для данных габаритных размеров и т.п.

Эти рекомендации важны при формировании пакета рабочих колес насоса.



Использование в пакете рабочих колес с малыми значениями  $\alpha$  или  $a/b$  оправдано при малом потоке газовой выделенной с деталей ротора и внутренней поверхности корпуса насоса. При большом потоке газов с большой молекулярной массой для всего рабочего пакета может оказаться целесообразным применение колес с открытыми межлопаточными каналами.

При работе на газах с различной молекулярной массой быстрота действия ТМН зависит от скорости теплового движения молекул откачиваемого газа, влияющей на сопротивление участка от входного сечения всасывающего патрубка до первого рабочего колеса со стороны всасывания. На быстроту действия насоса влияет также проводимость кольцевого зазора, через который перетекает откачиваемый газ: поток газа возрастает при уменьшении молекулярной массы газа. Уменьшение отношения давлений тем значительнее, чем меньше молекулярная масса откачиваемого газа.

Снижение температуры откачиваемого газа мало влияет на быстроту действия насоса и приводит к существенному увеличению отношения давлений.

**Расчет рабочих колес ТМН.** Расчет рабочего колеса ТМН включает в себя определение конечного и начального диаметров лопаток или высоты паза (для принятой геометрии межлопаточных каналов), числа лопаток или пазов, ширины рабочего колеса, при которых для минимального наружного диаметра обеспечивается заданная быстрота откачки.

Максимальная быстрота откачки рабочего колеса  $S_{\max}$  и отношение давлений  $\tau_{\max}$  определяются рядом факторов:  $\tau_{\max}$  зависит от угла  $\alpha$  установки лопаток или наклона паза, геометрического параметра  $a/b$ , характеризующего тип структуры, и относительной скорости  $c_1 = u/v_n$ ;  $S_{\max}$  зависит от произведения  $FK_{\max}$ , определяемого перечисленными факторами, а также торцевой площадью сечения межлопаточных каналов рабочего колеса.

Оптимальные значения  $\alpha$  и  $a/b$  выбирают из условия обеспечения максимальной результирующей вероятности перехода молекул газа через рабочее колесо или достижения максимально возможного отношения давлений в соответствии с требованиями, предъявляемыми к колесу. Торцевая площадь межлопаточных каналов или пазов, определяемая исходя из обеспечения заданной быстроты откачки, зависит от ширины  $a$  межлопаточного канала или паза, наружного  $D_2$  и начального (внутреннего)  $D_1$  диаметров и числа  $z$  межлопаточных каналов или пазов.

Лопаточные колеса по сравнению с дисковыми при одинаковых наружных диаметрах обеспечивают большую быстроту откачки вследствие большей относительной площади сечения межлопаточных каналов.

Как показали результаты теоретических исследований, увеличение быстроты откачки  $S$  зависит от наружного диаметра  $D_2$ . При  $S = 50 \dots 200 \text{ дм}^3/\text{с}$  возрастание быстроты откачки  $\leq 20 \%$ . Применение лопаточных колес в ТМН с быстротой действия  $S = 400 \dots 500 \text{ дм}^3/\text{с}$  позволяет уменьшить наружный диаметр по сравнению с его значением для дисковых колес примерно на  $10 \dots 12 \%$ .

### 1. Дисковое колесо

Рабочие колеса ТМН с быстротой действия до  $0,4 \dots 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$  допустимо выполнять в виде дисков с радиальными пазами (см. рис. 9.76). Такая конструкция колеса обеспечивает необходимую суммарную торцевую площадь сечения пазов для заданной быстроты откачки при сравнительно небольшом диаметре  $D_2$ , а также отличается технологичностью и простотой изготовления.

Суммарная торцевая площадь пазов дискового рабочего колеса

$$F = \frac{\pi D_2^2}{4} \frac{48\lambda - 4(1 - \lambda^3)BD_2^2}{24 - 3(1 - \lambda^2)BD_2^2} (1 - \lambda), \quad (9.98)$$

где  $\lambda = D_1/D_2$  — отношение начального диаметра пазов к наружному;



$BD_2^2 = u_2^2 \cdot 4\rho n / \sigma_{0,2}$  — комплекс постоянных величин ( $\rho$  — плотность материала колеса,  $\text{кг/м}^3$ ;  $n$  — коэффициент запаса по пределу текучести;  $\sigma_{0,2}$  — предел текучести, Па).

Число пазов

$$z = \frac{\pi D_2}{a} \frac{24\lambda - 2(1 - \lambda^3)BD_2^2}{24 - 3(1 - \lambda^2)BD_2^2}. \quad (9.99)$$

Максимальная вероятность перехода молекул  $K_{\max}$  изменяется по высоте паза пропорционально изменению окружной скорости.

Среднее значение максимальной вероятности перехода молекул через дисковое рабочее колесо на среднем по высоте паза радиусе

$$K_{\max \text{ ср}} = A \frac{u_2}{v_n} \frac{1 + \lambda}{2}, \quad (9.100)$$

где  $A = f(\alpha, a/b)$ .

Подставив в уравнение (9.88) значения  $K_{\max \text{ ср}}$  и  $F$  из уравнений (9.100) и (9.98), получим зависимость для определения наружного диаметра дискового рабочего колеса

$$D_2 = C \sqrt{\frac{S_{\max}}{36,4(\pi/8)(A/v_n)\sqrt{T/M}}}, \quad (9.101)$$

где

$$C = \sqrt{\frac{24 - 3(1 - \lambda^2)BD_2^2}{u_2(1 - \lambda^2)[48\lambda - 4(1 - \lambda^3)BD_2^2]}}. \quad (9.102)$$

На рис. 9.77 зависимость (9.102) приведена при различных значениях  $u_2$  для рабочих колес из алюминиевого сплава Д16 ( $\sigma_{0,2} = 274 \text{ МПа}$ ;  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент запаса по пределу текучести принят  $n = 5$ ). Большое значение  $n$  по сравнению с рекомендуемым в корневом сечении лопаток газовых турбин авиационных двигателей (обычно  $n = 2,2 \dots 2,5$ ) объясняется значительными изгибающими силами в корневом сечении при возможной вибрации лопаток. Уменьшение коэффициента  $n$  с 5,0 до 2,0 увеличивает

допускаемую окружную скорость  $u_2$  рабочего колеса на 55...60 %, что приводит к росту  $S_{\max}$  на 40...60 %, а  $\tau_{\max}$  при откачке водорода возрастает в несколько раз (в зависимости от конструкции насоса).

В связи с тенденцией к увеличению частоты вращения роторов ТМН все более важное значение приобретает их балансировка. Допускаемый дисбаланс  $D_{\text{доп}}$ , г·см, определяют по формуле  $D_{\text{доп}} = 0,107 m_p / n_p$ , где  $m_p$  — масса ротора, г;  $n_p$  — частота вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ .

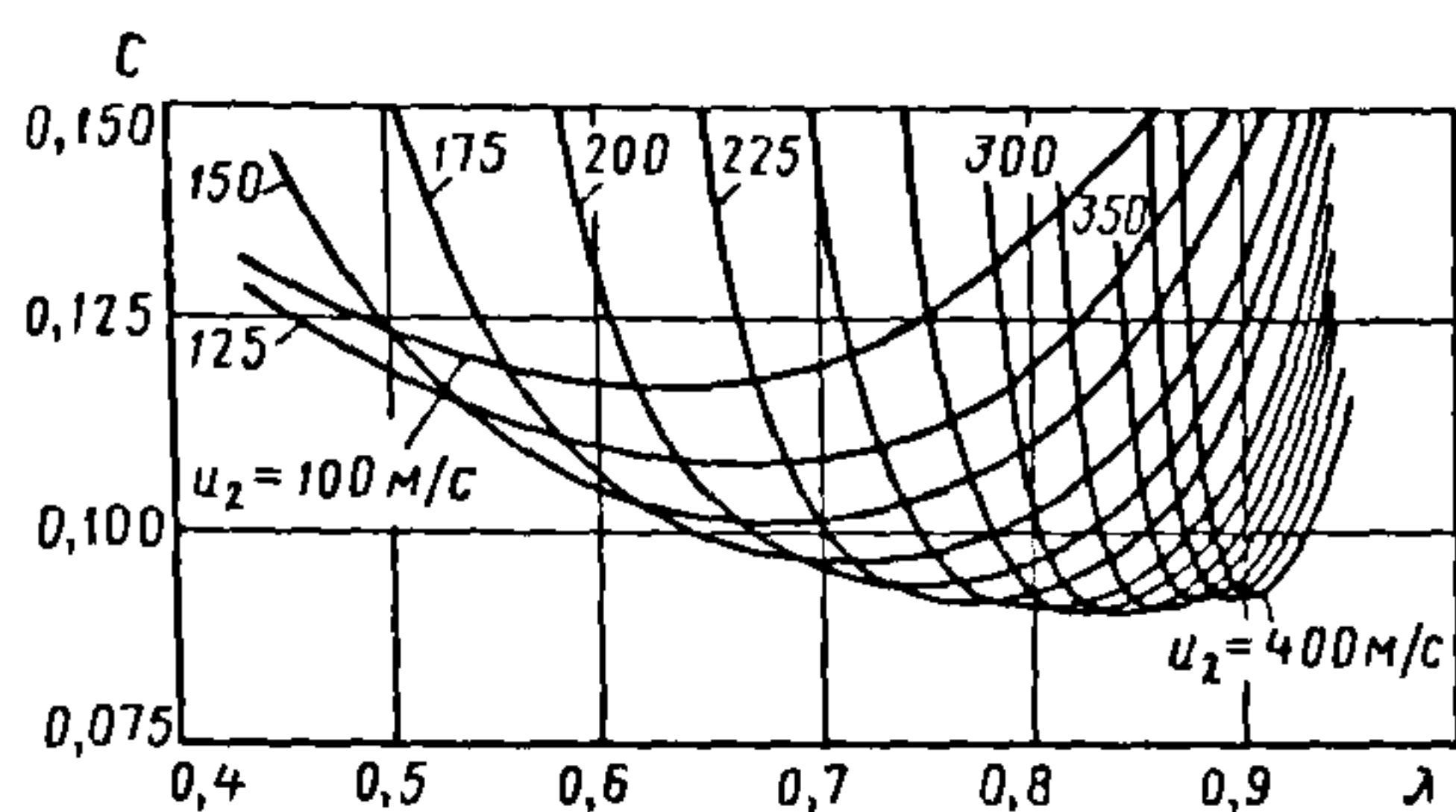
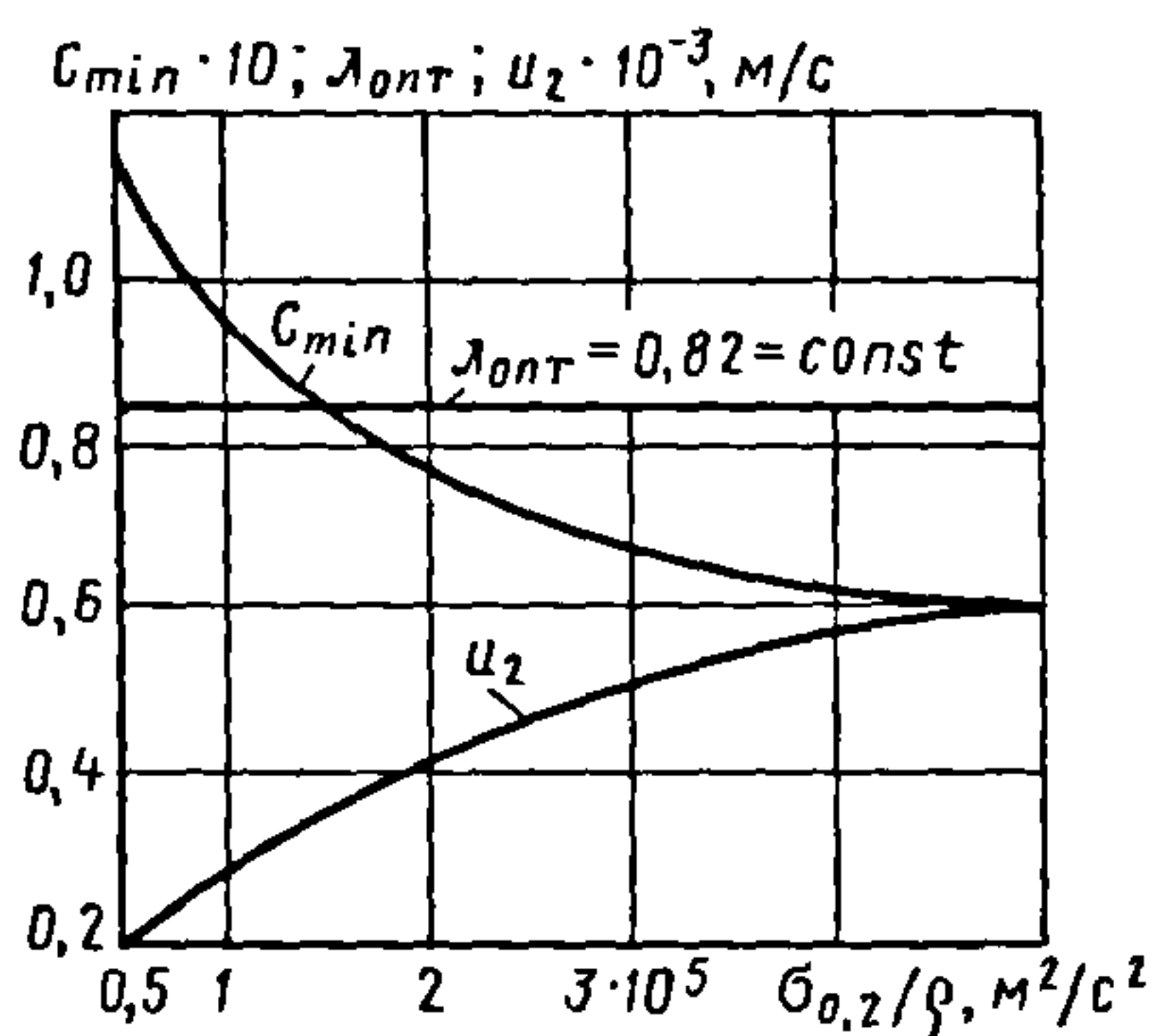
При выборе подшипников для ТМН необходимо стремиться к тому, чтобы скоростной фактор  $k_v$ , равный произведению диаметра подшипника  $d$ , мм, на частоту вращения ротора  $n_p$ ,  $\text{с}^{-1}$ , был меньше предельной величины, т.е.  $k_v = dn_p \leq 13\,000 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Каждому значению окружной скорости  $u_2$  соответствует оптимальное значение  $\lambda$ , при котором комплекс  $C$  минимален, следовательно, заданной максимальной скорости откачки  $S_{\max}$  соответствует минимальный наружный диаметр рабочего колеса  $D_2$ . Минимальному значению комплекса  $C \approx 0,09$  при оптимальном  $\lambda_{\text{опт}} \approx 0,82$  отвечает  $u_2 = 275 \text{ м/с}$ . При большой окружной скорости увеличивается комплекс  $C$ , а значит, и наружный диаметр рабочего колеса  $D_2$ , рассчитанный на заданную скорость откачки.

Таким образом, для получения минимального наружного диаметра дискового рабочего колеса из алюминиевого сплава при условии обеспечения заданной скорости откачки и необходимой прочности окружную скорость на периферии колеса следует принимать в пределах  $u_2 = 250 \dots 300 \text{ м/с}$ , а  $\lambda \approx 0,80 \dots 0,84$ .

Для создания больших перепадов давления при меньшем числе рабочих колес в насосе целесообразно принимать большие значения окружной скорости  $u_2$  и соответствующие им значения  $\lambda$  (см. рис. 9.77).

При использовании материала с большим пределом текучести диаметр рабочего колеса  $D_2$  можно уменьшить.

Рис. 9.77. Зависимость  $C = f(\lambda)$ Рис. 9.78. Зависимость  $C_{\min}$ ,  $\lambda_{\text{опт}}$  и  $u_2$  от  $\sigma_{0,2}/\rho$ 

Для рабочих колес из высокопрочных сплавов, например ВТ14 ( $\sigma_{0,2} = 1,095 \cdot 10^9$  Па;  $\rho = 4,52 \cdot 10^3$  кг/м³), значение окружной скорости следует принимать в пределах  $u_2 = 400 \dots 500$  м/с и  $\lambda_{\text{опт}} \approx 0,81 \dots 0,86$ .

На рис. 9.78 приведены зависимости  $C_{\min}$ ,  $\lambda_{\text{опт}}$  и  $u_2$  от  $\sigma_{0,2}/\rho$ , полученные для рабочих колес из материалов с различными прочностными характеристиками  $\sigma_{0,2}/\rho$ .

Методика определения основных размеров дискового рабочего колеса ТМН состоит в следующем. Используя графическую зависимость, приведенную на рис. 9.78, по отношению  $\sigma_{0,2}/\rho$  для выбранного материала колеса определяют оптимальное значение  $\lambda_{\text{опт}}$  и соответствующую окружную скорость  $u_2$ . Далее задаются углом  $\alpha$  наклона паза и отношением  $a/b$ .

Из уравнения (9.98) определяют комплекс  $4F/(\pi D_2^2)$ . Среднее значение максимальной вероятности перехода мо-

лекул через рабочее колесо подсчитывают по формуле (9.96) с учетом выражения (9.100).

При заданной быстроте действия проектируемого вакуумного насоса  $S = (0,95 \dots 0,90) S_{\text{max}}$  из уравнения (9.88) определяют суммарную торцовую площадь пазов  $F$ . По найденным значениям  $F$  и комплекса  $4F/(\pi D_2^2)$  находят наружный диаметр рабочего колеса  $D_2$ , а затем по  $\lambda_{\text{опт}}$  — начальный диаметр пазов  $D_1$ .

Задав ширину  $b'$  (см. рис. 9.76) дискового колеса (обычно  $b' = 2,0 \dots 3,0$  мм), вычисляют ширину паза из условия обеспечения выбранной геометрии межлопаточного канала:

$$a = (a/b)b'/\sin \alpha. \quad (9.103)$$

Число пазов в колесе рассчитывают по формуле (9.99).

Предложенная методика определения основных размеров дискового рабочего колеса для улучшения технологии изготовления пазов предполагает корректировку полученных значений. Если расчетная толщина лопатки в корневом сечении  $< 1$  мм (что усложняет технологию изготовления), необходимо повторить расчет основных размеров колеса, задавшись соотношением  $\lambda < \lambda_{\text{опт}}$ . Повторный расчет дает немного большую толщину лопатки в корневом сечении.

При корректировке можно также задаваться необходимой из конструктивных соображений толщиной лопатки в корневом сечении.

## 2. Лопаточное колесо

В ТМН с быстротой действия  $> 0,4$  м³/с обычно применяют лопаточные колеса, так как использование рабочих колес с радиальными пазами приводит к увеличению радиального размера насоса и усложнению технологии изготовления, а также ограничению быстроты действия. Лопаточные рабочие колеса по сравнению с дисковыми имеют более высокий коэффициент использования торцовой поверхности для переноса молекул откачиваемого газа через межлопаточные каналы.



Основные размеры лопаточного колеса ТМН [начальный диаметр  $D_1$  у основания лопаток, наружный диаметр  $D_2$ , отношение  $\lambda = D_1/D_2$ , число  $z$  межлопаточных каналов или лопаток, толщина колеса у корня лопатки  $H_1$  и на периферии  $H_2$ , длины  $b_1$  и  $b_2$  лопаток в этих сечениях (рис. 9.79), характеризующие геометрию рабочего колеса] определяют для минимального диаметра при заданной скорости действия, исходя из условий обеспечения необходимой структуры межлопаточного канала колеса и допустимого напряжения при разрыве в корневом сечении лопатки.

При изменении толщины и длины лопатки по линейному закону (общий случай) основные размеры лопаточного колеса ТМН находят следующим образом. Приняв отношения диаметров  $\lambda = D_1/D_2 = 0,50 \dots 0,65$ , толщин лопатки  $\psi = h_2/h_1 = 0,3 \dots 1,0$  и колеса  $\theta = H_2/H_1 = 1,0 \dots 1,3$ ,

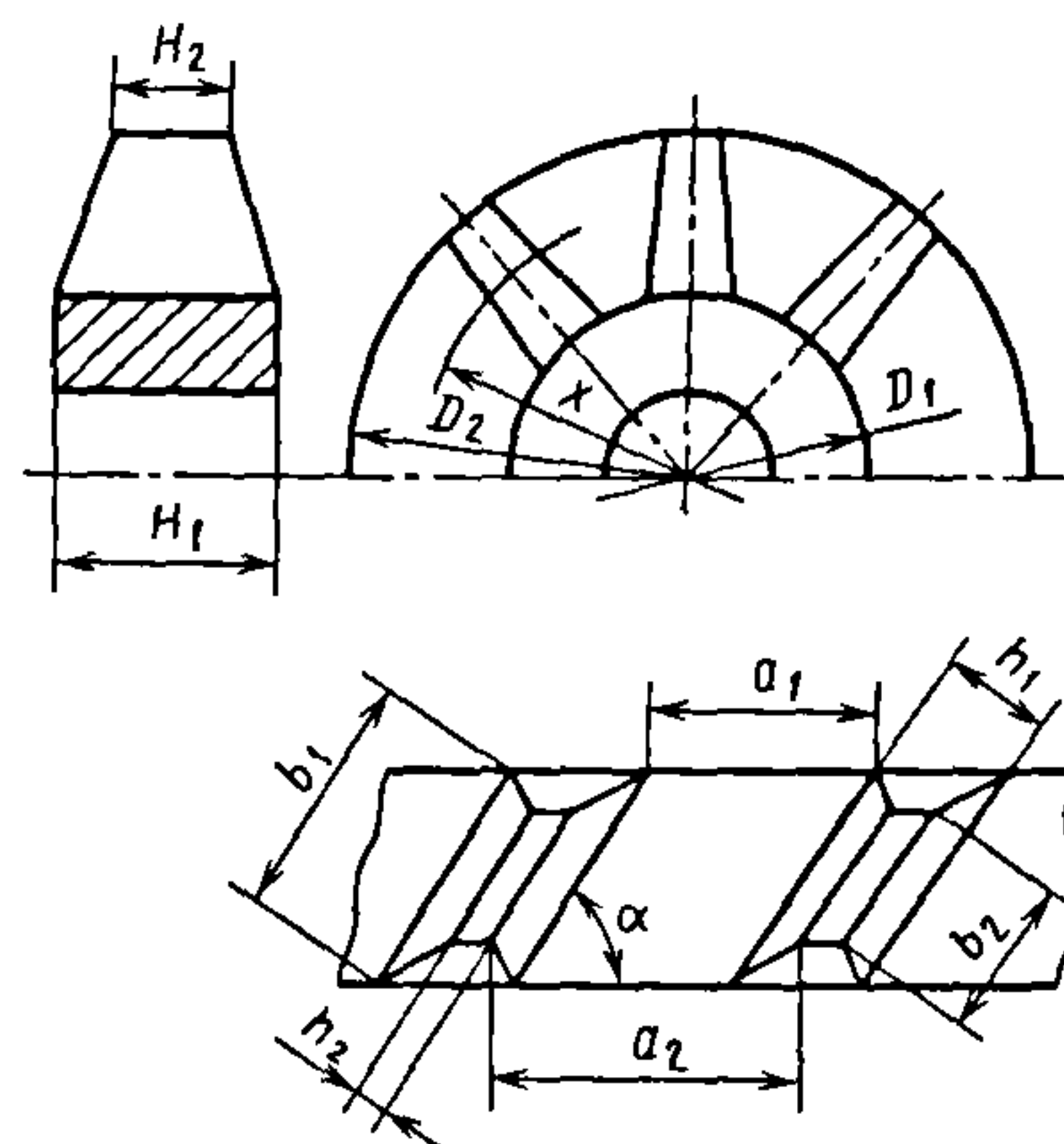


Рис. 9.79. Схема колеса с лопатками переменных толщины и ширины

определяют допускаемую окружную скорость  $u_2$  на конце лопатки, материал которой имеет предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и плотность  $\rho$  при коэффициенте запаса  $n$  по пределу текучести:

$$u_2^2 = \frac{\sigma_{0,2}}{\rho n} (1 - \lambda)^2 \left\{ 0,25(1 - \lambda^4)(\theta - 1)(\psi - 1) + [(1 - \lambda^3/3)] \times \right. \\ \left. \times [(\theta - 1)(1 - \lambda\psi) + (\psi - 1)(1 - \lambda\theta)] + 0,5(1 - \lambda^2)(1 - \lambda\psi)(1 - \lambda\theta) \right\}^{-1}. \quad (9.104)$$

Толщину лопатки принимают равной  $h_1 = 1 \dots 3$  мм, толщину колеса  $H_1$ , мм, вычисляют по эмпирической формуле  $H_1 = S_n + 2$ , где  $S_n$  – рабочая быстрота действия насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

По заданной скорости действия проектируемого вакуумного насоса  $S = (0,90 \dots 0,95) S_{\max}$  определяют наружный диаметр рабочего колеса:

$$D_2^2 = \frac{S_{\max}}{18,2\pi\sqrt{T/M}} \left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \right) \left[ \left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \frac{1 - \lambda\psi}{1 - \lambda} \right) \int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{\bar{x}} d\bar{x} - \lambda \frac{h_1}{H_1} \frac{1 - \lambda\psi}{1 - \lambda} \int_{\lambda}^1 K_{\bar{x}} d\bar{x} \right]^{-1}, \quad (9.105)$$

где  $S_{\max}$  – максимальная быстрота откачки ТМН,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $a_1/b_1$  – отношение ширины межлопаточного канала и длины лопатки у корневого сечения (обычно  $a_1/b_1 = 0,7 \dots 1,1$ );  $\bar{x}$  – относительный текущий радиус колеса ( $\bar{x} = x/R_2$ );  $K_{\bar{x}}$  – результирующая вероятность перехода молекул газа через межлопаточный канал, имеющий геометрические параметры и скорость движения, соответствующие сечению на радиусе  $\bar{x}$  [определяют по формулам (9.53) – (9.58)].

Для определения  $K_{\bar{x}}$  вычисляют

$$a_{\bar{x}} = \frac{H_1}{\sin \alpha} \left[ \frac{\bar{x}}{\lambda} \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \frac{(1 - \lambda\psi)(\bar{x} - \lambda)}{\lambda(1 - \lambda)} \right]; \quad (9.106)$$

$$\left(\frac{a}{b}\right)_x = \frac{1-\lambda}{\bar{x}(\theta-1)+(1-\theta\lambda)} \left[ \frac{\bar{x}}{\lambda} \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \frac{(1-\lambda\psi)(\bar{x}-\lambda)}{\lambda(1-\lambda)} \right]. \quad (9.107)$$

Отношение окружной скорости колеса в сечении на радиусе  $\bar{x}$  к наиболее вероятной скорости теплового движения молекул газа  $c_{\bar{x}} = \bar{x}u^2/v_n$ .

Для обеспечения максимальной быстроты откачки угол наклона лопатки задают в пределах  $\alpha = 35...40^\circ$ . Толщина лопаток и колеса периферии соответственно  $h_2 = \psi h_1$ ;  $H_2 = \theta H_1$ .

Число лопаток колеса

$$z = \frac{\pi D_2^2}{H_1} \frac{\lambda \sin \alpha}{(a_1/b_1) + (h_1/H_1)}. \quad (9.108)$$

Максимальное отношение давлений рабочего колеса

$$\begin{aligned} \tau_{\max} = & \left[ \left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \frac{1-\lambda\psi}{1-\lambda} \right) \int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{I\bar{x}} d\bar{x} - \lambda \frac{h_1}{H_1} \frac{1-\lambda\psi}{1-\lambda} \int_{\lambda}^1 K_{I\bar{x}} d\bar{x} \right] \times \\ & \times \left[ \left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \frac{1-\lambda\psi}{1-\lambda} \right) \int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{II\bar{x}} d\bar{x} - \lambda \frac{h_1}{H_1} \frac{1-\lambda\psi}{1-\lambda} \int_{\lambda}^1 K_{II\bar{x}} d\bar{x} \right], \end{aligned} \quad (9.109)$$

где  $K_{I\bar{x}}$  и  $K_{II\bar{x}}$  – вероятности перехода молекул газа через межлопаточный канал, соответствующий сечению на радиусе  $\bar{x}$ , со стороны пониженного давления на сторону повышенного, и в обратном направлении.

В прикидочных расчетах максимальную быстроту откачки и максимальное отношение давлений приближенно определяют по параметрам межлопаточного канала на среднем радиусе. В этом случае

$$c_{cp} = 0,5(1+\lambda)(u_2/v_n); \quad (9.110)$$

$$\left(\frac{a}{b}\right)_{cp} = \frac{(1+\lambda)a_1/b_1 + (1-\psi\lambda)h_1/H_1}{\lambda(1+\theta)}; \quad (9.111)$$

$$S_{\max} = 36,4\sqrt{T/M} \cdot K_{\max cp} F, \quad (9.112)$$

где  $K_{\max cp} = K_{\bar{x} cp}$  при  $\bar{x}_{cp} = 0,5(1+\lambda) = R_{cp}/R_1$ .

Оптимизация рабочего колеса, обеспечивающая его минимальный диаметр  $D_2$  при неизменном  $S_{\max}$ , достигается в результате исследования совместного влияния параметров  $\lambda$ ,  $a_1/b_1$  (рис. 9.80),  $\varphi$ ,  $\theta$  на диаметр  $D_2$ . В зависимости от параметров  $\varphi$  и  $\theta$  оптимальные значения  $\lambda = 0,5...0,7$ ,  $a_1/b_1 = 0,8...1,2$ .

После определения всех геометрических параметров рабочего колеса уточняют максимальную быстроту откачки

$$S_{\max} = \frac{\pi D_2^2 18,2\sqrt{T/M}}{a_1/b_1 + h_1/H_1} \left[ \left( \frac{a_1}{b_1} + \frac{h_1}{H_1} \frac{1-\lambda\psi}{1-\lambda} \right) \int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{\bar{x}} d\bar{x} - \lambda \frac{h_1}{H_1} \frac{1-\lambda\psi}{1-\lambda} \int_{\lambda}^1 K_{\bar{x}} d\bar{x} \right] \quad (9.113)$$

и максимальное отношение давлений по уравнению (9.109).

При определении  $D_2$ ,  $\tau_{\max}$  и  $S_{\max}$  необходимо вычислить интегралы

$$\int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{\bar{x}} d\bar{x}; \int_{\lambda}^1 K_{\bar{x}} d\bar{x}; \int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{I\bar{x}} d\bar{x}; \int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{II\bar{x}} d\bar{x}; \int_{\lambda}^1 K_{I\bar{x}} d\bar{x}; \int_{\lambda}^1 K_{II\bar{x}} d\bar{x},$$

которые для упрощения расчетов можно заменить суммами:



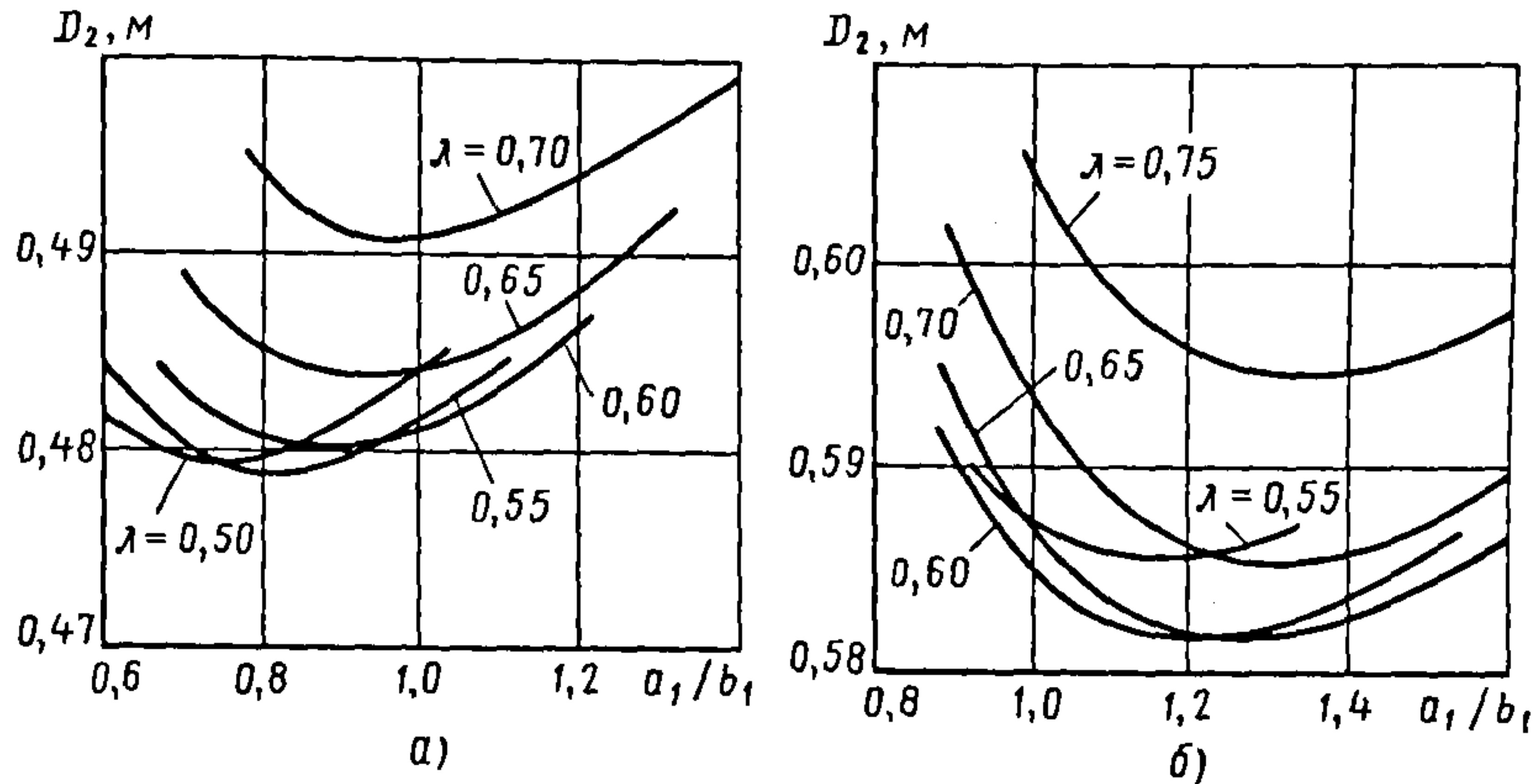


Рис. 9.80. Зависимость  $D_2$  от отношения  $a_1/b_1$  при  $\psi = 0,3$ ;  $\theta = 1,0$  (а) и  $\psi = 1,0$ ;  $\theta = 1,30$  (б)

$$\int_{\lambda}^1 \bar{x} K_{\bar{x}} d\bar{x} \approx \sum_{i=1}^{i=m} (\bar{x}_{i-1} + \bar{x}_i) [K_{\bar{x}(i-1)} + K_{\bar{x}i}] \frac{1-\lambda}{4m}; \quad \int_{\lambda}^1 K_{\bar{x}} d\bar{x} \approx \sum_{i=1}^{i=m} [K_{\bar{x}(i-1)} + K_{\bar{x}i}] \frac{1-\lambda}{2m},$$

где  $m$  – число участков, на которое разбивают область интегрирования;  $\bar{x}_i$  – радиус  $i$ -го участка.

Наиболее распространены рабочие колеса постоянной толщины с лопатками также постоянной толщины. Их рассчитывают по формулам (9.104) – (9.113) при  $\psi = 1$  и  $\theta = 1$ .

Как показывает практика конструирования и испытания рабочих колес ТМН, в зависимости от значений геометрических параметров  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $h_1/H_1$ ,  $a_1/b_1$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda_d$  (где  $\lambda_d = D_d/D_2$  – отношение внутреннего диаметра  $D_d$  диска колеса к его наружному диаметру  $D_2$ ) допускаемое напряжение, обеспечивающее работоспособность колеса, может возникать либо в корневом сечении  $\sigma_d$  под действием центробежной силы, т.е. при  $\sigma_d = [\sigma] = \sigma_{0,2}/n$ , либо на внутреннем диаметре диска колеса под действием тангенциального напряжения, т.е. при  $\sigma_{\tau \max} = [\sigma]_d = \sigma_{0,2}/n_d$  (где  $n_d$  – коэффициент запаса по пределу текучести для материала диска колеса).

Тангенциальное напряжение в диске колеса

$$\sigma_{\tau \max} = \frac{\rho u_2^2}{(1-\lambda)^2} X \left\{ \lambda^2 \left[ \frac{2h_1/H_1}{(a_1/b_1 + h_1/H_1)(\lambda^2 - \lambda_d^2)} + \frac{(3+\mu)(1-\lambda)^2}{4X} \right] + \lambda_d^2 \frac{(1-\mu)(1-\lambda)^2}{4X} \right\}, \quad (9.114)$$

где

$$X = \frac{1-\lambda^2}{4} (\theta-1)(\psi-1) + \frac{1-\lambda^3}{3} [(\theta-1)(1-\lambda) + (\psi-1)(1-\lambda\theta)] + \frac{1-\lambda^2}{2} (1-\theta\lambda)(1-\psi\lambda);$$

$\mu$  – коэффициент Пуассона (для алюминиевых и титановых сплавов  $\mu \approx 0,3$ ).

Следовательно, окружная скорость  $u_2$  на периферии рабочего колеса ограничена значениями  $\sigma_d$  или  $\sigma_{\tau \max}$ .

Если

$$\sigma_d = [\sigma] = \sigma_{0,2}/n \text{ и } \sigma_{\tau \max} < [\sigma]_d = \sigma_{0,2}/n_d, \quad (9.115)$$

то  $u_2$  определяют по уравнению (9.104).

Если

$$\sigma_d < [\sigma] = \sigma_{0,2}/n \text{ и } \sigma_{\tau \max} = [\sigma]_d = \sigma_{0,2}/n_d, \quad (9.116)$$

то из уравнения (9.104) с учетом выражения (9.116) рассчитывают

$$u_2 = \sqrt{\sigma_{0,2}(1-\lambda)^2 / (\rho n_d \lambda Y)}, \quad (9.117)$$

где

$$Y = \lambda^2 \left[ \frac{2h_1 / H_1}{(a_1 / b_1 + h_1 / H_1)(\lambda^2 - \lambda_d^2)} + \frac{(3+\mu)(1-\lambda)^2}{4X} \right] + \lambda_d \frac{(1-\mu)(1-\lambda)^2}{4X}.$$

Таким образом, если  $\sigma_{r \max} n_d > \sigma n$ , то  $u_2$  определяют по формуле (9.117), а если  $\sigma_{r \max} n_d < \sigma n$  – по формуле (9.104).

В общем виде

$$u_2 = \sqrt{\sigma_{0,2}(1-\lambda)^2 / (\rho X X_1)},$$

где  $X_1 = n$  при  $Y < n/n_d$ ;  $X_1 = n_d Y$  при  $Y \geq n/n_d$ .

Равенство  $Y = n/n_d$  выражает условие, когда в корневом сечении лопатки и на внутреннем диаметре диска допускаемые напряжения равны, т.е.  $\sigma_d = \sigma_{r \max}$ .

При  $\theta = \psi = 1,0$

$$X = 0,5(1-\lambda^2)(1-\lambda)^2; \quad \sigma_d = 0,5\rho u_2^2(1-\lambda^2)Y;$$

$$Y = \lambda^2 \left[ \frac{2h_1 / H_1}{(a_1 / b_1 + h_1 / H_1)(\lambda^2 - \lambda_d^2)} + \frac{3+\mu}{2(1-\lambda^2)} \right] + \lambda_d^2 \frac{1-\mu}{2(1-\lambda^2)}; \quad u_2 = \sqrt{\frac{2\sigma_{0,2}}{\rho(1-\lambda^2)X X_1}}.$$

Теоретически и экспериментально исследована возможность улучшения откачной характеристики колеса ТМН применением межлопаточных каналов с непараллельными стенками (дисковые колеса) или лопаток, установленных под разными углами  $\alpha$  (лопаточные колеса) – рис. 9.81.

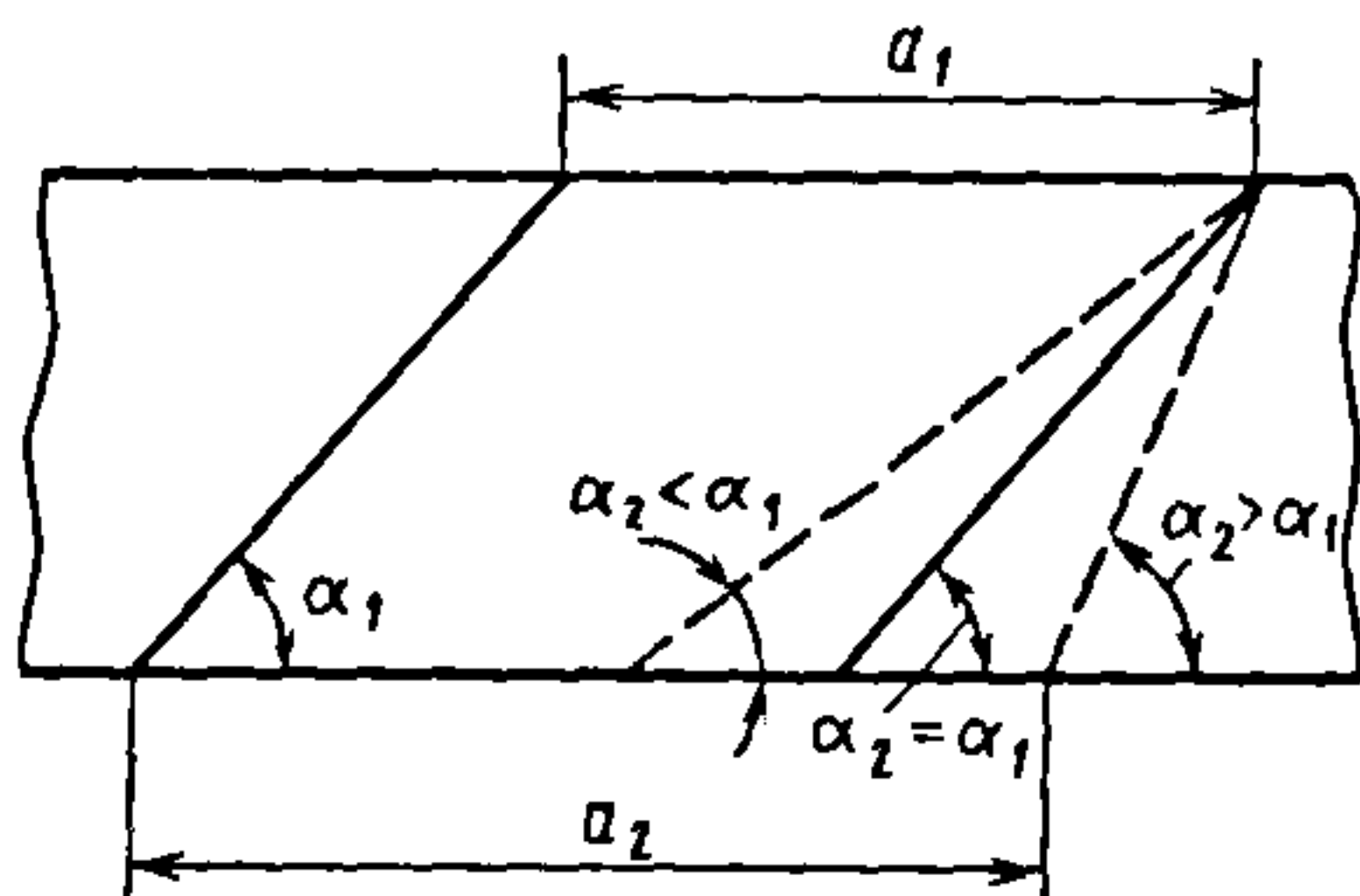


Рис. 9.81. Схема межлопаточного канала с непараллельными стенками

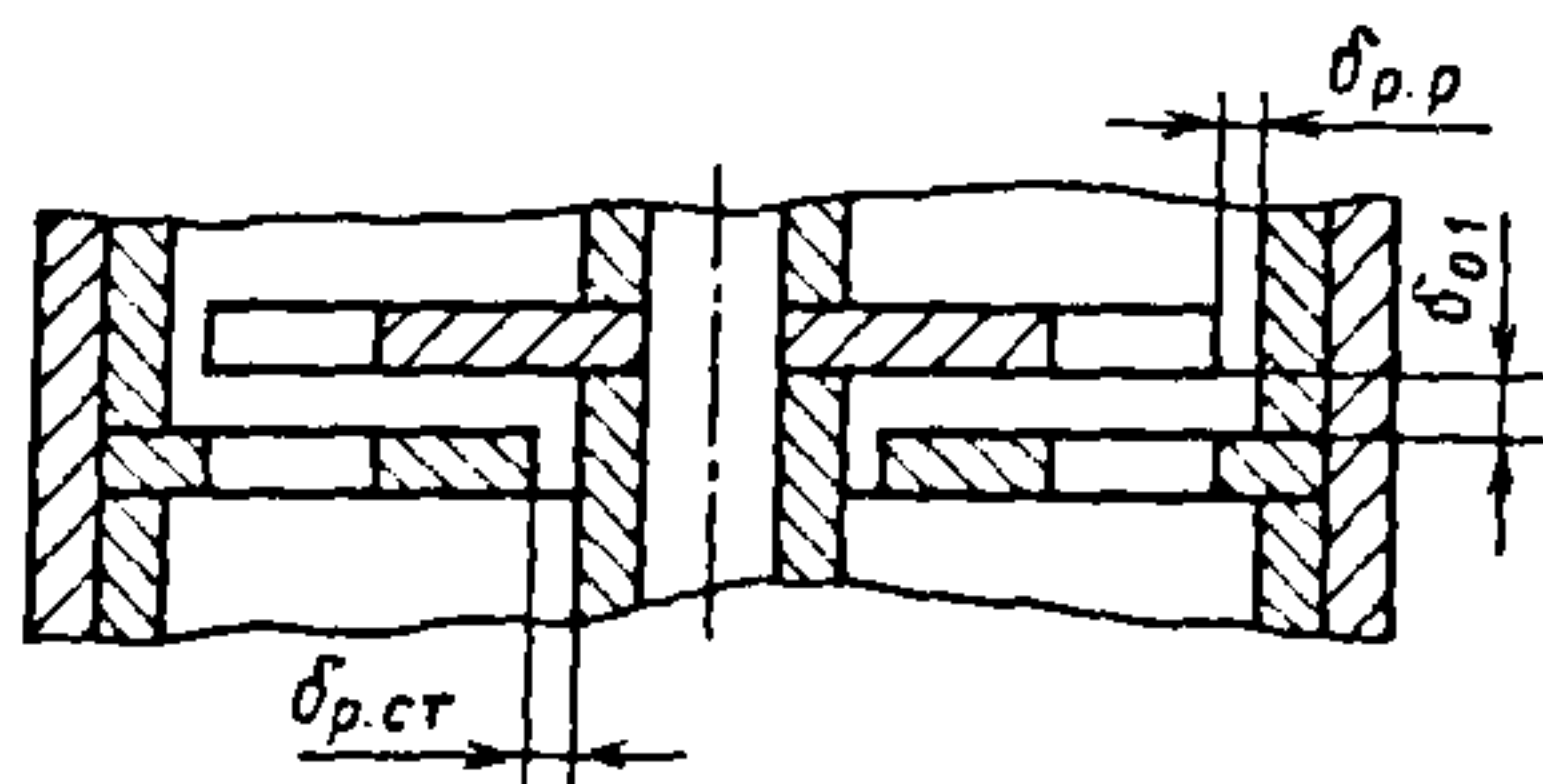


Рис. 9.82. Схема ступени ТМН

В диапазоне относительных скоростей  $c_1 = u_2/v_n = 0,2 \dots 1,2$  максимальные быстрота и отношение давлений для отдельного канала с плоскими непараллельными (сужающимися) стенками можно увеличить на 50 % по сравнению с их значениями для межлопаточного канала с параллельными стенками. Однако максимально возможное увеличение быстроты откачки колеса  $\leq 10\%$ .

Влияние осевых и радиальных зазоров на откачную характеристику ступени ТМН. Зазоры между колесами  $\delta_{o,1}$  (осевые), между колесом и корпусом насоса  $\delta_{p,p}$ , между колесом и валом  $\delta_{p,ст}$  (радиальные) (рис. 9.82) существенно влияют на откачную характеристику колеса, ступени и насоса в целом.

Статорное колесо работает в оптимальных условиях, если оно расположено в рабочем пакете между роторными колесами, обеспечивающими перенос молекул газа через его межлопаточные каналы или пазы в направлении откачки. Эффективность этого процесса зависит от расстояния между торцовыми поверхностями: при увеличении зазора  $\delta_{o,1}$  влияние рабо-



чего колеса, отражающего молекулы газа в сторону статорного колеса, снижается, так как возрастает вероятность столкновения молекул с неподвижной поверхностью корпуса насоса, вследствие чего уменьшается вероятность перехода их через каналы или пазы статорного колеса.

Таким образом, при увеличении зазора  $\delta_{01}$  ослабевает воздействие, оказываемое на статорное колесо роторным колесом, расположенным перед ним на стороне всасывания, что, в свою очередь, приводит к уменьшению  $\tau_{\max}$ . При изменении осевого зазора  $\delta_{01}$  максимальная быстрота откачки остается практически постоянной, поскольку значение  $S_{\max}$  первого роторного колеса не меняется.

Практически осевой зазор между рабочими колесами выбирают исходя из условий монтажа. Для ТМН с рабочими колесами диаметром  $D_2 = 100 \dots 200$  мм принимают  $\delta_{01} = 1,0 \dots 1,2$  мм. Для насосов с рабочими колесами диаметром  $D_2 = 500 \dots 700$  мм зазор  $\delta_{01} \approx 2,0 \dots 2,5$  мм. Большие значения осевого зазора при увеличении наружного диаметра колес определяются возможным возникновением вибрации лопаток.

Для улучшения эффективности работы колес ТМН целесообразно назначать минимальные радиальные зазоры, учитывая при этом конструктивные особенности насоса. При увеличении отношения площади  $F_{з,р}$  сечения радиального зазора между роторным колесом и корпусом к торцевой площади  $F_{п,р}$  пазов или межлопаточных каналов рабочего колеса возрастает проводимость кольцевой щели  $U_z$ , а следовательно, и обратный поток через нее, что приводит к уменьшению максимально создаваемого и рабочего отношений давлений, а также быстроты откачки насоса. Необходимо стремиться к тому, чтобы отношение  $F_{з,р}/F_{п,р}$  не превышало 0,02.

При увеличении радиального зазора между валом и статорным колесом уменьшается максимальное отношение давлений, создаваемых роторными колесами,

вследствие возрастания обратных потоков газа через кольцевой зазор под действием перепада давления, при этом уменьшается  $\tau_{\max}$  ступени. Для обеспечения эффективной работы ступени с учетом ее конструктивных особенностей следует принимать  $F_{з,р}/F_{п,ст} = (4 \dots 6)10^{-3}$ .

**Оптимизация параметров ТМН и молекулярных вакуумных насосов.** Важными этапами разработки любого технического объекта или системы является синтез структуры, содержащей комплекс переменных параметров, и их оптимизация.

При создании высоковакуумных механических насосов (ВМН), отличающихся относительно высокой сложностью конструкции и трудоемкостью изготовления, важно обратить достаточное внимание на проблему повышения экономичности разработки без ухудшения количественных и качественных показателей.

Использование только одномерной модели оптимизации насосов на основе частных критериев оптимальности в виде наружного диаметра  $D_2$  колес или числа колес  $N$  в проточной части осевого ТМН не позволяет полностью выявить имеющиеся значительные резервы дальнейшего совершенствования откачных и эксплуатационных характеристик ВМН в целом. Поэтому несомненный интерес представляют универсальные методы многопараметрической оптимизации насосов на основе многокритериальной целевой функции.

Окончательный выбор способа решения поставленной задачи разработки ВМН определяется конкретными условиями технического задания.

При проектировании ВМН могут возникнуть следующие задачи:

- разработки ВМН, обладающего оптимальными характеристиками и показателями для заданных условий откачки;
- создания насоса, характеризующегося жесткими ограничениями для ряда основных факторов и улучшенными откачными параметрами;



– оптимизации характеристик насосов с известными параметрами для новых условий его функционирования.

Решение всех этих задач при современных требованиях к разрабатываемому оборудованию включает в себя оптимизацию по соответствующим критериям. Каждое из этих решений обладает рядом особенностей, определяющих выбор наиболее приемлемого для требуемых условий метода оптимизации.

В настоящее время известно достаточное число теоретических методов оптимизации, но все же, чтобы создавать оптимальные насосы в широком диапазоне изменений рабочих параметров, требуются дальнейшие исследования с целью разработки алгоритмов оптимизации функций качества, отличающихся различными видами экстремальных зон.

В каждом случае можно выделить три подзадачи оптимизации [34]:

- 1) классификацию целевой функции (определение ее характерных признаков);
- 2) поиск области глобального экстремума;
- 3) определение экстремума с помощью исследования найденной области методами локальной оптимизации.

Учитывая сложность конструкции ВМН, основанных на конструктивных схемах, присущих ТМН и молекулярным вакуумным насосам (МВН), а также сложность процессов, происходящих в проточной части, важное значение приобретают упрощенные математические модели, описывающие насосы, и алгоритмы расчетов, которые позволяют с достаточной точностью определить область оптимума целевой функции. Этой же цели служат выработанные практические рекомендации для конструирования.

Поиск экстремальных зон характеристик ВМН неизбежно связан с введением целого ряда ограничений, налагаемых на управляемые параметры насосов. Эти ограничения могут быть продиктованы как объективными причинами, исходя из физической сущности процессов в проточ-

ной части, так и субъективными вследствие возникновения проблем конструктивного или технологического характера.

Эти ограничения учитываются при рассмотрении соответствующих интервалов изменения параметров в процессе поиска оптимума или при использовании специальных методов, наиболее удобным из которых является метод штрафных функций. С его помощью можно привести задачу нахождения локального экстремума к безусловной оптимизации на основе выбранных критериев оптимизации.

При оптимизации конструкции и характеристик насоса начальный этап состоит в поиске критериев оптимизации и формировании функции качества разрабатываемого ВМН с учетом особенностей условий его эксплуатации.

**Определение оптимального закона изменения геометрических параметров колес в проточной части ВМН.** Важным преимуществом ТМН и МВН по сравнению с другими высоковакуумными насосами является практически постоянная и относительно высокая быстрота действия  $S_d$  в широком диапазоне изменения давления  $p$  газа на стороне всасывания. На протяженность диапазона влияют газовыделение во внутренней полости насоса и натекания, степень сжатия, а также нарушение молекулярного режима течения газа в определенном объеме проточной части, что, в свою очередь, зависит от геометрических размеров межлопаточных каналов и их откачных характеристик.

Существенный интерес представляют исследования с целью поиска соответствующего закона изменения геометрических параметров каналов в рабочем пакете колес оптимизированных ТМН.

Известные рекомендации для выбора геометрических размеров межлопаточных каналов  $\alpha$ ,  $a/b$ , обеспечивающие повышенное значение результирующей вероятности перехода молекул газа со стороны всасывания на сторону нагнетания  $k_{\max}$  или создаваемого отношения давлений



$\tau_{\max}$ , относятся в основном к колесам, размещенным на стороне всасывания ТМН либо на стороне его нагнетания.

Отношение давлений  $\tau_{\text{об}}$ , создаваемое ТМН в целом (общее), определяется рабочими значениями степени сжатия  $\tau$  с учетом имеющейся газовой нагрузки (внутренних газовыделений, натеканий, полезной быстроты откачки) в пакете колес ТМН. Поэтому выбор оптимальных параметров во всех колесах обеспечивает увеличение  $\tau_{\text{об}}$  и, следовательно, улучшение откачной характеристики насоса либо уменьшение числа рабочих колес, необходимого для достижения заданного  $\tau_{\text{об}}$  и, соответственно, снижение габаритных размеров проточной части ТМН.

Принцип определения оптимального закона изменения параметров межлопаточных каналов рабочих колес насоса состоит в выборе таких характеристик колес ТМН, при которых степень сжатия каждого колеса при определенной скорости откачки была бы максимальной.

Пусть  $S_i$  – рабочая быстрота откачки произвольного  $i$ -го колеса (рис. 9.83), создающая в нем отношение давлений  $\tau_i$ . Тогда на входе  $(i+1)$ -го колеса без учета дополнительных потоков должна быть обеспечена быстрота откачки  $S_{i+1}$ . Если данное колесо имеет те же параметры межлопаточных каналов, то в нем будет создано отношение давлений  $\tau'_{i+1}$ . Изменяя угол наклона пазов  $\alpha$  и их относительную ширину  $\frac{a}{b}$  в  $(i+1)$ -м колесе, стремятся к тому, чтобы при  $S_{i+1}$  отношение давлений  $\tau_{i+1}$  было бы больше, чем  $\tau'_{i+1}$  (см. рис. 9.83).

Оптимальным вариантом характеристик последующего колеса (или выбранных значений  $\alpha_{\text{опт}}$  и  $a/b_{\text{опт}}$ ) является тот, при котором  $\Delta\tau_{i+1} = \tau_{i+1} - \tau'_{i+1}$  принимает максимальное значение. Расчеты  $\alpha_{\text{опт}}$  и  $(a/b)_{\text{опт}}$  проводятся для каждого колеса последовательно, начиная от первого,

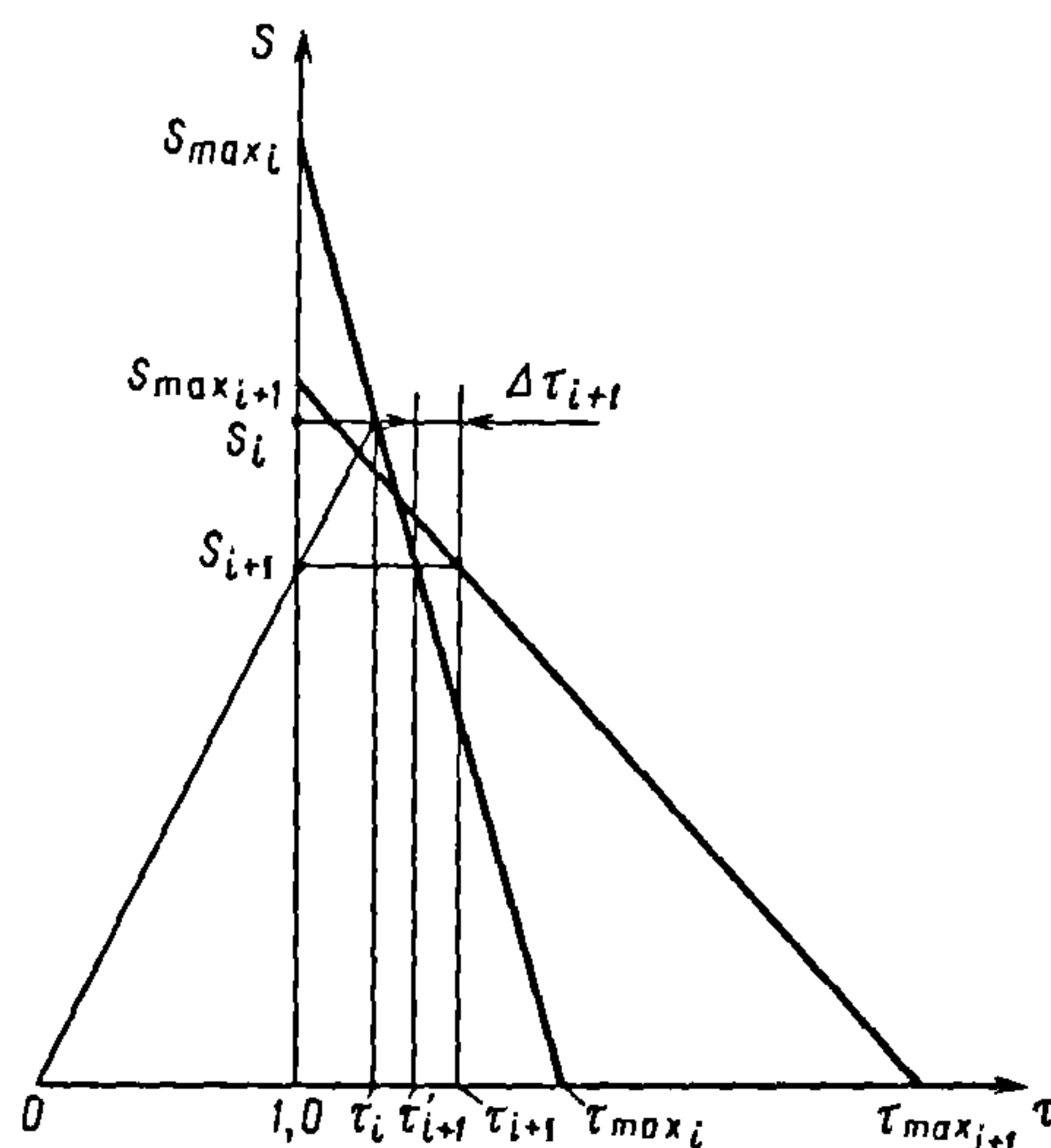


Рис. 9.83. Основные характеристики соседних колес в пакете ТМН

расположенного на стороне всасывания насоса, с учетом конкретных геометрических размеров (наружного диаметра колеса  $D_2$ , отношения внутреннего диаметра канала  $D_1$  к наружному  $\lambda = D_1/D_2$ , ширины колеса  $H$ , частоты вращения ротора, внутренних газовыделений, перетеканий через радиальные зазоры, а также возможного нарушения молекулярного режима течения газа).

Данную проблему можно решать методом последовательного изменения параметров  $\alpha$ ,  $a/b$ ,  $\lambda$  с заданным шагом и сравнения получаемых расчетных характеристик  $S = f(\tau)$  между собой; критерием для выбора решения является  $\Delta\tau_{i+1}$ . Получив в результате расчетов семейство таких оптимальных характеристик, можно найти огибающую их линию, которая и будет представлять собой геометрическое место точек, выражающих искомый закон изменения геометрических параметров межлопаточных каналов по ступеням ТМН.

На рис. 9.84 показаны расчетные зависимости относительной скорости откачки колес  $\bar{S}$  от создаваемого ими отношения давлений  $\tau$  по водороду для различных значений относительной проводимости

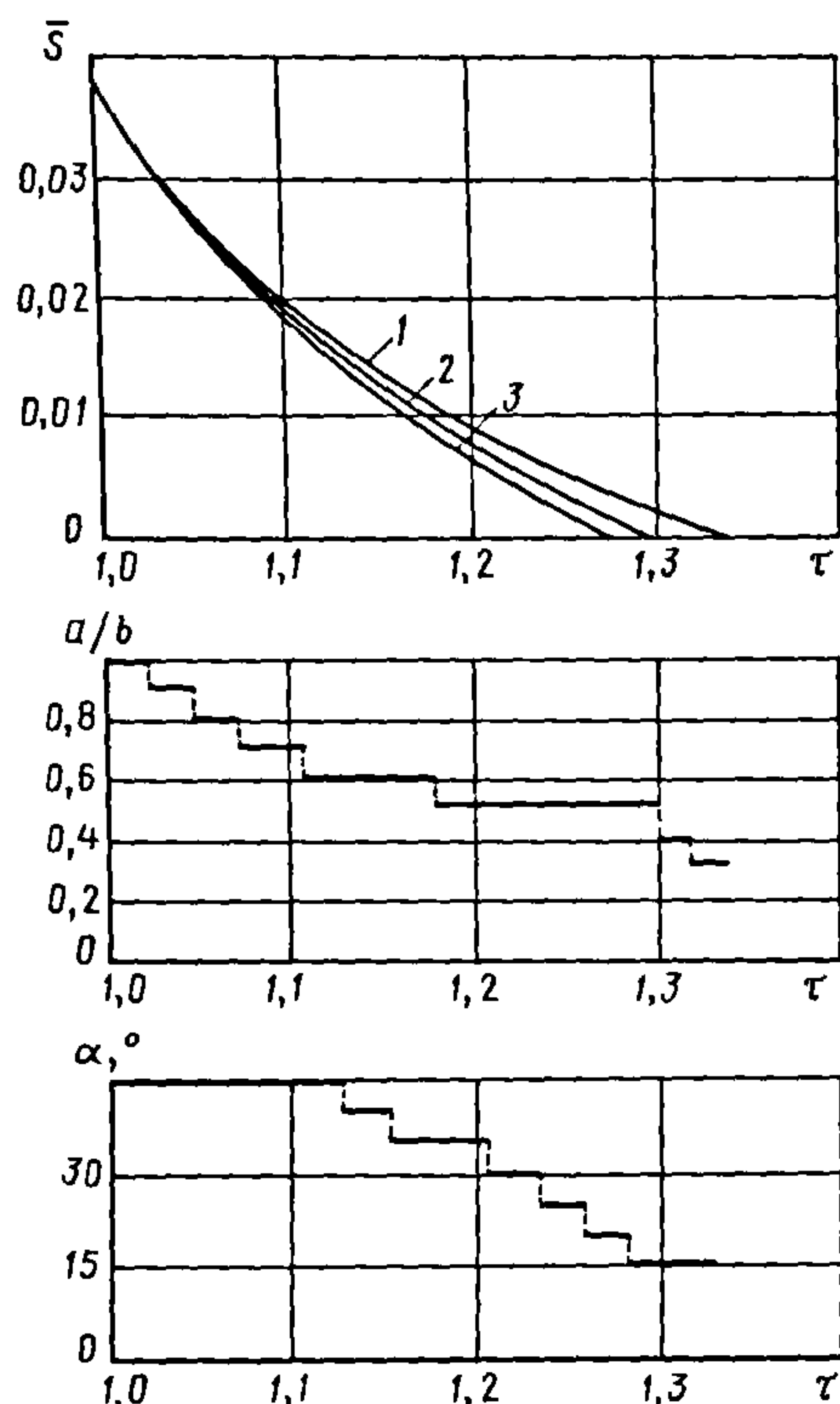


Рис. 9.84. Изменение основных параметров колес в проточной части ТМН с  $\lambda$  при значениях  $U_3/S_{\max I}$ :  
1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,2

кольцевого зазора  $\frac{U_3}{S_{\max I}} = 0; 0,1; 0,2$  ( $U_3$  –

абсолютное значение проводимости радиального зазора;  $S_{\max I}$  – максимальная быстрота откачки рабочего колеса, имеющего  $\alpha = 45^\circ, a/b = 1,0$ ). Безразмерный параметр  $\bar{S}_i$  определяется по уравнению:

$$\bar{S}_i = S_i \frac{16}{v_a \pi D_{2i}^2}, \quad (9.118)$$

где  $S_i$  – действительное значение быстроты откачки  $i$ -го колеса;  $v_a$  – среднеарифметическая тепловая скорость молекул;  $D_{2i}$  – наружный диаметр  $i$ -го колеса.

В расчетах, выполненных при условии соблюдения в проточной части насоса молекулярного режима течения газа, принималось, что допустимое напряжение в корневом сечении лопаток от действия

центробежных сил  $[\sigma] = 270$  МПа. Ширина колес  $H$  по радиусу оставалась постоянной, и относительная толщина лопаток составляла  $h_1/H = 0,2$ , где  $h_1$  – толщина лопатки в перпендикулярном к ее поверхности сечении. Расчетное значение средней окружной скорости составило 266 м/с при обеспечении запаса прочности  $k = 5$  в корневом сечении лопаток.

Каждая точка зависимости  $\bar{S} = f(\tau)$  принадлежит основной характеристике соответствующего колеса ТМН, т.е. для выбранных условий (рода газа, допустимого напряжения  $[\sigma]$ , относительных геометрических параметров) данная огибающая линия выражает закон изменения угла наклона лопаток  $\alpha_{\text{опт}}$  и относительной ширины канала  $(a/b)_{\text{опт}}$  по ступеням (в зависимости от создаваемого отношения давлений).

На рис. 9.84 графически показано изменение параметров  $\bar{S}$ ,  $(a/b)_{\text{опт}}$  и  $\alpha_{\text{опт}}$  от  $\tau$  для  $\frac{U_3}{S_{\max I}} = 0$  [шаг изменения относи-

тельной ширины канала  $\Delta(a/b)$  выбран равным 0,1, угол наклона лопаток  $\Delta\alpha = 5^\circ$ , относительный диаметр  $\lambda = 0,75$ ].

Как видно из графиков, для первых колес, расположенных на стороне всасывания насоса (работают при малых значениях  $\tau$ ), характерно существенное уменьшение  $(a/b)_{\text{опт}}$ : в диапазоне  $\tau$  от 1 до 1,13 параметр  $(a/b)_{\text{опт}}$  меняется в интервале 0,9...0,5, в то время как угол  $\alpha_{\text{опт}}$  остается постоянным и равным  $45^\circ$ . В последующих колесах, работающих при сравнительно высоких  $\tau$ , т.е. расположенных ближе к стороне нагнетания, угол  $\alpha_{\text{опт}}$  интенсивно уменьшается: от  $45$  до  $15^\circ$ . Относительная ширина каналов  $(a/b)_{\text{опт}}$  при этом изменяется менее существенно (от 0,5 до 0,3).

Поскольку применение в ТМН колес, имеющих различные геометрические размеры межлопаточных каналов, не всегда бывает экономически оправдано (возрастает трудоемкость изготовления колес, усложняется технологическая оснастка и



т.д.), было исследовано влияние на минимально необходимое число колес  $N_{об}$  состава пакетов проточной части ТМН.

Результаты расчетов дисковых колес с постоянной шириной канала по радиусу для  $S = 100, 200 \text{ дм}^3/\text{с}$ ,  $U_2 = 150 \text{ м/с}$  и двух значений давлений  $p = 2,6 \cdot 10^{-6}$  и  $1,33 \text{ Па}$  сведены в табл. 9.18 и 9.19; результаты расчетов лопаточных колес с переменной шириной каналов для  $S = 200, 400 \text{ дм}^3/\text{с}$ ,  $U_2 = 150, 200 \text{ м/с}$  и тех же значений давлений  $p$  — в табл. 9.20 и 9.21.

Из табл. 9.18 следует, что для заданной быстроты откачки по водороду  $S = 200$  при давлении  $p = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$  пакет дисковых колес с переменными геометрическими параметрами по ступеням ( $\alpha = 45 \dots 20^\circ$ ;  $a/b = 1,2 \dots 0,6$ ;  $\lambda = 0,6 \dots 0,8$ ) включает в себя 32 колеса. Переход на систему из трех пакетов с постоянными по пакетам  $\alpha$ ,  $a/b$  и  $\lambda$  ( $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 35^\circ$ ,  $\alpha_3 = 20^\circ$ ),  $(a/b)_1 = 1,2$ ;  $(a/b)_2 = 1$ ;  $(a/b)_3 = 0,6$ ;  $\lambda_1 = 0,6$ ;  $\lambda_2 = 0,6$ ;  $\lambda_3 = 0,8$ ) не приводит к увеличению числа колес.

Для давления всасывания  $p = 1,33 \text{ Па}$ , когда все колеса работают в молекулярно-вязкостном режиме течения газа, возможен переход на двухпакетную систему, причем  $\alpha_1 = 45^\circ$ ;  $\alpha_2 = 35^\circ$ ;  $(a/b)_1 = 1,2$ ;  $(a/b)_2 = 1$ ;  $\lambda_1 = 0,6$  (см. табл. 9.18), так как при этом  $N_{об}$  практически не изменяется.

Подобные данные получены для дисковых и лопаточных колес при различных значениях быстроты откачки  $S$  и окружной скорости  $U_2$  (см. табл. 9.19–9.21).

Следовательно, чтобы уменьшить трудоемкость изготовления насоса, рекомендуется применять трехпакетную компоновку проточной части ТМН для случая, когда в большей части пакета колес имеет место молекулярный режим течения газа с параметрами:

в первом пакете

$$\alpha_1 = 45^\circ, (a/b)_1 = 1,2 \dots 0,8, \lambda_1 = 0,6;$$

$$\text{во втором } \alpha_2 = 35^\circ, (a/b)_2 = 1,0 \dots 0,6, \lambda_2 = 0,65 \dots 0,7;$$

$$\text{в третьем } \alpha_3 = 20^\circ, (a/b)_3 = 0,6, \lambda_3 = 0,75 \dots 0,8.$$

В том случае, когда большая часть пакета колес находится в промежуточном режиме течения газа, целесообразен переход к двухпакетной компоновке, в которой используются следующие размеры межлопаточных каналов:

$$\alpha_1 = 45^\circ, (a/b)_1 = 1,2 \dots 0,8,$$

$$\lambda_1 = 0,6 \dots 0,8;$$

$$\alpha_2 = 35^\circ, (a/b)_2 = 1,0 \dots 0,6,$$

$$\lambda_2 = 0,65 \dots 0,75.$$

Влияние изменения  $\alpha$  и  $(a/b)$  на откачную характеристику ТМН было оценено при создании насоса.

**9.18. Варианты компоновки проточной части ТМН с дисковыми колесами при  $S = 200 \text{ дм}^3/\text{с}$  по водороду ( $U_2 = 150 \text{ м/с}$ ,  $D_2 = 215 \text{ мм}$ )**

Общее число колес $N_{об}$	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	Число колес в пакете $N$
$p = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}; p_n = 0,93 \text{ Па}$				
42	45	1,2	0,6	42
40	40	1,0	0,65	40
33	45	1,2	0,6	13 (1-й пакет)
	20	0,6	0,8	20 (2-й пакет)
32	45	1,2	0,6	7 (1-й пакет)
	35	1,0	0,7	8 (2-й пакет)
	20	0,6	0,8	17 (3-й пакет)
	45...20	1,2...0,6	0,6...0,8	32*

Окончание табл. 9.18

Общее число колес $N_{об}$	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	Число колес в пакете $N$
$p = 1,33 \text{ Па}; p_n = 46 \text{ Па}$				
28	45	1,2	0,6	28
26	40	1,0	0,65	26
28	45	1,2	0,6	21 (1-й пакет)
	20	0,6	0,8	7 (2-й пакет)
24	45	1,2	0,6	7 (1-й пакет)
	35	1,0	0,7	17 (2-й пакет)
	45...25	1,2...0,8	0,6...0,75	24*

\*Все колеса имеют разные геометрические размеры.

**9.19. Варианты компоновки проточной части ТМН с дисковыми колесами при  $S = 100 \text{ дм}^3/\text{с}$  по водороду ( $U_2 = 150 \text{ м/с}$ ,  $D_2 = 130 \text{ мм}$ )**

Общее число колес $N_{об}$	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	Число колес в пакете $N$
$p = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}; p_n = 0,93 \text{ Па}$				
29	45	1,2	0,7	29
27	40	1,0		27
24	45	1,2		18 (1-й пакет)
	20	0,6	0,8	16 (2-й пакет)
23	45...25	1,2...0,6	0,7...0,8	23*
$p = 1,33 \text{ Па}; p_n = 46 \text{ Па}$				
20	45	1,2	0,7	20
19	40	1,0		19
18	45	1,2		7 (1-й пакет)
	35	0,8	0,75	11 (2-й пакет)
	45...35	1,2...0,6	0,7...0,75	18*

\*Все колеса имеют разные геометрические размеры.

**9.20. Варианты компоновки проточной части ТМН с лопаточными колесами при  $S = 200 \text{ дм}^3/\text{с}$  по водороду ( $U_2 = 150 \text{ м/с}$ ,  $D_2 = 205 \text{ мм}$ )**

Общее число колес $N_{об}$	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	Число колес в пакете $N$
$p = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}; p_n = 0,93 \text{ Па}$				
45	45	0,8	0,6	45
41	40	0,6		41
34	45	0,8		11 (1-й пакет)
	20	0,6	0,75	23 (2-й пакет)
33	45	0,8	0,6	7 (1-й пакет)
	35	0,6	0,65	6 (2-й пакет)
	20		0,75	20 (3-й пакет)
	45...20	0,8...0,6	0,6...0,8	33*



Окончание табл. 9.20

Общее число колес $N_{об}$	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	Число колес в пакете $N$
$p = 1,33 \text{ Па}; p_n = 46 \text{ Па}$				
31	45	0,8	0,6	31
28	40	0,6		28
28	45	0,8		16 (1-й пакет)
	20	0,6	0,75	12 (2-й пакет)
26	45	0,8	0,6	7 (1-й пакет)
	35	0,6	0,65	19 (2-й пакет)
	45...25	0,8...0,6	0,6...0,75	26*

\*Все колеса имеют разные геометрические размеры.

**9.21. Варианты компоновки проточной части ТМН с лопаточными колесами при  $S = 400 \text{ дм}^3/\text{с}$  по водороду ( $U_2 = 200 \text{ м/с}$ ,  $D_2 = 240 \text{ мм}$ )**

Общее число колес $N_{об}$	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	Число колес в пакете $N$
$p = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}; p_n = 0,93 \text{ Па}$				
33	45	0,8	0,6	33
25			0,65	9 (1-й пакет)
	20	0,6	0,75	16 (2-й пакет)
24	45	0,8	0,6	6 (1-й пакет)
	35	0,6	0,65	3 (2-й пакет)
	20		0,75	15 (3-й пакет)
		45...20	0,8...0,6	0,6...0,8

$p = 1,33 \text{ Па}; p_n = 46 \text{ Па}$				
24	45	0,8	0,6	24
	40		0,8	
22	45		0,6	9 (1-й пакет)
	20	0,6		13 (2-й пакет)
20	45	0,8		6 (1-й пакет)
	35	0,6	0,65	14 (2-й пакет)
	45...25	1,0...0,6	0,6...0,75	20*

\*Все колеса имеют разные геометрические размеры.

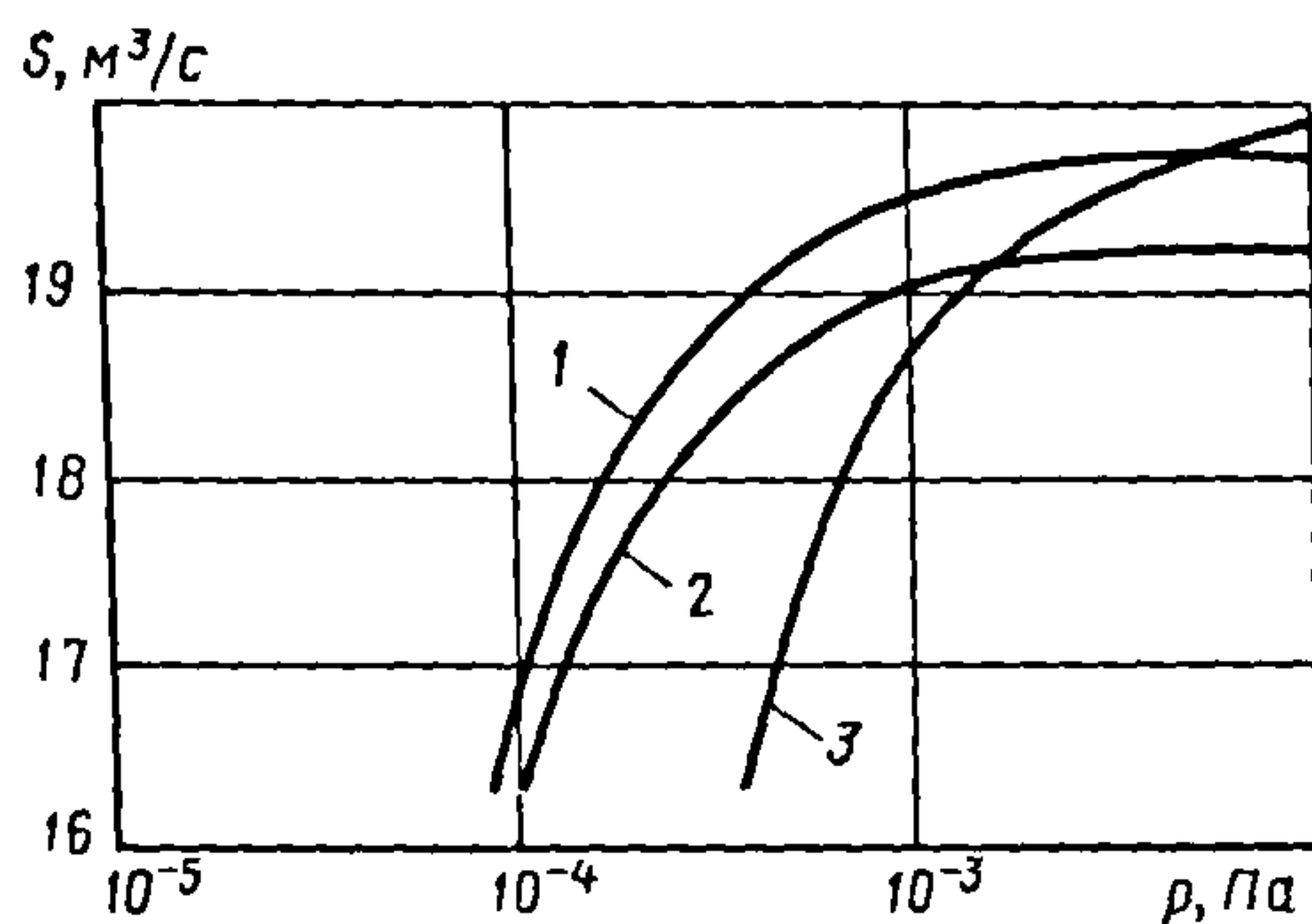


Рис. 9.85. Откачные характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса ТМН-20Т:

- 1 — переменная геометрия каналов в каждом колесе; 2 — трехпакетная структура; 3 — постоянная геометрия каналов в колесах

На рис. 9.85 представлены расчетные характеристики высокопроизводительного турбомолекулярного вакуумного агрегата ТМН-20Т при работе на водороде для трех вариантов компоновки пакетов насоса.

#### Расчетная характеристика насоса ТМН-20Т

Наружный диаметр рабочих колес $D_2$ , мм	1100
Начальный диаметр рабочей части лопатки $D_1$ , мм	760
Ширина лопатки колеса в осевом направлении $H$ , мм	20
Толщина лопатки $h$ , мм	3
Осевой зазор ступени $\delta_0$ , мм	6
Число колес:	
роторных	12
статорных	12
Радиальный зазор $\delta_r$ , мм	4
Частота вращения $f$ , с <sup>-1</sup>	100

Кривая 1 представляет собой откачную характеристику агрегата с переменной геометрией межлопаточных каналов для каждого колеса, причем угол  $\alpha$  менялся в диапазоне 40...15°, относительная ширина канала  $(a/b)_{\text{ср}}$  на среднем диаметре 0,89...0,4. Зависимость 2 определена для пакета, имеющего следующую структуру: первые восемь колес на стороне всасывания (по четыре роторных и статорных),  $\alpha = 40^\circ$ , число лопаток  $z = 90$ ,  $(a/b)_{\text{ср}} = 0,893$ ; следующая группа дисков —

(4 + 4),  $\alpha = 30^\circ$ , число лопаток  $z = 72$ ,  $(a/b)_{\text{ср}} = 0,864$ ; последняя группа — из восьми дисков, расположенных на стороне нагнетания (4 + 4),  $\alpha = 20^\circ$ , число лопаток  $z = 60$ ,  $(a/b)_{\text{ср}} = 0,683$ .

Характеристика 3 рассчитана для пакета, состоящего из колес, имеющих одинаковую геометрию межлопаточных каналов,  $\alpha = 40^\circ$ , число лопаток  $z = 72$ ,  $(a/b)_{\text{ср}} = 1,15$ .

Как видно из графиков, быстрота откачки агрегата с изменяющейся геометрией межлопаточных каналов для каждого колеса пакета существенно превышает  $S$  для пакета с постоянными  $\alpha$  и  $a/b$  в области низкого давления  $p < 10^{-3}$  Па. При этом минимальное давление всасывания меньше примерно на порядок. Уменьшение же различия между этими откачными характеристиками в области давления  $p > 5 \cdot 10^{-3}$  Па связано с обеспечением сравнительно малых значений отношений давлений при таких условиях и, следовательно, с меньшим влиянием рассматриваемых факторов на характеристику насоса.

Полученные результаты показывают, что есть реальная возможность улучшить параметры откачки ТМН путем изменения геометрических размеров межлопаточных каналов в отдельных ступенях. Эффективность влияния данного фактора на откачную характеристику зависит от реальных условий работы ТМН и должна оцениваться на начальных этапах проектирования насоса. Следует учитывать усложнение конструкции из-за увеличения типоразмеров колес ТМН. Однако исследования показывают, что существует тенденция к улучшению параметров откачки насоса при оптимальном изменении  $\alpha$  и  $a/b$  в колесах проточной части в соответствии с выявленным законом.

**Оптимизация проточной части ТМН.** Необходимость обоснованного выбора ТМН, оценки критериев сравнения с аналогами, определения возможности создания оптимизированного насоса, соответствующего условиям технического задания, — все это требует разработки на-



дежных и достаточно простых для реализации методов оптимизации. К таким методам прежде всего следует отнести алгоритмы расчета оптимальных геометрических размеров межлопаточных каналов, минимальных значений наружного диаметра колес ТМН, условного объема проточной части насоса.

Оптимизация проточной части ТМН на начальных стадиях проектирования связана с повышением откачной характеристики, которая зависит от основных параметров межлопаточных каналов в колесах. Существенное влияние на нее оказывают угол наклона межлопаточного канала или образующих его лопаток  $\alpha$ , а также относительное раскрытие или перекрытие торцового сечения канала  $a/b$ .

Использование полученных рекомендаций приводит к повышению создаваемого насосом отношения давлений  $\tau_{об}$  или к обеспечению заданного значения  $\tau_{об}$  при сравнительно малом числе колес в проточной части ТМН. Однако практическое применение указанных рекомендаций связано с рядом сложностей.

Реализация предложенного закона изменения геометрических параметров по ступеням ТМН требует сначала определить необходимое число колес в пакете насоса, которое, в свою очередь, зависит от выбранных значений  $\alpha$  и  $a/b$  различных ступеней. Эта проблема решается с помощью метода последовательных приближений, в котором, принимая неизменными по ступеням геометрические параметры каналов, определяют требуемое для данного случая число колес  $N$ ; затем, разбивая проточную часть насоса на определенное число групп колес с соответствующими геометрическими параметрами  $\alpha$  и  $a/b$ , осуществляют последовательную корректировку числа  $N$ .

Расчеты прекращаются при определении минимального значения  $N_{min}$  для заданных условий откачки. Формализация данного метода, однако, сопряжена со сравнительно большими затратами времени расчета.

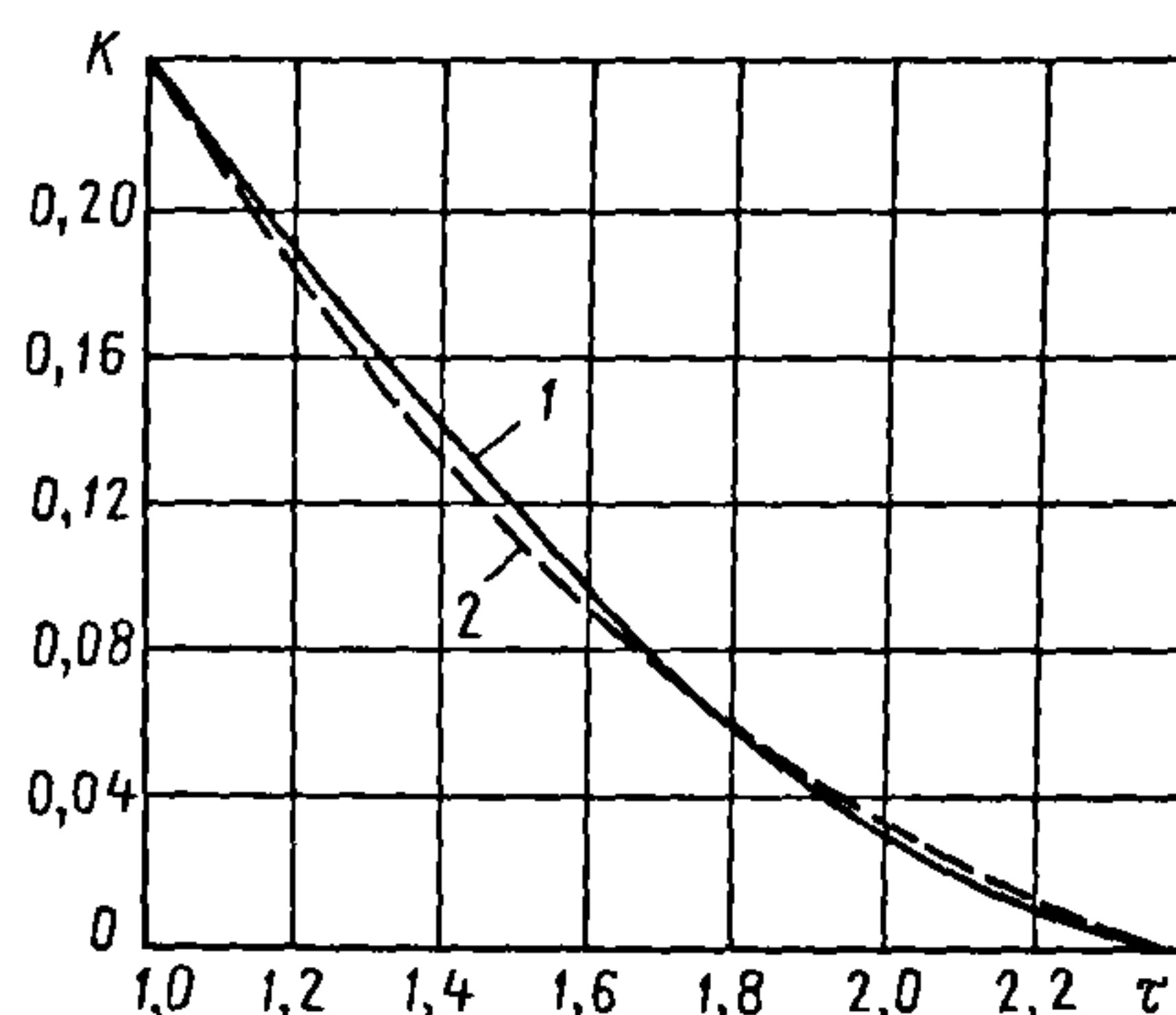


Рис. 9.86. Комплексные характеристики ТМН при  $U/v_n = 0,4$ :

1 — точное решение; 2 — результаты расчета по упрощенной модели

Возможно более точное определение минимального числа рабочих колес  $N_{min}$ , которое предусматривает поиск оптимальных геометрических параметров межлопаточных каналов последовательно для каждого колеса в пакете проточной части ТМН. Перебирая с заданным шагом различные значения  $\alpha_i$  и  $(a/b)_i$ , находят оптимальные значения  $\alpha_{opt i}$  и  $(a/b)_{opt i}$ . Критерием для их выбора является максимальное значение создаваемого данным колесом отношения давлений  $\tau_i$ .

Таким образом можно получить семейство основных характеристик колес  $K_i = f(\tau_i)$ , которые отличаются тем, что позволяют обеспечить минимальные рабочие параметры откачки  $K_i$  и  $\tau_i$  в рассматриваемом колесе.

На рис. 9.86 представлены расчетные зависимости  $K_i = f(\tau_i)$  для средней относительной окружной скорости канала  $U/v_n \approx 0,4$ , определенные по указанной методике с помощью ЭВМ.

Огибающая 1 для полученного семейства прямолинейных характеристик является геометрическим местом точек (точек касания с соответствующей характеристикой), представляющих собой максимальные текущие значения параметров откачки  $K_i$  и  $\tau_i$  колес в проточной части ТМН. Данная линия характеризует закон изменения оптимальных геометрических

параметров  $\alpha_{\text{опт } i}$  и  $(a/b)_{\text{опт } i}$  в пакете рабочих колес насоса.

Таким образом, определение подобной комплексной характеристики позволит спроектировать ТМН на заданные условия откачки с минимальным числом колес в проточной части.

В связи с тем что при конструировании рабочих колес с учетом существующей технологии изготовления часто возникает необходимость в корректировке геометрических размеров паза, возможны также некоторые, в ряде случаев даже значительные отклонения от  $\alpha_{\text{опт } i}$  и  $(a/b)_{\text{опт } i}$ . Это обстоятельство приводит к обязательным дополнительным поверочным расчетам для определения согласованности в работе различных ступеней насоса.

Поэтому использование для расчета огибающей некоторой эмпирической зависимости, обеспечивающей с достаточной степенью точности согласование определяемых откачных параметров, позволит значительно сократить время проектирования оптимизированного ТМН.

Полученная на основании исследований для этой цели зависимость имеет следующий вид:

$$\tau = ae^{bK} + c, \quad (9.119)$$

где  $\tau$  — рабочее отношение давлений, создаваемое произвольным колесом в пакете;  $K$  — вероятность перехода молекул через межлопаточный канал;  $a, e, c$  — эмпирические коэффициенты.

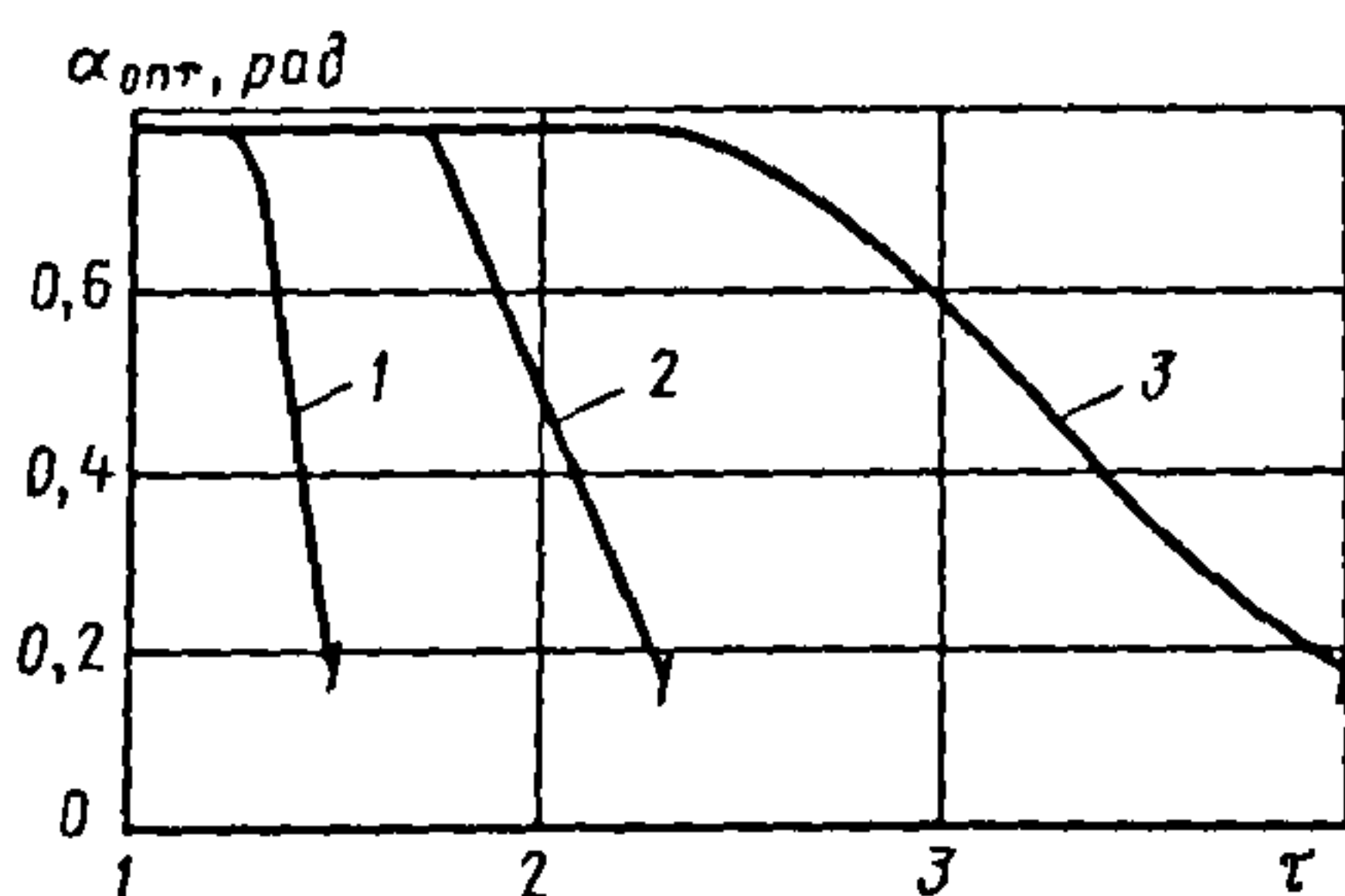


Рис. 9.87. Зависимости оптимальных значений углов наклона  $\alpha_{\text{опт}}$  от степени сжатия  $\tau$  при:  
1 —  $U/v_n = 0,2$ ; 2 —  $U/v_n = 0,4$ ; 3 —  $U/v_n = 0,6$

Коэффициенты  $a$  и  $c$  определяются из следующих граничных условий:  $\tau = 1$  при максимально возможной для принятой относительной скорости  $U/v_n$  вероятности  $K_{\text{max } l}$  перехода молекул через канал колеса, размещенного на стороне всасывания насоса;  $K = 0$  при условии обеспечения максимально возможного отношения давлений  $\tau_{\text{max } n}$ , создаваемого каналами колес, расположенных на стороне нагнетания ТМН.

Тогда из приведенного уравнения

$$a = \frac{\tau_{\text{max } n} - 1}{1 - e^{bK_{\text{max } l}}}, \quad c = \frac{1 - \tau_{\text{max } n}e^{bK_{\text{max } l}}}{1 - e^{bK_{\text{max } l}}}.$$

Вероятность  $K_{\text{max } l}$  определяется для  $\alpha = 45^\circ$ ,  $a/b = 1,2 \dots 1$ ; отношение давлений  $\tau_{\text{max } n}$  при  $\alpha = 10^\circ$ ,  $a/b = 0,4 \dots 0,5$ . Значение эмпирического коэффициента  $b$  выбирается в диапазоне  $b = -5 \dots -9$  (для  $U/v_n = 0,6$  коэффициент  $b = -5$ , для  $U/v_n = 0,2$  коэффициент  $b = -9$ ).

Как показало сравнение результатов расчета огибающей, выполненного с помощью анализа параметров каждого колеса и предложенной эмпирической зависимости, максимальное расхождение в интервале  $U/v_n = 0,2 \dots 0,6$  не превысило 25 %. Характеристика для  $U/v_n = 0,4$ , рассчитанная с помощью предложенного уравнения, графически показана на рис. 9.86 штриховой линией.

На рис. 9.87 и 9.88 приведены результаты расчетов закона изменения геометрических параметров  $\alpha_{\text{опт } i}$  и  $(a/b)_{\text{опт } i}$

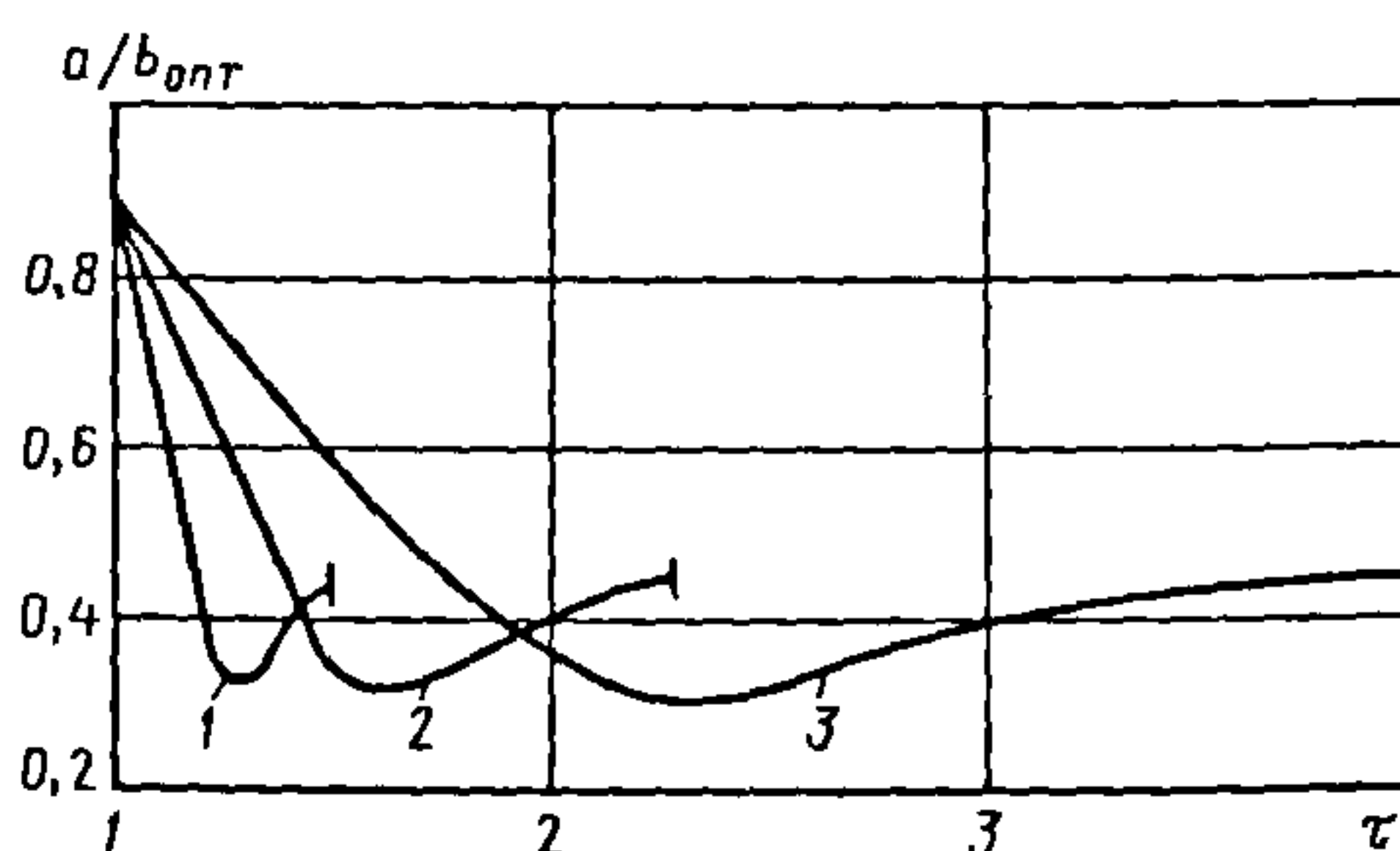


Рис. 9.88. Зависимости оптимальных значений относительной ширины  $(a/b)_{\text{опт}}$  от степени сжатия  $\tau$  при:  
1 —  $U/v_n = 0,2$ ; 2 —  $U/v_n = 0,4$ ; 3 —  $U/v_n = 0,6$



в проточной части насоса на основании анализа огибающей семейства основных характеристик ТМН  $K_i = f(\tau_i)$ .

Как видно из графиков, при увеличении отношения давлений  $\tau$  оптимальное значение угла наклона  $\alpha_{\text{опт}}$  остается постоянным в некотором диапазоне (при увеличении  $U/v_n$  протяженность этого диапазона возрастает), а затем снижается. При этом изменение  $\alpha_{\text{опт}}$  происходит от  $45^\circ$  до  $10^\circ$ . Оптимальные значения относительной ширины межлопаточного канала  $(a/b)_{\text{опт}}$  сначала уменьшаются от 0,9 до 0,3, а затем незначительно возрастают — до 0,45 (при сравнительно малых углах наклона  $\alpha_{\text{опт}}$ ). Причем определенному сочетанию геометрических параметров межлопаточных каналов  $\alpha_{\text{опт}}$  и  $(a/b)_{\text{опт}}$  соответствует максимальное значение  $\tau$ .

Порядок расчета  $\alpha_{\text{опт}}$  и  $(a/b)_{\text{опт}}$  по предложенной методике следующий. При проектировании ТМН рассчитываются с помощью полученной зависимости значения  $K_i$  и  $\tau_i$  последовательно для каждого колеса с учетом влияния на них перетеканий через радиальные зазоры и газовыделений с внутренних поверхностей. При этом, зная результаты анализа комплексной характеристики (огибающей), определяют оптимальные геометрические параметры  $\alpha_{\text{опт}i}$  и  $(a/b)_{\text{опт}i}$ , позволяющие обеспечить требуемое общее отношение давлений насоса при минимальном числе колес в проточной части ТМН.

**Определение оптимальных геометрических размеров проточной части ТМН.** Реализация полученного закона изменения геометрических размеров межлопаточных каналов в пакете ТМН дает возможность определить варианты компоновки проточной части насоса со сравнительно малым числом дисков  $N$ , обеспечивающих требуемое отношение давлений газа. Однако только один этот фактор не гарантирует еще оптимизацию параметров насоса в целом.

Более емким критерием для выбора оптимального варианта компоновки про-

точной части ТМН может быть минимальное значение условного объема пакета колес  $A_{\text{мин}} = \frac{\pi}{4} D_{2\text{опт}}^2 N_{\text{опт}}$ , где  $D_{2\text{опт}}$  и  $N_{\text{опт}}$  — оптимальные наружный диаметр колес и их число в пакете.

Наличие минимума параметра  $A$  обусловлено тем, что при увеличении в широком диапазоне наружного диаметра  $D_2$  (больше, чем значение  $D_{2\text{мин}}$ , определенное для заданной быстроты откачки  $S$  из условия требуемой прочности) число колес  $N$ , необходимое для обеспечения заданной степени повышения давления  $\tau$ , уменьшается.

Такое изменение  $N$  объясняется снижением влияния на  $S$  газовыделений с внутренних поверхностей насоса, перетеканий через радиальные зазоры и возможным нарушением молекулярного режима течения в проточной части насоса, а также ростом окружной скорости вращения на среднем радиусе рабочего колеса ТМН.

На рис. 9.89 представлены зависимости комплекса  $A$  от диаметра  $D_2$  при условии обеспечения различных значений быстроты откачки (давление всасывания  $p = 2,67 \cdot 10^{-6}$  Па) и значений окружной скорости на периферии колеса  $U_2 = 150$  и  $200$  м/с.

Исследования были выполнены для дисковых и лопаточных колес (результаты для дисковых колес показаны сплошными линиями, для лопаточных — штриховыми). Материал колес — дюралюминий марки Д16. Осевые и радиальные зазоры  $\delta$  принимались равными 1 мм, ширину колес и толщину лопаток выбирали в зависимости от диаметра при условии обеспечения в корневом сечении лопаток запаса прочности  $k = 5$  с учетом современных технологических требований. Давление газа на стороне нагнетания определяли с учетом откачных характеристик соответствующих форвакуумных насосов с масляным уплотнением.

Расчеты проводили по следующей методике. Для выбранных параметров откачки находили минимальный диаметр  $D_{2\text{мин}}$ .

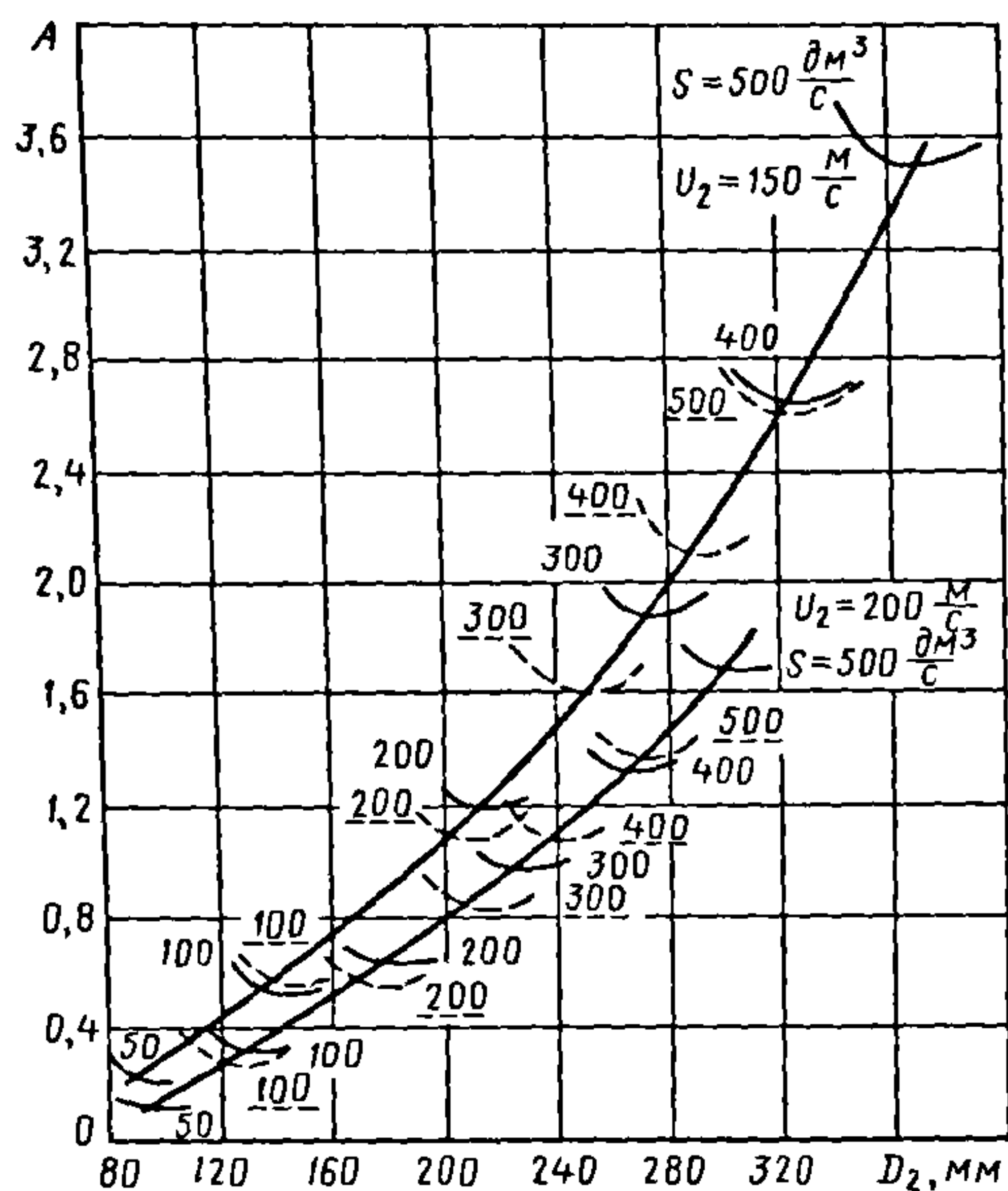


Рис. 9.89. Расчетные зависимости оптимальных значений условного объема  $A$  при  $p = 2,67 \cdot 10^{-6}$  Па от диаметра  $D_2$  колес:

— — — — — дисковых;  
- - - - - лопаточных

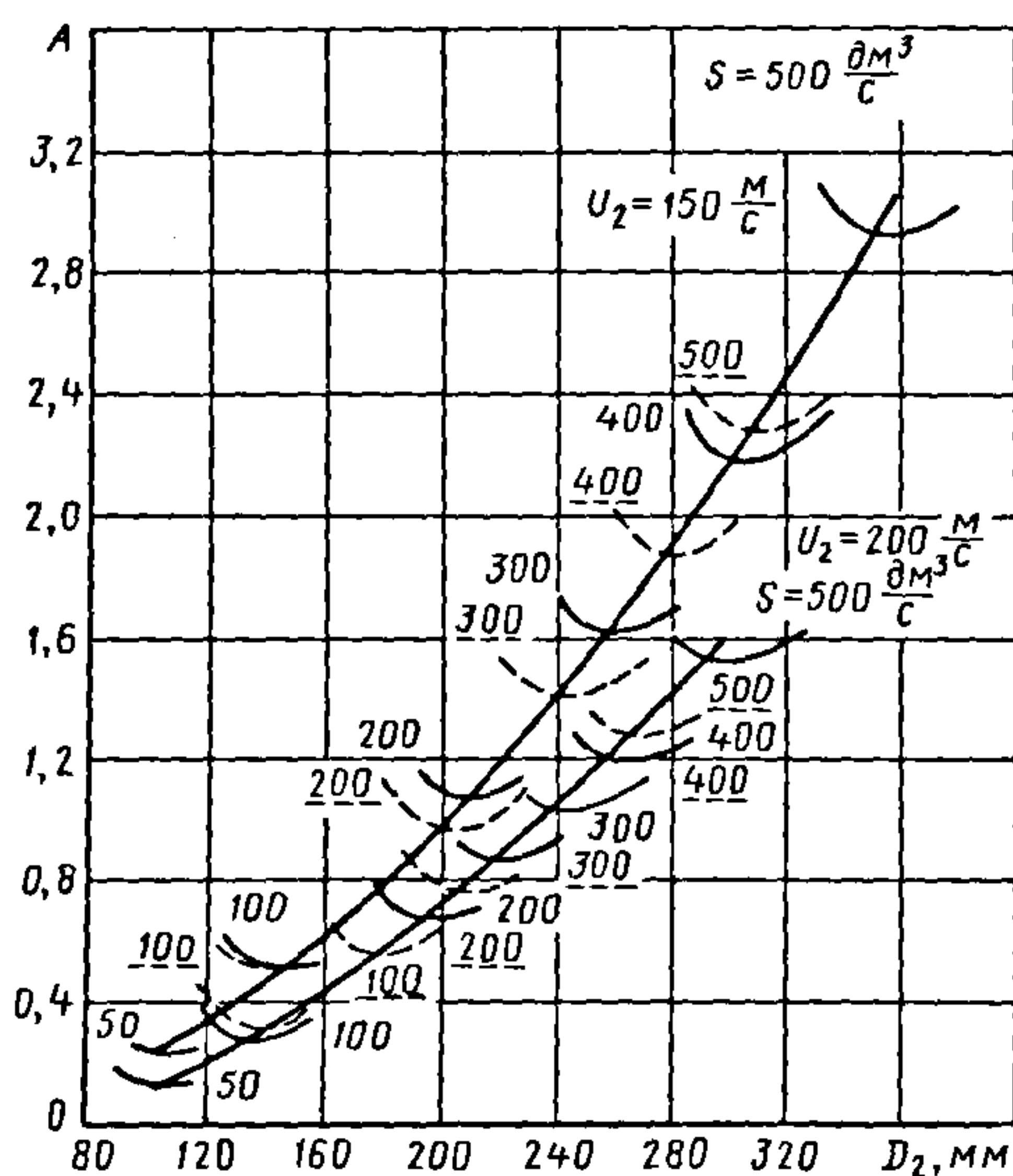


Рис. 9.90. Расчетные зависимости оптимальных значений условного объема  $A$  при  $p = 6,67 \cdot 10^{-6}$  Па от диаметра  $D_2$  колес:

— — — — — дисковых;  
- - - - - лопаточных

Затем из условия согласованной работы колес рассчитывали оптимальные геометрические размеры межлопаточных каналов  $\alpha_{\text{опт}}$ ,  $(a/b)_{\text{опт}}$  и  $\lambda_{\text{опт}}$  последовательно для каждого колеса, расположенного в пакете; соответственно определяли по предложенной методике минимальное число рабочих и статорных колес, необходимое для создания требуемой степени повышения давлений. Расчеты повторяли для других значений  $D_2 > D_{2\text{мин}}$ .

Как видно из графиков на рис. 9.89, при обеспечении заданного значения  $S$  существует такой оптимальный  $D_{2\text{опт}}$ , при котором условный объем пакета колес ТМН имеет минимум  $A_{\text{опт}}$ . Следовательно, ТМН при этих условиях будет иметь минимальные габаритные размеры, причем при увеличении окружной скорости рабочих колес  $U_2$  и переходе к лопаточным рабочим колесам минимальное значение параметра  $A_{\text{опт}}$  и соответствующий ему  $D_{2\text{опт}}$  для заданной быстроты откачки уменьшаются.

На рис. 9.90 приведены расчетные зависимости для определения оптимальных значений  $A_{\text{опт}}$  и  $D_{2\text{опт}}$  для дисковых и лопаточных колес при  $p = 6,67 \cdot 10^{-6}$  Па.

В табл. 9.22 и 9.23 приведены результаты расчетов по определению закона изменения геометрических размеров межлопаточных каналов  $\alpha$ ,  $a/b$  и  $\lambda$  пакета колес ТМН с оптимальным параметром  $A_{\text{опт}}$ , имеющего  $S = 200 \text{ дм}^3/\text{с}$ ,  $U_2 = 150 \text{ м/с}$ , при различных условиях работы.

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что в целом практические рекомендации по выбору размеров каналов, полученные для молекулярного режима течения газа в проточной части, достаточно хорошо согласуются с результатами расчетов для случаев, связанных с нарушением указанного режима в колесах. При этом для первых трех-четырех колес, расположенных на стороне всасывания, следует принимать геометрические параметры межлопаточных каналов  $\alpha = 45^\circ$ ,  $a/b = 1,2 \dots 0,8$  и  $\lambda = 0,6$ .



## 9.22. Определение структуры проточной части ТМН, содержащей дисковые колеса

№	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	№	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	
$p = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па				12	30	0,6	0,75	
1-4	45	1,2	0,6	13	25	0,8	0,75	
5-6		1,0		14		0,6	0,8	
7			0,65	15	30			
8		16		25				
9	40	17		30				
10-11	35	18		25				
12-13	30	19		30				
14	25	0,8	20	25				
15		0,75	$p = 1,3$ Па					
16		0,6	0,8	1-3	45	1,2	0,6	
17				30		4-5		1,0
18	25			6		0,65		
19	20	0,8	0,6	7	40	0,8	0,7	
20	25	0,6	0,8	8-9				35
21	20	0,8		10-11				30
22-31		12-15		25				
32	25	0,6		16	30			
$p = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па				17	35		0,75	0,7
1-3	45	1,2	0,6	18-19	30			
4-5	40	1,0		20				
6			0,65	21		25		
7	45	0,8		22-23		25		
8-9	35		0,7	24	25			
10-11	30		0,75					

## 9.23. Определение структуры проточной части ТМН, содержащей лопаточные колеса

№	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	№	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	
$p = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па				23-32	20	0,6	0,75	
1-7	45	0,8	0,6	33				
8	40	0,6		0,6	$p = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па			
9	35		1-3		45	0,8	0,6	
10	30		0,65	4-5		40		
11			0,7	6	35			
12	25			0,75		7		30
13			8...9		25	0,65		
14-15	20		0,8	10				20
16			0,75	11	25	0,75		
17			0,8	12				20
18			0,75	13	0,75			
19			0,8	14		0,8		
20			0,75	15			0,75	
21			0,8	16				
22								

Окончание табл. 9.23

№	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$	№	$\alpha, ^\circ$	$a/b$	$\lambda$
$p = 1,3 \text{ Па}$							
1-4	45	0,8	0,6	16	30	0,6	0,7
5-6		0,6		17			0,65
7-8	40			18			0,7
9	35			19			0,65
10-11			20	0,7			
12	30	0,65	21	25	0,65		
13	35		22...25		0,7		
14-15	30		26	30	0,75		

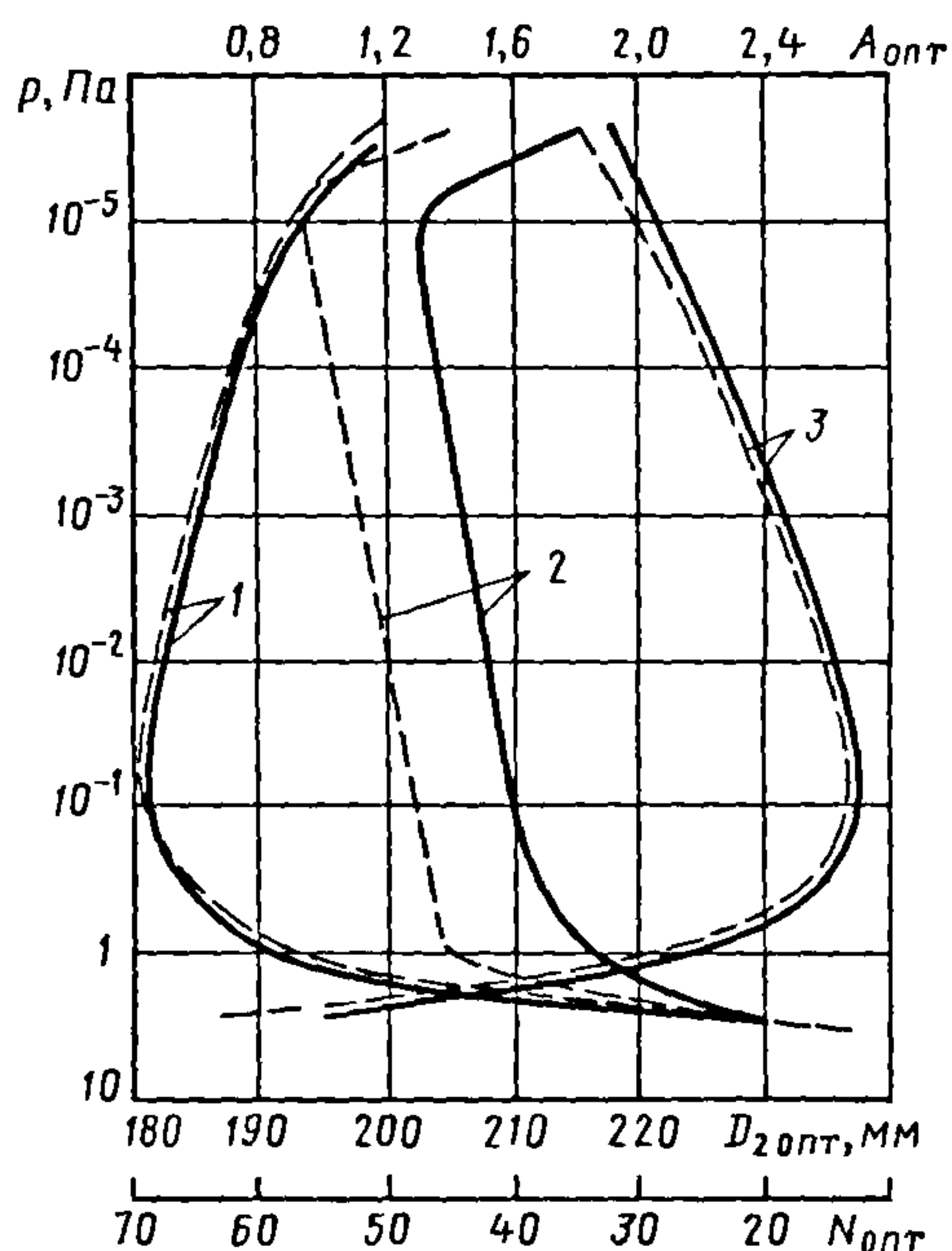


Рис. 9.91. Оптимальные параметры  
проточной части ТВН с  $S = 200 \text{ дм}^3/\text{с}$ :

1 —  $A_{\text{опт}}$ ; 2 —  $D_{2\text{опт}}$ ; 3 —  $N_{\text{опт}}$ ;  
 ————— — дисковые колеса;  
 - - - - - — лопаточные колеса

Значение угла наклона пазов несколько больше обычно рекомендуемых в связи с тем, что создаваемое отношение давлений близко к 1, и, следовательно, на этих колесах для компенсации влияния газовыделений необходимо повысить быстроту откачки. В последующих колесах параметры межлопаточных каналов ме-

няются в диапазоне  $\alpha = 45 \dots 20^\circ$ ,  $a/b = 1,2 \dots 0,6$  и  $\lambda = 0,6 \dots 0,8$ , причем для второй половины колес  $a/b$  и относительный диаметр  $\lambda$  остаются практически неизменными:  $a/b = 0,8 \dots 0,6$  и  $\lambda = 0,8 \dots 0,75$ .

На рис. 9.91 представлены расчетные зависимости оптимальных параметров  $A_{\text{опт}}$ ,  $D_{2\text{опт}}$ ,  $N_{\text{опт}}$  от давления всасывания  $p$  с учетом газовыделений и перетеканий для быстроты откачки  $S = 200 \text{ дм}^3/\text{с}$  и окружной скорости лишь дисковых или только лопаточных колес  $U_2 = 150 \text{ м/с}$ .

Полученные результаты позволяют рассчитать ТМН с минимальными габаритными размерами проточной части на заданную быстроту откачки, обеспечиваемую им в требуемом диапазоне давлений всасывания. Для этого необходимо определить зависимость  $A_{\text{опт}} = f(p)$  в заданном интервале давлений, в котором должна быть достигнута нужная быстрота откачки; затем по большему значению параметра  $A_{\text{опт}}$  надо найти соответствующие оптимальные для требуемых условий наружный диаметр  $D_{2\text{опт}}$  и число колес ТМН  $N_{\text{опт}}$ . При этом во всем заданном интервале давлений газа на всасывании быстрота откачки будет не менее необходимой и обеспечиваются минимальные размеры проточной части насоса.

Данный метод позволяет рассчитать оптимальные геометрические размеры проточной части ТМН в целом при заданной быстроте откачки в требуемом диапазоне давлений газа на стороне всасывания,



включая случаи нарушения молекулярного режима течения в межлопаточных каналах колес.

Таким образом, метод обеспечивает оптимизацию параметров при выборе в качестве критериев оптимальности только частных критериев (быстроты откачки, отношения давлений, условного объема проточной части и т.п.) даже на начальных стадиях разработки насоса, когда необходимо выбрать наилучший для заданных условий вариант конструктивной схемы.

Кроме того, преимущество данного метода состоит в том, что он может использоваться при автоматизации инженерных расчетов в процессе проектирования и даже в САПР для выполнения структурной оптимизации создаваемого ВМН.

**Расчет откачной характеристики ТМН.** Откачная характеристика ТМН определяется предельным остаточным давлением, рабочей быстротой действия и форвакуумным давлением.

Предельное остаточное давление, создаваемое ТМН при молекулярном режиме течения газа на стороне нагнетания, зависит от числа ступеней; потоков газовой выделения с внутренней поверхности корпуса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания; быстроты действия насоса, а также от степени герметичности рабочей полости насоса. На рабочей скорости действия насоса сказывается геометрия межлопаточных каналов или пазов колес и согласованность их характеристик.

Конструктивное исполнение ТМН обеспечивает сравнительно высокую герметичность рабочей полости, поэтому предельное остаточное давление прежде всего зависит от потоков газовой выделения с внутренней поверхности корпуса, участка вала, расположенного в полости всасывания, а также с торцовых поверхностей рабочих колес, обращенных к полости всасывания.

В настоящее время корпуса ТМН, как правило, изготавливают из хромоникеле-

вой коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, а рабочие колеса — из алюминиевых сплавов. Результаты исследований газовой выделения хромоникелевых коррозионно-стойких сталей показали, что потоки газовой выделения и состав выделяемых газов зависят от параметров шероховатости обработанной поверхности, температуры прогрева ее в высоком вакууме, а также наличия оксидных пленок.

Средний удельный поток газовой выделения для коррозионно-стойкой стали с тщательно очищенной поверхностью после прогрева в высоком вакууме составляет  $3,0(10^{-8} \dots 10^{-10}) \text{ Па} \cdot \text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . Поток газовой выделения с поверхности алюминиевых сплавов определяется также химическим составом, структурой, температурой и временем обезгаживания поверхности, оксидными пленками. Средний удельный поток газовой выделения с поверхности алюминиевых сплавов после прогрева в высоком вакууме составляет  $(2,0 \dots 5,0) \times 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

Предельное остаточное давление, Па, которое может получить ТМН, без учета натекания газа при возможной малой негерметичности определяют по формуле

$$p_o = \sum F_i q_i / S, \quad (9.120)$$

где  $F_i$  — площадь участка поверхности газовой выделения,  $\text{м}^2$ ;  $q_i$  — удельный поток газовой выделения,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  $S$  — рабочая быстрота действия насоса,  $\text{м}^3 / \text{с}$ .

Общее отношение давлений для насоса

$$\tau_{об} = p_{\phi} / p_o = \prod_{i=1}^n \tau_i, \quad (9.121)$$

где  $p_{\phi}$  — форвакуумное давление;  $\tau_i$  — рабочее отношение давлений для  $i$ -го колеса.

Быстрота откачки  $i$ -го рабочего колеса

$$S_{oi} = S_i + U_i(\tau_i - 1,0), \quad (9.122)$$

где  $S_i = S_n + Q_{гв.вс} / p_i$  — объем газа, поступающего на первое колесо из области перед ним (всасывающая полость насоса,  $Q_{гв.вс} / p_i$ , объем газа из откачиваемого

объекта, откачиваемого первым и всеми последующими рабочими колесами насоса);  $S_n$  – заданная быстрота действия насоса;  $Q_{гв.вс}$  – поток газовой выделения на всасывании;  $p_1$  – давление всасывания;  $U_1(\tau_1 - 1,0)$  – объем газа, перетекающего через радиальный кольцевой зазор и откачиваемого только первым колесом.

Проводимость кольцевого радиального зазора

$$U_1 = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \frac{ab^2}{l} \Gamma'', \quad (9.123)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль;  $a$  – периметр окружности колеса, м;  $b$  – радиальный зазор, м;  $l$  – ширина колеса, м;  $\Gamma''$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров зазора (рис. 9.92).

Для азота при  $T = 293$  К проводимость  $U_1 = 314ab^2\Gamma''/l$ . Для  $i$ -го рабочего колеса  $S_{oi} = S_i + S_i(\tau_i - 1,0)$ , где

$$S_i = S_{i-1}/\tau_{i-1} + Q_{гв.пр i}/p_i; \quad (9.124)$$

$$Q_{гв.пр i} = \sum_{j=1}^{i-1} F_{ji} q_{ji} - \quad (9.125)$$

поток газовой выделения с поверхностей между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м колесами;  $p_j$  – давление всасывания для  $i$ -го колеса;  $j$  – порядковый номер участка поверхности газовой выделения перед  $i$ -м колесом.

Рабочее отношение давлений для  $i$ -го колеса с учетом перетеканий газа и газовой выделения можно определить по формуле

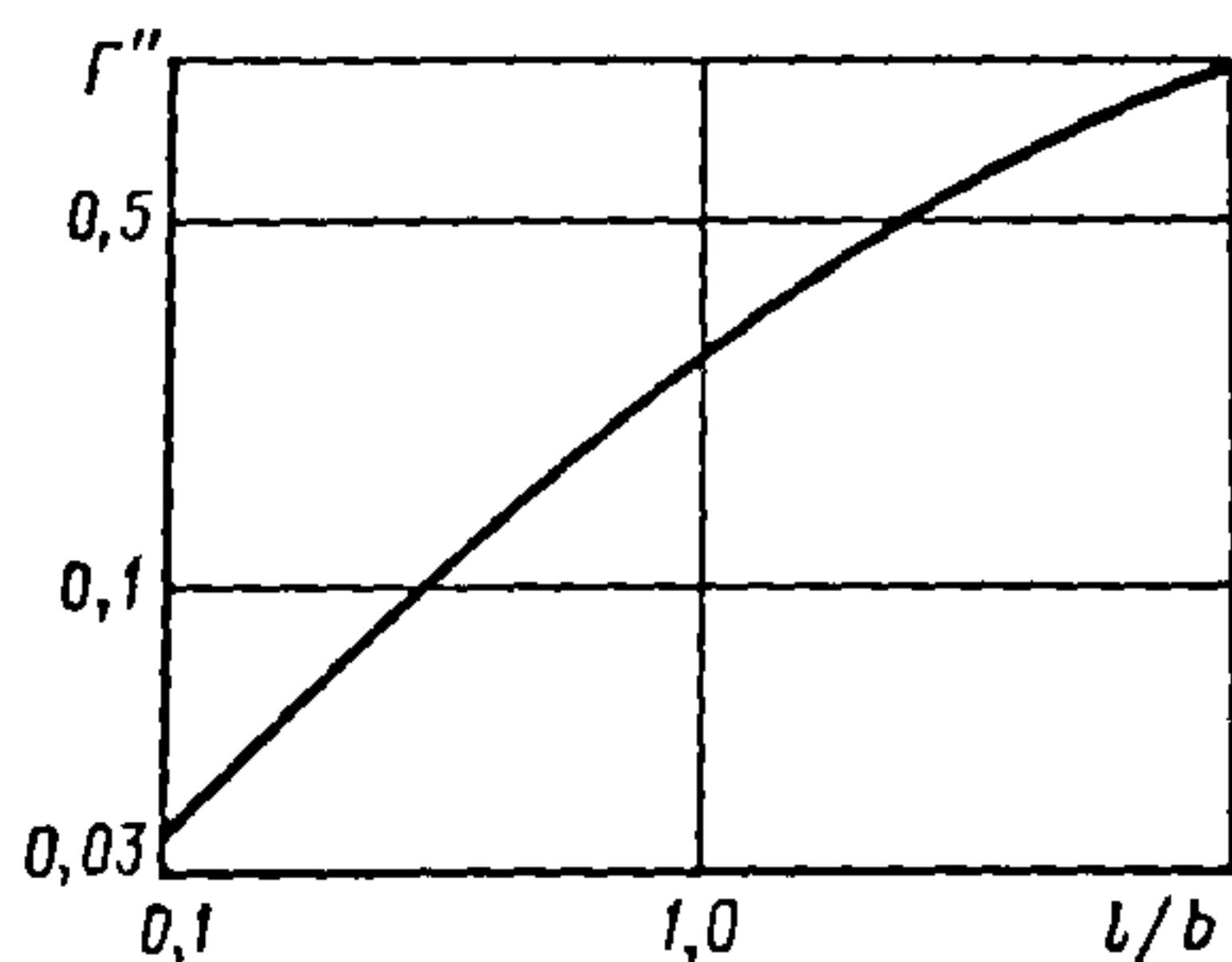


Рис. 9.92. Зависимость коэффициента  $\Gamma''$  от отношения  $L/b$  для щелевых каналов при молекулярном течении газа

$$\tau = \tau_{\max i} - \frac{S_i}{S_{\max i}}(\tau_{\max i} - 1,0), \quad (9.126)$$

где  $\tau_{\max i}$  – максимальное отношение давлений для  $i$ -го колеса.

При учете перетеканий газа через радиальный зазор

$$\tau_{\max i} = \frac{S_{\max i} \tau_{\max i} + U_i(\tau_{\max i} - 1,0)}{S_{\max i} + U_i(\tau_{\max i} - 1,0)}. \quad (9.127)$$

Определение откачной характеристики ТМН основано на согласованности последовательно работающих роторных и статорных колес, характеризуемой уравнением потока  $Q = Sp$ .

Результаты теоретического исследования влияния на откачную характеристику ТМН геометрии межлопаточных каналов рабочих колес, а также основных параметров показывают, что предельное остаточное давление, создаваемое ТМН, определяется потоком газовой выделения с внутренней поверхности корпуса насоса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания (при пренебрежении натеканием газа из окружающей среды и возможно малой негерметичности ТМН), рабочей быстротой действия и числом ступеней. Применение в ТМН рабочих колес с малыми углами  $\alpha$  наклона паза или лопаток в последних ступенях приводит к уменьшению предельного остаточного давления только при малом газовой выделении по сравнению с быстротой действия.

При относительно больших потоках газовой выделения для улучшения откачной характеристики ТМН следует выбирать открытую структуру межлопаточных каналов рабочих колес с углом  $\alpha = 35...40^\circ$ , так как достижение минимального давления в этом случае возможно только при увеличении рабочей быстроты действия насоса.

Критерием для выбора оптимального варианта проточной части ТМН при заданных условиях служит минимальный условный объем пакета рабочих колес  $V_y = 0,25\pi D_2^2 N$ , поскольку при увеличе-



нии наружного диаметра  $D_2$  по сравнению с его минимальным значением, определяемым исходя из прочности, число колес  $N$ , необходимое для достижения заданного отношения давлений, уменьшается вследствие снижения влияния на быстроту действия и отношения давлений газовой выделения с внутренних поверхностей насоса и перетеканий через радиальные зазоры.

При нарушении молекулярного режима течения газа в проточной части (смещение рабочей зоны характеристики насоса при эксплуатации в область повышенного давления) число колес надо увеличить. Проточную часть ТМН рекомендуется выполнять двух- или трехсекционной, причем в первой секции следует применять рабочие колеса с открытой структурой межлопаточных каналов ( $\alpha = 35...40^\circ$ ;  $a/b \approx 1,0...1,4$ ), а в последней – колеса с  $\alpha = 10...20^\circ$ ;  $a/b \approx 0,6...0,8$ .

Форвакуумный насос должен обеспечивать молекулярный режим течения газа за последним рабочим колесом на стороне нагнетания ТМН. При этом во всем диапазоне изменения давления всасывания ТМН быстрота действия форвакуумного насоса не должна быть меньше быстроты действия ТМН, приведенной к условиям нагнетания.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований характеристик ТМН показывают, что при повышении давления всасывания примерно до  $p = 1,0...0,1$  Па в рабочих колесах насоса возникает молекулярно-вязкостный или вязкостный режим течения газа, вследствие чего резко уменьшаются быстрота действия насоса и отношения давлений.

В настоящее время в качестве форвакуумных обычно используют плунжерные насосы, создающие при быстроте действия  $S = 0$  давление  $1,0...0,1$  Па. Результаты экспериментального исследования влияния форвакуумного давления на предельное остаточное давление, создаваемое ТМН, показали, что предельное давление

всасывания, до которого быстрота действия не зависит от  $p$ , составляет  $0,1...1,0$  Па. Учитывая, что для ТМН при работе на этих режимах  $\tau \approx 100$ , следует принимать промежуточное давление, т.е. давление нагнетания ТМН и давление всасывания форвакуумного насоса, не более  $65...130$  Па. При этом значении промежуточного давления быстрота действия форвакуумного насоса и быстрота действия ТМН, увеличенная на поток газовой выделения в нагнетательной полости, должны быть равны.

Применение в качестве форвакуумных вакуумных насосов, создающих давление ниже  $0,1$  Па, целесообразно, когда отношение давлений для ТМН меньше отношения давления всасывания предполагаемого форвакуумного насоса к предельному остаточному давлению, определяемому уравнением (9.120), т.е. когда отношение давлений ТМН определяется числом ступеней, а не потоком газовой выделения с внутренней поверхности корпуса насоса и деталей ротора.

#### Порядок расчета откачной характеристики ТМН

1. Газодинамический и прочностной расчеты рабочих колес, определение их объемных характеристик и геометрических размеров.

2. Определение суммарного потока газовой выделения с внутренней поверхности корпуса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания насоса ( $Q_{гв.вс}$ ), а также между рабочими колесами ( $Q_{гв.пр i}$ ).

3. Проверка предельного остаточного давления по уравнению (9.120).

4. Выбор форвакуумного насоса, обеспечивающего за последним колесом ТМН молекулярный режим течения газа.

5. Определение числа рабочих колес (роторных и статорных) последовательным подсчетом отношения давлений для каждого колеса, начиная с первого, до достижения форвакуумного давления, а также вычисление общего отношения давлений по уравнению (9.121).

При этом считают, что быстрота откачки первого рабочего колеса, а следовательно, всего насоса  $S_n = 0$ , что соответствует минимальному потоку газа.

Таким образом, быстрота откачки первого колеса определяется потоком газовыделения на всасывании и потоком газа, перетекающего через радиальный зазор, т.е.  $S_{01} = Q_{гв.вс\ i} / p_0 + U_i(\tau_i - 1,0)$ .

Отношение давлений для первого колеса определяют по формуле (9.126).

Давление перед  $i$ -м рабочим колесом

$$p_i = p_{i-1} \tau_{i-1}. \quad (9.128)$$

6. Приняв поток газа в пределах от  $Q_{\min \phi}$  до  $S_{\max \text{ р.ф.}}$ , определяют расчетные точки откачной характеристики ТМН во всем диапазоне давления всасывания.

Зависящий от потока газовыделения минимальный поток газа, приходящийся на форвакуумный насос,

$$Q_{\min \phi} = Q_{гв.вс} + \sum_{i=2}^{i=n} Q_{гв.пр\ i} + Q_{гв.ф\ i},$$

где  $Q_{гв.ф}$  — поток газовыделения в полости нагнетания ТМН (после последнего рабочего колеса).

По характеристике форвакуумного насоса с учетом  $Q_{\phi} = Q_{\min \phi}$  уточняют давление  $p_{\phi}$ , а затем  $p_0$ .

Отношение давлений на последнем,  $N$ -м, рабочем колесе

$$\tau_N = \frac{\tau_{\max \text{ д. } N} S_{\max \text{ д. } N}}{S_{\max \text{ д. } N} + (S_{N+1} - Q_{гв.ф} / p_{N+1})(\tau_{\max \text{ д. } N} - 1,0)},$$

где  $S_{N+1} = Q_{\min \phi} / p_{N+1}$ ;  $p_{N+1} = p_{\phi}$ ;

$$\tau_i = \frac{\tau_{\max \text{ д. } i} S_{\max \text{ д. } i}}{S_{\max \text{ д. } i} + [S_{i+1} - Q_{гв.пр(i+1)} / p_{i+1}](\tau_{\max \text{ д. } i} - 1,0)}. \quad (9.129)$$

По значению  $\tau_N$  определяют быстроту действия последнего колеса:

$$S_N = (S_{N+1} - Q_{гв.ф} / p_{N+1}) \tau_N.$$

Давление перед последним колесом  $p_N = p_{\phi} / \tau_N$ .

Далее в той же последовательности определяют значения  $\tau_i$ ,  $S_i$ ,  $p_i$  для всех колес до первого. Таким образом находят истинное значение  $p_0$ .

Часто требуется вычислить откачную характеристику по рабочему давлению всасывания  $p_0$ , соответствующему заданной скорости действия  $S_n$ . В этом случае при определении числа ступеней быстроту откачки первого рабочего колеса рассчитывают с учетом заданной скорости действия насоса

$$S_{01} = S_n + Q_{гв.вс} / p_p + U_1(\tau_1 - 1,0).$$

Мощность двигателя ТМН является суммой мощностей: расходуемой на сжатие газа; необходимой для компенсации потерь в подшипниках; затрачиваемой на привод масляного насоса, если последний не имеет индивидуального двигателя, и дополнительная мощность на преодоление инерционных сил при выводе ротора на рабочие числа оборотов.

Мощность, расходуемая на сжатие газа, близка к изотермической, так как несмотря на большие отношения давлений (до  $10^8 \dots 10^{10}$ ) ТМН отличаются очень малыми массовой производительностью и плотностью газа (давление всасывания  $10^{-10} \dots 10^{-8}$  Па). Под сжатием газа в ТМН понимают процесс переноса рабочими колесами молекул газа в направлении повышения давления, основанный на различных сопротивлениях потокам газа.

Мощность, затрачиваемая на сжатие газа в насосе, Вт:

$$N_n = GL_{из}, \quad (9.130)$$

где  $G = Sp$  — массовый расход газа, кг/с [ $S$  — быстрота действия насоса, м<sup>3</sup>/с;  $p = p/RT$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>, где  $p$  — минимальное рабочее давление всасывания, Па;  $R$  — газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T$  — температура сжимаемого газа, К];  $L_{из} = 2,3RT \lg(p_{\phi}/p)$  — изотермическая работа, Дж/кг.

Мощность двигателя масляного насоса, Вт,

$$N_m = V_m(p_{н.м} - p_m + hgp_m), \quad (9.131)$$

где  $V_m$  — объемный расход масла, м<sup>3</sup>/с;  $p_{н.м}$  и  $p_m$  — давление соответственно нагнетания и всасывания масляного насоса, Па;  $h$  — напор, создаваемый насосом, м;  $g$  —



ускорение свободного падения,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_m$  – плотность масла,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В зависимости от типа подшипникового узла определяется мощность на преодоление трения в подшипниках ( $N_n \approx 50 \dots 150 \text{ Вт}$ ).

При ограничении времени разгона ротора ТМН дополнительная мощность на преодоление сил инерции

$$N_{\text{ин}} = I\omega^2 / 2t,$$

где  $I$  – момент инерции ротора относительно оси вращения,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора ТМН,  $1/\text{с}$ ;  $t$  –

время разгона ротора до рабочих чисел оборотов, с.

Мощность двигателя ТМН

$$N = N_n + N_m + N_p + N_{\text{ин}}. \quad (9.132)$$

**Пример расчета.** Исходные данные: быстрота действия ТМН по азоту  $S = 1 \text{ м}^3/\text{с}$  в рабочем диапазоне давлений  $p = 5 \cdot 10^{-4} \dots 0,1 \text{ Па}$ ; температура газа  $T = 293 \text{ К}$ ; материал рабочих колес – алюминиевый сплав Д16; форвакуумное давление  $p_{\text{ф}} = 0,1 \text{ Па}$ .

Определить основные размеры и откачную характеристику ТМН.

Данные расчета сведены в табл. 9.24. Откачная характеристика рассчитанного насоса приведена на рис. 9.23.

9.24. Данные расчета основных размеров и откачной характеристики ТМН

Параметр	Способ определения	Результат
Быстрота действия $S$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Исходные данные	1,0
Рабочий диапазон давлений $p$ , Па		$1 \cdot 10^{-4} \dots 0,1$
Откачиваемый газ		Азот
Молекулярная масса откачиваемого газа $M$		28
Температура откачиваемого газа $T$ , К		293
Форвакуумное давление $p_{\text{ф}}$ , Па		0,1
Материал рабочих колес		Алюминиевый сплав Д16
Предел текучести материала рабочих колес $\sigma_{0,2}$ , МПа		274
Плотность материала рабочих колес, $\text{кг}/\text{м}^3$		2700
Коэффициент Пуассона $\mu$		0,3
Коэффициент запаса прочности по пределу текучести:	Принимают	
в корневом сечении лопатки $n$		5,0
втулки рабочего колеса на внутреннем диаметре $n_1$		1,4
Отношение:		
диаметров $\lambda$		0,55
диаметров $\lambda_1$		0,30
ширины к длине лопатки у основания $a_1/b_1$		1,0
толщин лопатки $\psi$		
толщин рабочего колеса $\theta$		35
Угол установки лопаток $\alpha$ , °		
Толщина, м:		
лопатки у основания $h_1$		$1 \cdot 10^{-3}$
рабочего колеса у основания лопатки $H_1$		$4 \cdot 10^{-2}$
Окружная скорость $u_2$ рабочего колеса на наружном диаметре $D_2$ , м/с	Формула (9.117)	239,5
Наиболее вероятная скорость теплового движения молекул газа $v_m$ , м/с	Формула (9.118)	417,1

Продолжение табл. 9.24

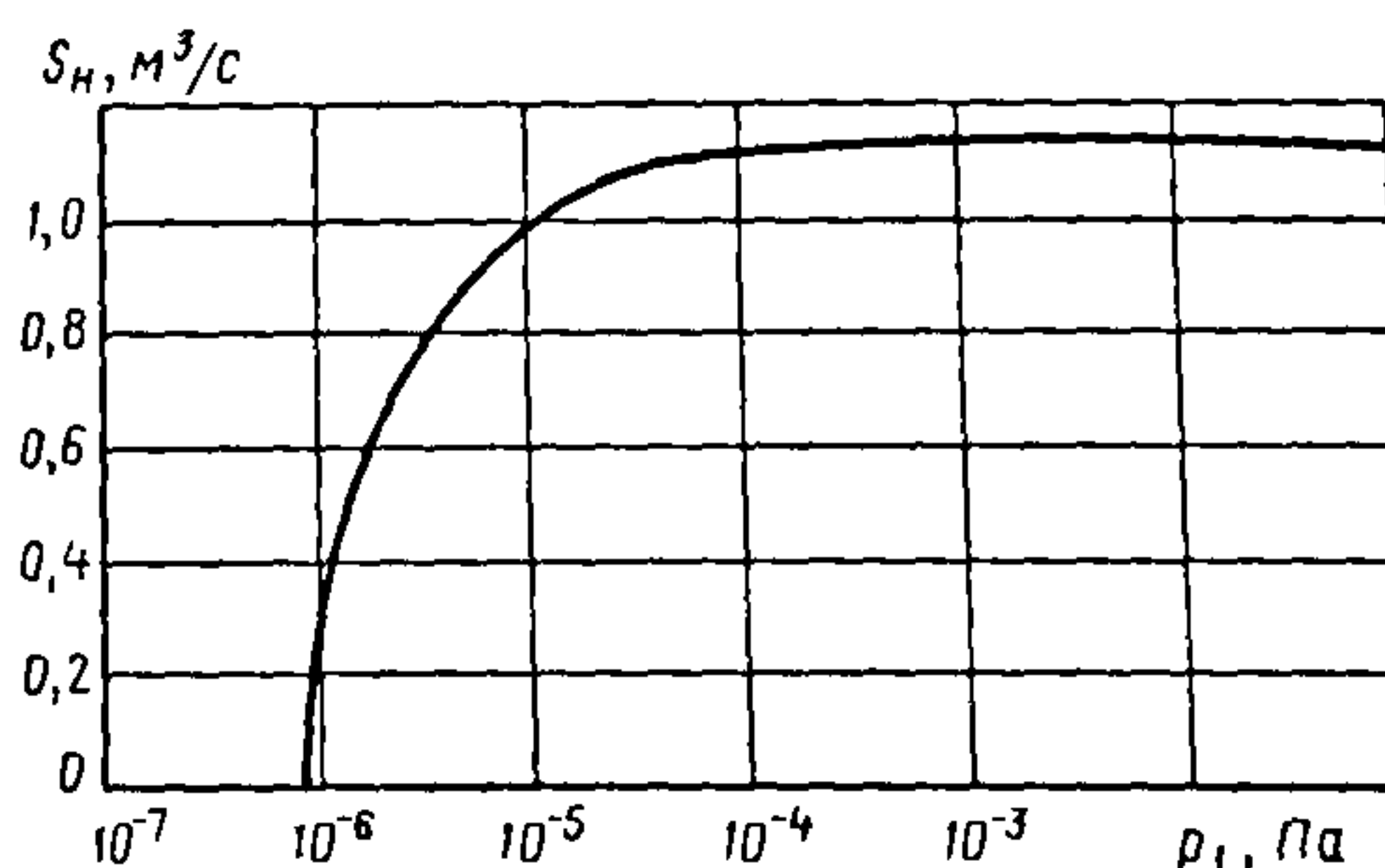
Параметр	Способ определения	Результат
Конструктивная схема ТМН	Принимают	Однопоточный ТМН с вертикальным расположением вала
Число пакетов рабочих колес		1
Максимальная быстрота действия насоса $S_{\max}$ , м <sup>3</sup> /с	Принимают с учетом $S/(0,90...0,95) = S_{\max}$	1,11
Наружный диаметр рабочего колеса $D_2$ , м	Формула (9.105)	0,271
Начальный диаметр $D_1$ основания лопаток, м	$D_1 = \lambda D_2$	0,149
Уточненное отношение диаметров $\lambda$	$\lambda = D_1/D_2$	0,55
Уточненная окружная скорость $u_2$ , м/с	Формула (9.117)	239,5
Число лопаток $z$	Формула (9.108)	53
Уточненное отношение $a_1/b_1$	Формула (9.107)	1,017
Действительное значение максимальной быстроты откачки $S_{\max}$ , м <sup>3</sup> /с	Формула (9.113)	1,117
Максимальное отношение давления $\tau_{\max}$ при $S = 0$	Формула (9.109)	1,666
Радиальный зазор $\delta_r$ , м	Принимают	$1 \cdot 10^{-3}$
Проводимость кольцевого зазора, м <sup>3</sup> /с: между корпусом и рабочим колесом $U_p$	Формула (9.123)	0,0315
между статорным колесом и валом $U_{ст}$		0,0171
Максимальное отношение давлений: роторного рабочего колеса $\tau_{\max p}$ (с учетом $U_p$ )	Формула (9.127)	1,654
статорного рабочего колеса $\tau_{\max ст}$ (с учетом $U_{ст}$ )		1,659
Осевой зазор $\delta_o$ , м	Принимают	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Удельное газовыделение, Па·м <sup>3</sup> /(с·м <sup>2</sup> ): $q_{д16}$ для сплава Д16	Исходные данные	$5 \cdot 10^{-7}$
$q_{ст}$ для стали 12Х18Н10Т	То же	$2 \cdot 10^{-7}$
Поверхности с различными удельными потоками газовыделения	Из конструкции ТМН	Всасывающая полость – поверхности корпуса, выхода ротора, заглушки ( $q_{ст}$ ), роторного колеса ( $q_{д16}$ ). Между рабочими колесами – поверхности корпуса, ротора ( $q_{ст}$ ) роторного, статорного колес ( $q_{д16}$ ). После последнего колеса – поверхности корпуса, ротора, соединительной магистрали ( $q_{ст}$ ) и рабочего колеса ( $q_{д16}$ )
Площадь поверхности, м <sup>2</sup> : $F_{вс д16}$ со стороны всасывания ( $q_{д16}$ )	Формула (9.125)	$4,024 \cdot 10^{-2}$
$F_{вс}$ со стороны всасывания ( $q_{ст}$ )		$8,6 \cdot 10^{-2}$



Окончание табл. 9.24

Параметр	Способ определения	Результат
$F_{пр д16}$ со стороны всасывания ( $q_{д16}$ )	Формула (9.125)	$8,048 \cdot 10^{-2}$
$F_{пр ст}$ со стороны всасывания ( $q_{ст}$ )		$7 \cdot 10^{-3}$
$F_{ф д16}$ после последнего рабочего колеса ( $q_{д16}$ )		$4,024 \cdot 10^{-2}$
$F_{ф ст}$ после последнего рабочего колеса ( $q_{ст}$ )		0,15
Поток газовой выделенности, Па·м <sup>3</sup> /с: $Q_{гв.вс}$ в полости всасывания		$2,184 \cdot 10^{-3}$
$Q_{гв}$ между соседними рабочими колесами		$4,068 \cdot 10^{-3}$
$Q_{гв.ф}$ после последнего рабочего колеса		$2,312 \cdot 10^{-3}$
Число рабочих колес	Последовательно, начиная с первого колеса, определяют $p_i$ , $S_i$ и $\tau_i$ [по формулам (9.128), (9.124) и (9.126)] до тех пор, пока на выходе $N$ -го колеса будет $p_{N+1} \geq p_{ф}$	Первое колесо роторное $p_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ Па; $S_1 = 1,002$ м <sup>3</sup> /с; $\tau_1 = 1,064$ ; второе колесо статорное $p_2 = 1,064 \cdot 10^{-4}$ Па; $S_2 = 0,9461$ м <sup>3</sup> /с; $\tau_2 = 1,097$ ; третье колесо роторное $p_3 = 1,167 \cdot 10^{-4}$ Па; $S_3 = 0,866$ м <sup>3</sup> /с; $\tau_3 = 1,144$ ; ...; 23-е колесо роторное $p_{23} = 6,082 \cdot 10^{-2}$ Па; $S_{23} = 1,091 \cdot 10^{-4}$ м <sup>3</sup> /с; $\tau_{23} = 1,654$
Откачная характеристика ТМН	Аналогично расчету $N$ , но начиная с последнего (23-го) колеса, определяют $\tau_i$ , $S_i$ , $p_i$ [по формулам (9.129), (9.124) и (9.128)]. Для выбранных значений $S_{ф}$ и $p_{ф}$ вычисляют $p_1$ и $S_1$	Давление после 23-го колеса $p_{24} = 0,1006$ Па; $N = 23$ ; $S_p = 0$ ; при $S_{ф} = 9,51 \cdot 10^{-4}$ м <sup>3</sup> /с и $p_1 = 9,86 \cdot 10^{-6}$ Па $S_p = 0,481$ м <sup>3</sup> /с; при $S_{ф} = 10^{-5}$ м <sup>3</sup> /с и $p_1 = 1,03 \cdot 10^{-6}$ Па $S_p = 0,724$ м <sup>3</sup> /с; при $S_{ф} = 3 \cdot 10^{-5}$ м <sup>3</sup> /с и $p_1 = 2,83 \cdot 10^{-5}$ Па $S_p = 1,0$ м <sup>3</sup> /с; при $S_{ф} = 1,09 \cdot 10^{-4}$ м <sup>3</sup> /с и $p_1 = 9,95 \cdot 10^{-5}$ Па $S_p = 1,05$ м <sup>3</sup> /с; при $S_{ф} = 2 \cdot 10^{-4}$ м <sup>3</sup> /с и $p_1 = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па (см. рис. 9.93)

Рис. 9.93. Откачная характеристика ТМН



## Глава 10

### СТРУЙНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

#### 10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Работа струйных вакуумных насосов основана на использовании в качестве откачивающего элемента высокоскоростной струи.

По агрегатному состоянию вещества рабочего тела различают жидкостно-, газо- и пароструйные насосы. По способу взаимодействия откачиваемого газа и рабочего тела пароструйные насосы подразделяют на парожеткорные, бустерные и диффузионные.

Вакуумные струйные насосы характеризуются предельным остаточным давлением, производительностью, быстротой действия и наибольшим выпускным давлением.

Предельное остаточное давление струйного насоса  $p_0$  определяется равновесием между объемом газа, удаляемого насосом, и объемом газа, возвращающегося из насоса в систему. Если начальное давление в системе  $p_1$ , то конечное давление, достигаемое через время  $\tau$ ,

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{S}{V}\tau} + p_0, \quad (10.1)$$

где  $V$  – объем откачиваемой системы,  $\text{м}^3$ ;  $S$  – быстрота действия насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Из уравнения (10.1) следует, что давление  $p_2$  в системе, равное предельному остаточному давлению  $p_0$ , может быть достигнуто только через время  $\tau = \infty$ . Практически предельным остаточным

давлением насоса считают создаваемое в системе давление, которое может меняться в процессе длительной откачки не более чем на 10 %.

Предельное остаточное давление насоса имеет значение главным образом для диффузионных насосов, часто используемых специально для создания минимального остаточного давления в системе. Для эжекторных и бустерных насосов оно не имеет принципиального значения, так как эти насосы предназначены преимущественно для удаления больших потоков газа из откачиваемой системы при относительно высоких давлениях.

Производительность насоса  $Q_n$  складывается из эффективного (полезного) потока  $Q_n$  и потоков газа из насоса  $Q_0$ , обусловленных газовойделением стенок; циркуляцией газа, растворенного в рабочей жидкости, обратным проникновением газа через струю и т.д. Таким образом, эффективная производительность

$$Q_n = Q_n - Q_0. \quad (10.2)$$

При  $Q_n = Q_0$ , т.е. при предельном остаточном давлении, эффективная производительность насоса равна нулю.

Производительность как характеристику струйных насосов принято изображать графически в виде зависимости от выпускного давления в логарифмических координатах  $\lg Q - \lg p_{\text{вп}}$ . Обычно это кривая с прямолинейным участком в области рабочих давлений.



Производительность насоса связана с быстротой действия соотношением

$$S_n = \frac{Q_n}{p} \quad (10.3)$$

В соответствии с уравнением (10.2)  $S_n p = S_n p - S_n p_0$ , откуда

$$S_n = S_n \left( 1 - \frac{p_0}{p} \right) \quad (10.4)$$

Таким образом, эффективная полезная быстрота действия  $S_n$  равна номинальной скорости действия  $S_n$ , когда  $p \gg p_0$ ,  $S_n = 0$  при предельном остаточном давлении  $p_0$ .

Быстроту действия как характеристику насоса принято изображать графически в зависимости от впускного давления в полулогарифмических координатах  $S - \lg p_{вп}$ .

Зависимость впускного давления  $p_{вп}$  от выпускного  $p_{вып}$  для вакуумных пароструйных насосов имеет три характерных участка (рис. 10.1). Сначала с ростом выпускного давления впускное не меняется (участок I), затем по достижении наибольшего выпускного давления  $p_{н.вып}$  впускное начинает резко увеличиваться (участок II), и, наконец, давления выравниваются (участок III).

Давление  $p_{н.вып}$  зависит от давления  $p_{вп}$ . Обычно наибольшее выпускное давление определяют либо при остаточном давлении, либо при впускном, соответствующем наибольшей производительности.

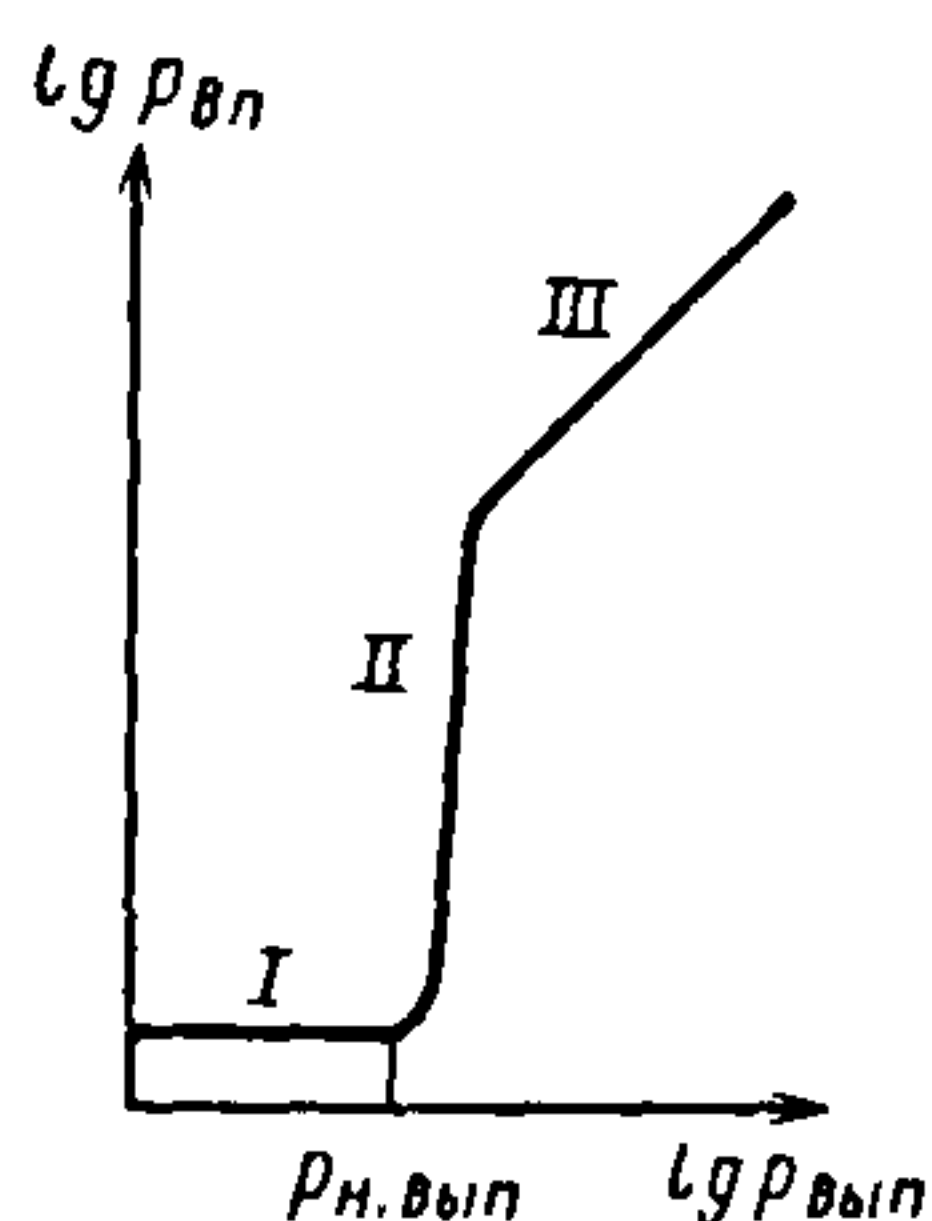


Рис. 10.1. Зависимость впускного давления струйного насоса от выпускного

При оценке степени совершенства конструкций и экономичности пароструйных насосов используют также удельные характеристики, из которых наиболее важен коэффициент полезного действия (КПД).

КПД насоса называют отношение энергии, расходуемой на совершение полезной работы сжатия газа в насосе от впускного до выпускного давления, к полной энергии  $E$ , подводимой к насосу:  $\eta = E_n/E$ . В большинстве случаев, когда температуры откачиваемого газа на входе в пароструйный вакуумный насос и на выходе из него одинаковы, сжатие газа можно считать изотермическим. Выражение для изотермического КПД имеет вид

$$\eta = \frac{\rho S_n R T \ln(p_{вып}/p_{вп})}{MN} \quad (10.5)$$

где  $\rho$  — плотность откачиваемого газа при давлении 1 Па, кг/м<sup>3</sup>;  $S_n$  — быстрота действия насоса, м<sup>3</sup>/с;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  — температура откачиваемого газа, К;  $M$  — молярная масса, кг/моль;  $N$  — мощность, подводимая к насосу, Вт.

Для различных вакуумных пароструйных насосов изотермический КПД  $\eta = 10^{-1} \dots 10^{-4}$ .

## 10.2. ЖИДКОСТНО-СТРУЙНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия жидкостно-струйного насоса [65] ясен из рис. 10.2. Рабочая жидкость в виде турбулентной струи с большой скоростью под давлением истекает через сужающееся сопло 1 в приемную камеру 2. В результате турбулентного перемешивания и вязкостного трения струя захватывает и увлекает частицы окружающей среды в камеру смешения 3, где давления рабочей жидкости и откачиваемой среды выравниваются (давление откачиваемой среды увеличивается). Дальнейшее повышение давления откачиваемой среды до выпускного давления происходит в расширяющемся насадке — диффузоре 4.

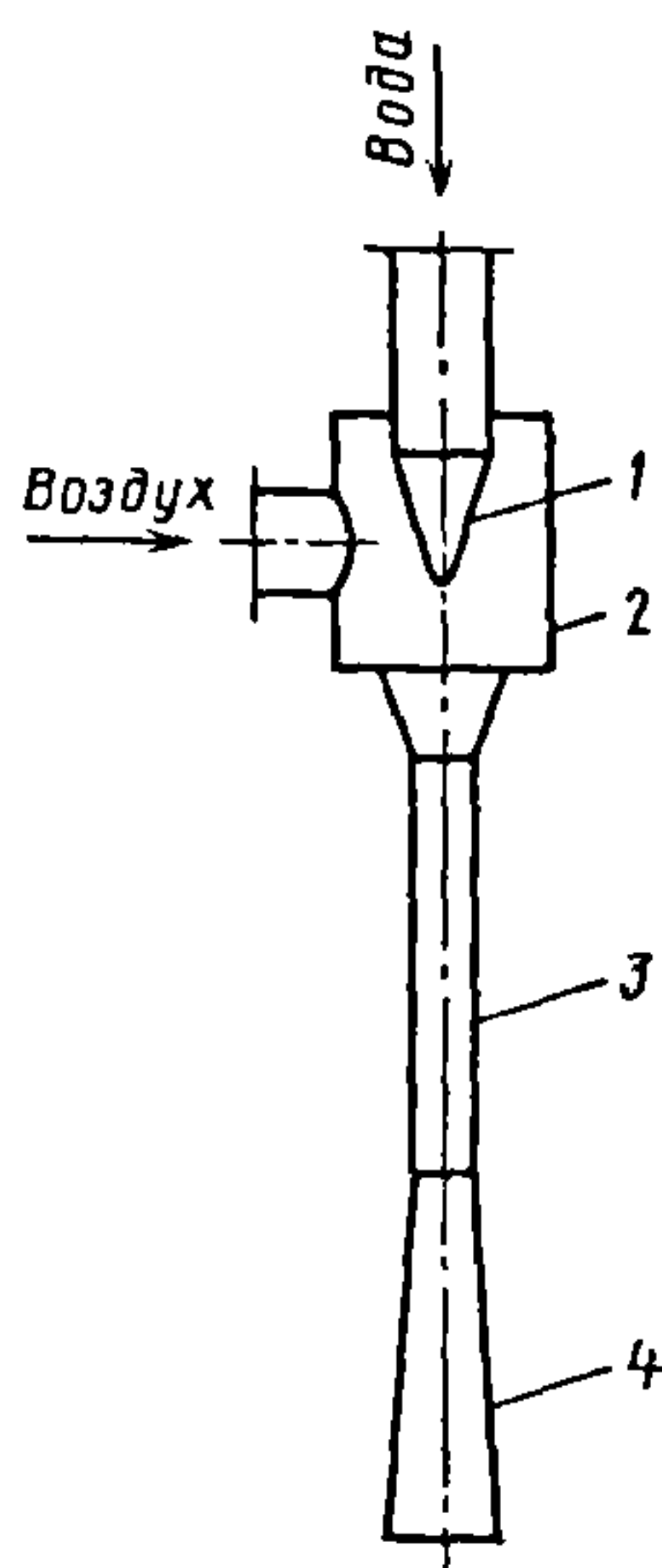


Рис. 10.2. Схема жидкостно-струйного насоса

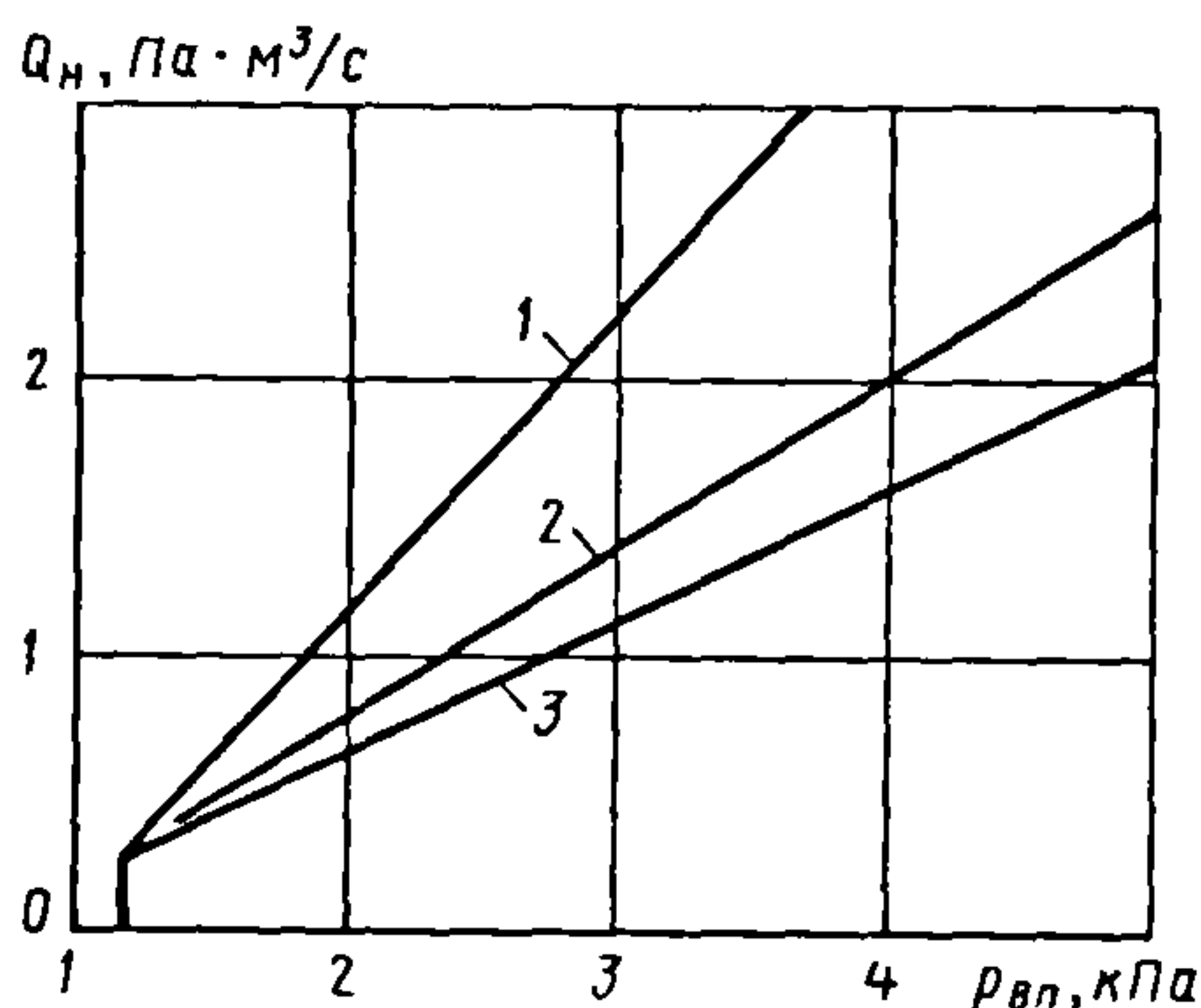


Рис. 10.3. Зависимость производительности водоструйного насоса НВВ-1 от впускного давления при различном давлении воды: 1 – 3 – соответственно  $p_{ж} = 0,3; 0,2$  и  $0,1$  МПа

Жидкостно-струйные насосы откачивают любые газы, пары и парогазовые смеси. На практике распространены в основном водоструйные насосы благодаря возможности использования в них в качестве рабочего тела обычной водопроводной воды. Водоструйные насосы изготовляют из любых материалов: стекла, металлов, пластмасс и др.

Основные характеристики жидкостно-струйных насосов: предельное остаточное давление, производительность и быстрота действия.

Предельное остаточное давление, создаваемое жидкостно-струйным насосом, определяется давлением насыщенного пара рабочей жидкости и зависит от температуры жидкости. Так, для водоструйных насосов при температуре воды 293 К предельное остаточное давление составляет 2,3 кПа. Однако предельное остаточное парциальное давление воздуха при этом существенно меньше; оно определяется содержанием воздуха в воде, подаваемой в сопло, и, как показывают опытные данные, при использовании водопроводной воды может достигать 1 Па.

Производительность жидкостно-струйного насоса возрастает при увеличении расхода и давления  $p_{ж}$  рабочей жидкости, истекающей из сопла насоса. На рис. 10.3 приведена зависимость производительности водоструйного насоса НВВ-1 от впускного давления при различном давлении воды (на рабочем участке кривой зависимость линейная).

Быстрота действия жидкостно-струйного насоса по откачиваемому газу  $S$ , м³/с, зависит от температуры рабочей жидкости  $T_{ж}$ , К, давления  $p_{п}$  насыщенного пара жидкости, впускного давления откачиваемого газа  $p_{г.вп}$  и его температуры  $T_{г}$ , К:

$$S = K Q_{ж} \frac{p_{г.вп} - p_{п}}{p_{г.вп}} \frac{T_{г}}{T_{ж}} \ln \left( \sqrt{\frac{p_{ж} - p_{г.вп}}{p_{г.вып} - p_{г.вп}}} - 1 \right), \quad (10.6)$$

где  $K$  – постоянная для данной рабочей жидкости и откачиваемого газа (для воздушного насоса  $K = 0,85$ );  $Q_{ж}$  – объемный расход рабочей жидкости, м³/с.

В рабочем диапазоне давлений при  $p_{г.вп} \gg p_{п}$  и  $p_{г.вып} \gg p_{г.вп}$  быстрота действия жидкостно-струйного насоса не зависит от впускного давления, а при предельном остаточном давлении  $p_{г.вп} = p_{п}$  быстрота действия  $S = 0$ .

Дополнительная характеристика жидкостно-струйного насоса – объемный коэффициент эжекции  $v = S/Q_{ж}$ , равный отношению быстроты действия к объемному расходу рабочей жидкости.



**Методика расчета водоструйного вакуумного насоса.** Исходными данными для расчета являются: быстрота действия  $S$  при заданном впускном давлении воздуха  $p_{г.вп}$ ; температура откачиваемого газа  $T_{г.}$ ; давление рабочей жидкости (воды)  $p_{ж.}$ ; температура рабочей жидкости  $T_{ж.}$ ; выпускное давление воздуха  $p_{г.вып.}$ . Требуется определить: диаметр  $d_1$  выходного сечения сопла (см. рис. 10.2), диаметр  $d_3$  камеры смешения, расход воды, характеристику насоса.

Расчет проводят в следующем порядке.

Максимальный объемный коэффициент эжекции вычисляют по эмпирической формуле

$$v = 0,85 \sqrt{\Delta p_p / \Delta p_c - 1}, \quad (10.7)$$

где  $\Delta p_p = p_{ж.} - p_{г.вп.}$ ;  $\Delta p_c = p_{г.вып.} - p_{г.вп.}$ .

Объемный расход воды [см. выражение (10.6)],  $m^3/c$ ,

$$Q_{ж.} = \frac{1,18 S p_{г.вп.} T_{ж.}}{p_{г.вп.} - p_{г.}} \frac{1}{\sqrt{\frac{p_{ж.} - p_{г.вп.}}{p_{г.вып.} - p_{г.вп.}} - 1}}. \quad (10.8)$$

Площадь выходного сечения рабочего сопла,  $m^2$ ,

$$f_1 = Q_{ж.} / (0,95 \sqrt{2 v \Delta p_p}), \quad (10.9)$$

где  $v$  — удельный объем воды,  $m^3/kg$ .

Диаметр выходного сечения рабочего сопла,  $m$ ,

$$d_1 = 1,13 \sqrt{f_1}. \quad (10.10)$$

Основной геометрический параметр насоса

$$f_3 / f_1 = \Delta p_p / \Delta p_c. \quad (10.11)$$

Диаметр камеры смешения

$$d_3 = d_1 \sqrt{f_3 / f_1}. \quad (10.12)$$

Остальные геометрические размеры принимают из следующих соотношений: расстояние от выходного сечения сопла до входного сечения цилиндрической камеры смешения  $l \approx 1,5 d_3$ ; длина цилиндрической камеры смешения  $l \approx 8 d_3$ ; выходной диаметр диффузора  $d_4 = 2,5 d_3$ ; угол раствора диффузора  $8^\circ$ .

Водоструйный эжектор следует присоединять к сливному баку трубопроводом, диаметр которого не меньше  $d_4$ , и длиной  $\sim 10 d_4$ .

При откачке паров и парогазовых смесей производительность водоструйного насоса существенно больше, чем при откачке сухих газов, так как насос становится не столько

эжектором, сколько конденсатором смешения. Например, производительность водоструйного насоса при откачке водяного пара в 200–300 раз больше, чем при откачке сухого воздуха.

### 10.3. ПАРОЭЖЕКТОРНЫЕ НАСОСЫ

**Принцип действия.** Вакуумные парозежекторные насосы служат для удаления больших потоков газов и парогазовых смесей из различных установок при давлении  $10^5 \dots 1$  Па.

Пар под давлением истекает через расширяющееся сопло 1 (рис. 10.4) со сверхзвуковой скоростью в виде турбулентной или ламинарной струи. Вследствие турбулентного перемешивания вихревых масс паровой турбулентной струи с молекулами окружающего газа или вязкостного трения между граничными слоями вязкостной струи и газа последний захватывается и увлекается в сужающийся насадок — конфузор 2 (камеру смешения), служащий для обеспечения возможно более полного перемешивания пара с газом. Этот процесс характеризуется равномерностью значений всех параметров смеси (давления, плотности, скорости, температуры) по сечению потока.

В результате обмена энергиями при смешении и возникновения скачка уплотнения давление откачиваемого газа возрастает, достигает статического давления смеси, а скорость потока уменьшается до звуковой.

В горловине 3 эжектора завершается выравнивание значений параметров смеси, а в расширяющемся насадке-диффузоре 4 происходит дальнейший переход кинетической энергии смеси в потенциальную, сопровождающийся снижением скорости и повышением давления смеси до выпускного давления за диффузором.

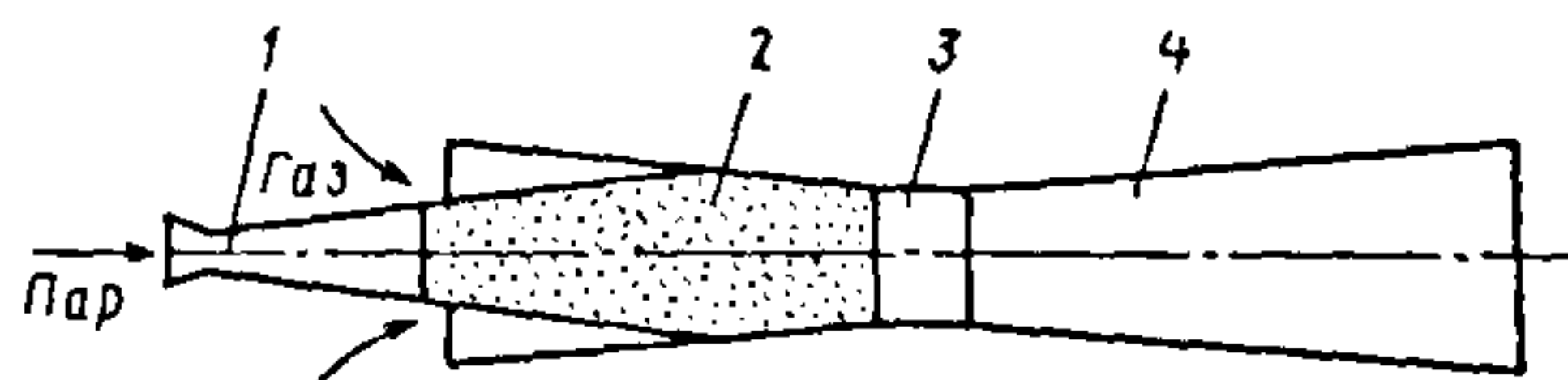


Рис. 10.4. Схема эжекторной ступени

**Устройство насосов.** В качестве рабочего тела в вакуумных парозжекторных насосах обычно используют водяной пар. Одна ступень пароводяного эжектора сжимает газ в 5–10 раз. Как правило, эжекторы конструируют на степень сжатия  $\leq 10$  по экономическим соображениям, связанным с увеличением расхода пара при больших степенях сжатия.

Следовательно, одна ступень эжектора, работающая с выпуском газа в атмосферу, может создавать остаточное давление  $\sim 10^4$  Па. Для получения более низкого давления необходимо устанавливать ряд ступеней последовательно. При этом за эжекторной ступенью 4 (рис. 10.5) обычно устанавливают конденсатор 3, в котором конденсируется пар; газ откачивается следующей ступенью 5. Из конденсатора смешения конденсат удаляется

самотеком по сливным трубам 2 в дренажный колодец 1. Водяной затвор в сливных трубах уравнивает разность между атмосферным давлением и давлением в конденсаторе. Высота затвора  $\sim 10$  м. Конденсатор 3 располагают на высоте около 11 м над уровнем воды в дренажном колодце.

Объем дренажного колодца определяют не менее чем в 1,5 раза большим объема всех труб, чтобы при создании затвора сливные трубы были заполнены водой. Колодец разделен на две части высоким порогом, через который переливается вода из основной камеры, являющейся отстойником для различных загрязнений, выносимых водой из насоса, что особенно важно при откачке запыленных сред.

Кроме барометрических систем конденсаторов смешения применяют низкочувствительные системы, в которых конденсат сливается в промежуточную емкость, расположенную на 1,5...2,0 м ниже конденсаторов, откуда удаляется конденсатным насосом.

В пароводяных эжекторных насосах используют также поверхностные конденсаторы, обычно трубчатого типа. Здесь в отличие от конденсаторов смешения теплообмен происходит не в результате непосредственного контакта парогазовой смеси с охлаждающей водой, а через стенки трубок, внутри которых движется вода, а снаружи — парогазовая смесь.

Для конденсаторов указанных типов характерны как преимущества, так и недостатки, с учетом которых выбирают конденсатор для конкретных условий работы насоса.

Сравнительные эксплуатационные характеристики насосов с конденсаторами различных типов приведены в табл. 10.1.

В высокопроизводительных парозжекторных насосах наиболее часто применяют барометрические конденсаторы смешения благодаря простоте устройства, относительно невысокой стоимости, экономичности эксплуатации и высокой надежности. Поверхностные конденсаторы

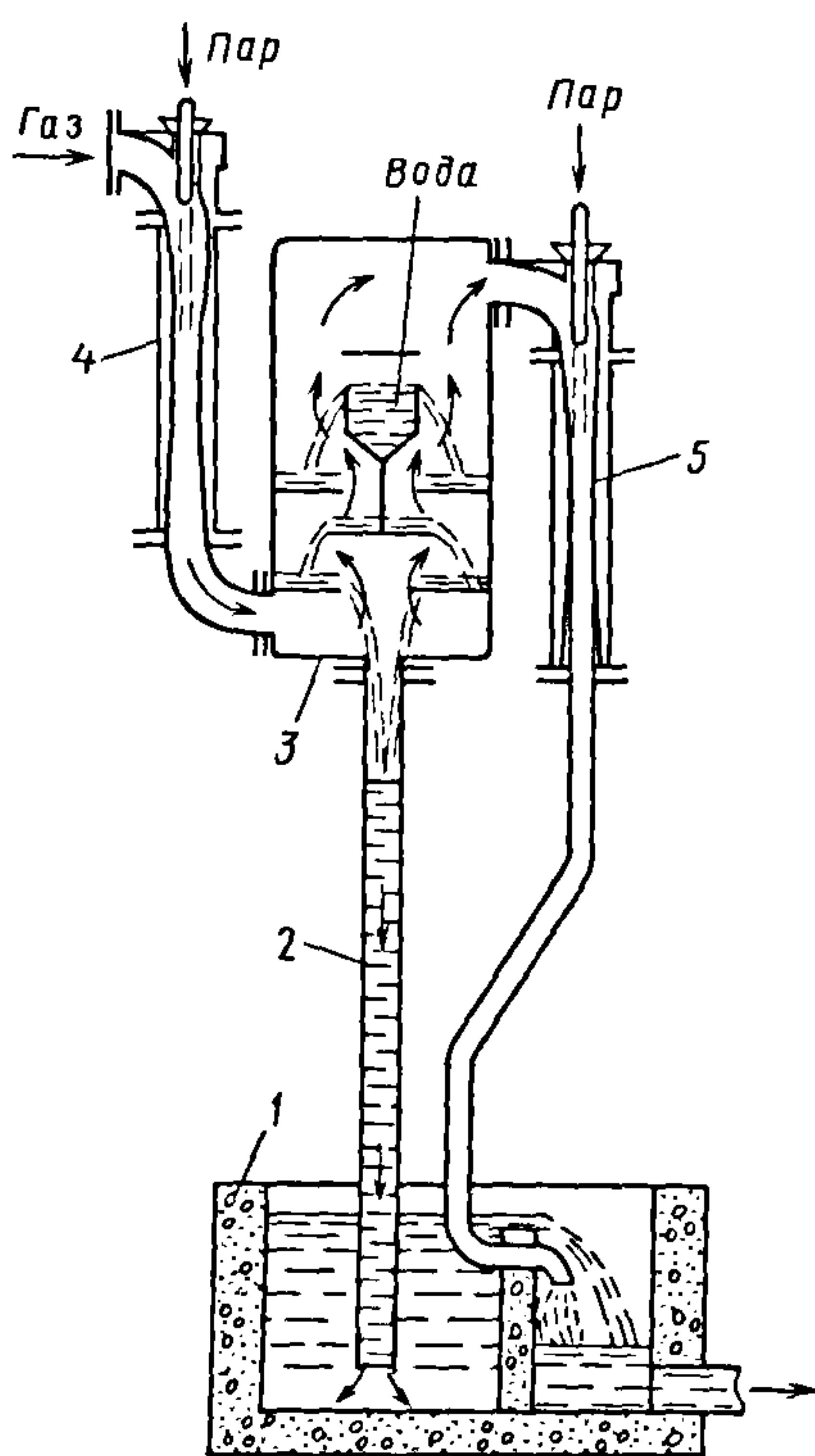


Рис. 10.5. Схема парозжекторного насоса



### 10.1. Сравнительные эксплуатационные характеристики эжекторных насосов с конденсаторами различных типов

Показатель	Значение показателя для конденсатора смешения		
	барометрического	низкоуровневого	поверхностного
Конструкционный материал	Любой		Теплопроводный металл
Относительный расход охлаждающей воды	1		1,5
Относительная стоимость			
Увеличение высоты насоса за счет сливных труб, м	10	1,5	0
Очистка (степень очистки) охлаждающей воды	Не требуется	Низкая	Высокая
Откачка сред: загрязненных твердыми частицами; коррозионных	Допускается	Не рекомендуется	
Необходимость: очистки воды перед возвратом в систему водоснабжения; в конденсатном насосе	Есть		Нет
Возможность попадания воды в систему при аварийном останове насоса	Нет	Есть	

обычно используют в пароэжекторных насосах небольшой производительности, когда ограничены габаритные размеры насоса или недопустимо разбавление конденсата водой, например при необходимости улавливания из конденсата ядовитых, коррозионных или радиоактивных компонентов.

В многоступенчатых пароэжекторных насосах с промежуточными конденсаторами давление, создаваемое первой ступенью, существенно зависит от температуры воды в установленном за ней конденсаторе, поскольку давление за ступенью не может быть ниже давления насыщенного пара охлаждающей воды в конденсаторе. При температуре воды 298...303 К это давление составляет ~ 4 кПа. Следовательно, при степени сжатия 5...10 давление на входе в ступень не может быть < 0,4...0,8 кПа. Такое давление обычно создают трех- или четырехсту-

пенчатым насосом с двумя-тремя промежуточными конденсаторами. Для получения более низкого давления используют многоступенчатые эжекторные насосы, в которых за первой ступенью нет конденсатора, и, значит, давление за ней обусловлено только производительностью следующей ступени. Так, шестиступенчатый насос с тремя первыми ступенями без конденсаторов обеспечивает предельное остаточное давление ~0,5 Па.

Конструкция пароводяного эжектора существенно зависит от его размеров и материала. Обычно эжекторные насосы производят из тех же материалов, что и откачиваемую аппаратуру. Металлические эжекторы небольших размеров изготавливают литыми (рис. 10.6), большие – сварными.

Пароводяные эжекторные насосы широко применяют для откачки вакуумных дуговых и индукционных печей,

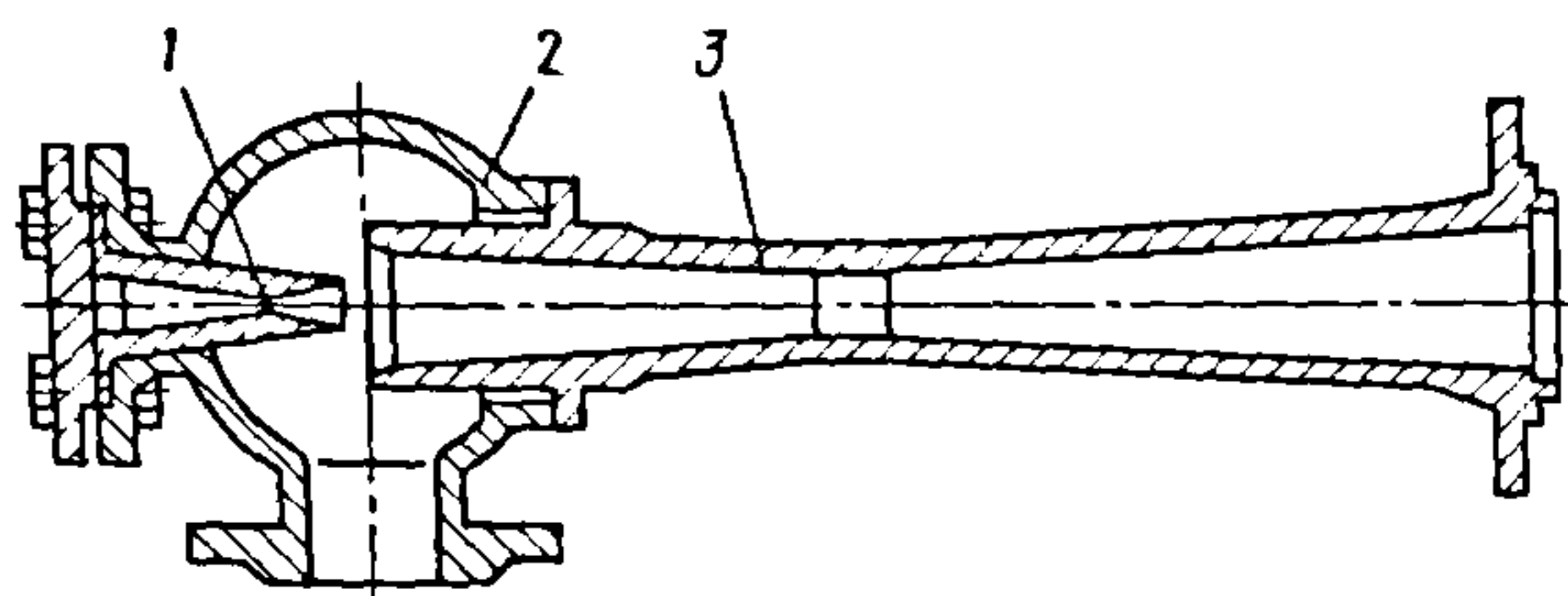


Рис. 10.6. Схема пароводяной литой эжекторной ступени:

1 – сопло; 2 – приемная камера;  
3 – диффузор с камерой смешения

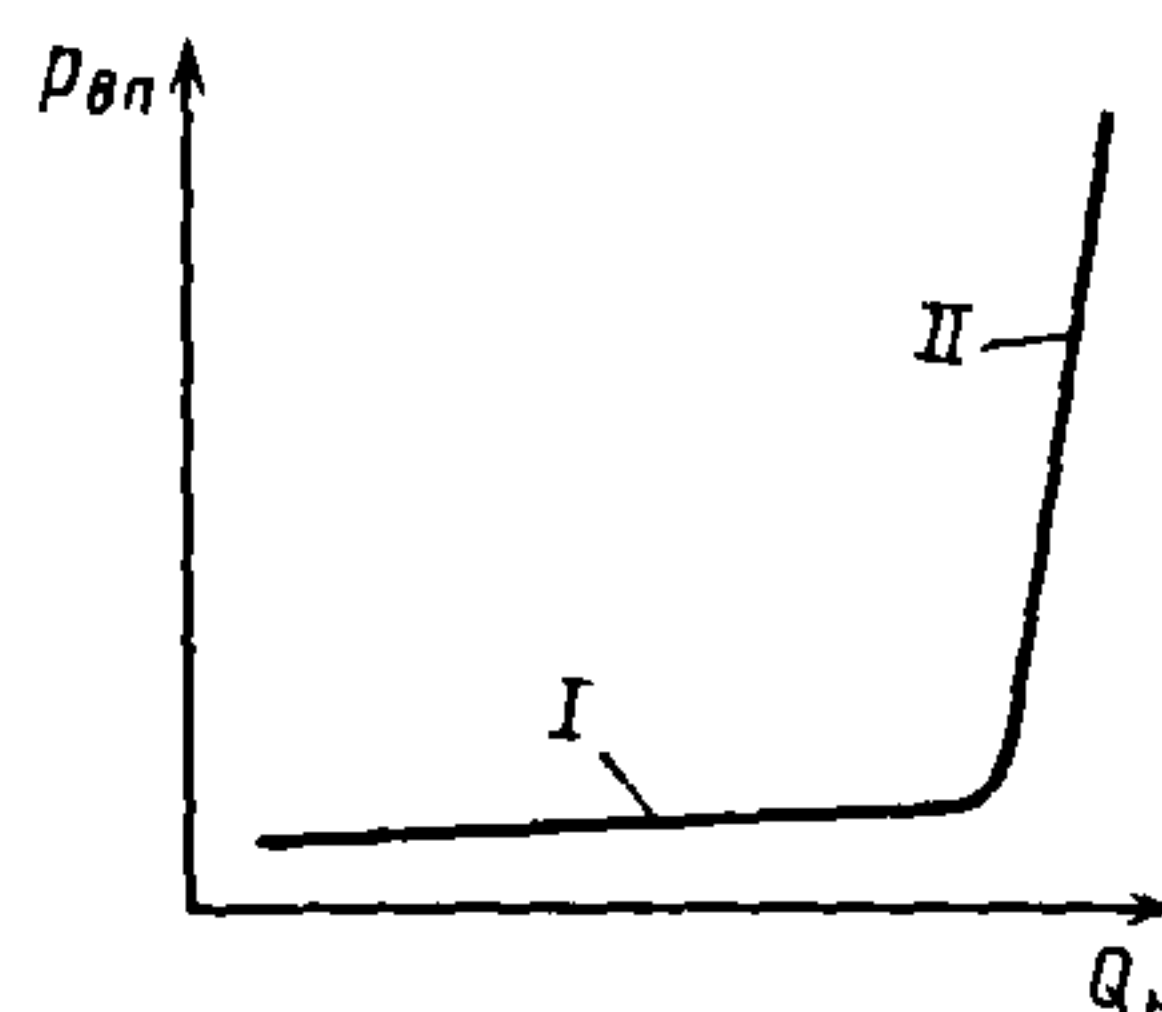


Рис. 10.7. Характеристика парозежекторного насоса

установок внепечного обезгаживания жидких металлов, дистилляционных установок различного рода, выпарных аппаратов, вакуумных кристаллизаторов, деаэраторов, конденсаторов паровых турбин, дегидраторов, вакуумных сушильных аппаратов, вакуумных фильтров, вакуумных пропиточных установок и др.

Основные параметры представителей ряда промышленных парозежекторных насосов с поверхностными конденсаторами приведены в табл. 10.2, где  $Q_{\text{воз}}$  – производительность по сухому воздуху при  $T = 293 \text{ К}$ , кг/ч;  $p_{\text{вп}}$  и  $p_{\text{п}}$  – давление всасываемого воздуха и рабочего пара, подаваемого в сопло эжектора, Па;  $Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{в}}$  – расход рабочего пара и охлаждающей воды.

**Основные характеристики.** Основную характеристику парозежекторных насосов изображают обычно графически как зависимость всасываемого давления  $p_{\text{вп}}$  от производительности (или внешней нагрузки)  $Q_n$  (рис. 10.7).

Характеристика имеет два участка: пологий – рабочий участок I, в котором изменения нагрузки мало влияют на всасываемое давление, и крутой – участок II перегрузки, где малые изменения  $Q_n$  приводят к резкому повышению всасываемого давления. Точка перегиба характеристики, соответствующая максимальной производительности насоса на рабочем участке, является расчетной рабочей точкой, для которой обычно выполняют расчет и проектирование парозежекторного насоса.

Зависимость быстроты действия насоса от всасываемого давления имеет вид кривой с максимумом, соответствующим рабочей точке (рис. 10.8).

Дополнительную характеристику парозежекторных насосов – коэффициент эжекции – определяют как отношение массовых расходов, кг/ч, откачиваемого газа и рабочего пара, истекающего из сопла:  $v = Q_{\text{г}}/Q_{\text{п}}$ .

## 10.2. Основные параметры парозежекторных насосов

Насос	$Q_{\text{воз}}$ , кг/ч	$p_{\text{вп}}$ , Па	$p_{\text{п}}$ , $10^{-5}$ Па	$Q_{\text{п}}$ , кг/ч	$Q_{\text{в}}$ , кг/ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Число ступеней
НВЭ 5×1/6	5	$1,0 \cdot 10^2$	6	$128^{+16}$	$9,7^{+1}$	3835×790×3770	1760	4
НВЭ 20×2,5/10	20	$3,3 \cdot 10^2$	10	$300^{+43}$	$20,8^{+3}$	4470×790×4770	2500	
НВЭ 80×5/6	80	$6,6 \cdot 10^2$	6	$1065^{+115}$	$65,0^{+15}$	5960×1100×4300	3485	
НВЭ 10×10/6	10	$1,3 \cdot 10^3$		$104^{+15}$	$6,0^{+0,8}$	2810×570×2640	735	
НВЭ 100×20/6	100	$2,6 \cdot 10^3$	10	$840^{+91}$	$32,0^{+3}$	4290×790×4770	2255	3
НВЭ 100×40/6		$5,3 \cdot 10^3$		$680^{+72}$	$22,0^{+2}$	3950×790×3770	2155	
НВЭ 50×80/10	50	$1,0 \cdot 10^4$		$225^{+30}$	$3,8^{+0,5}$	1845×640×2170	520	2
НВЭ 400×160/10	400	$2,1 \cdot 10^4$		$1690^{+185}$	$16,0^{+2}$	2790×790×5290	1480	



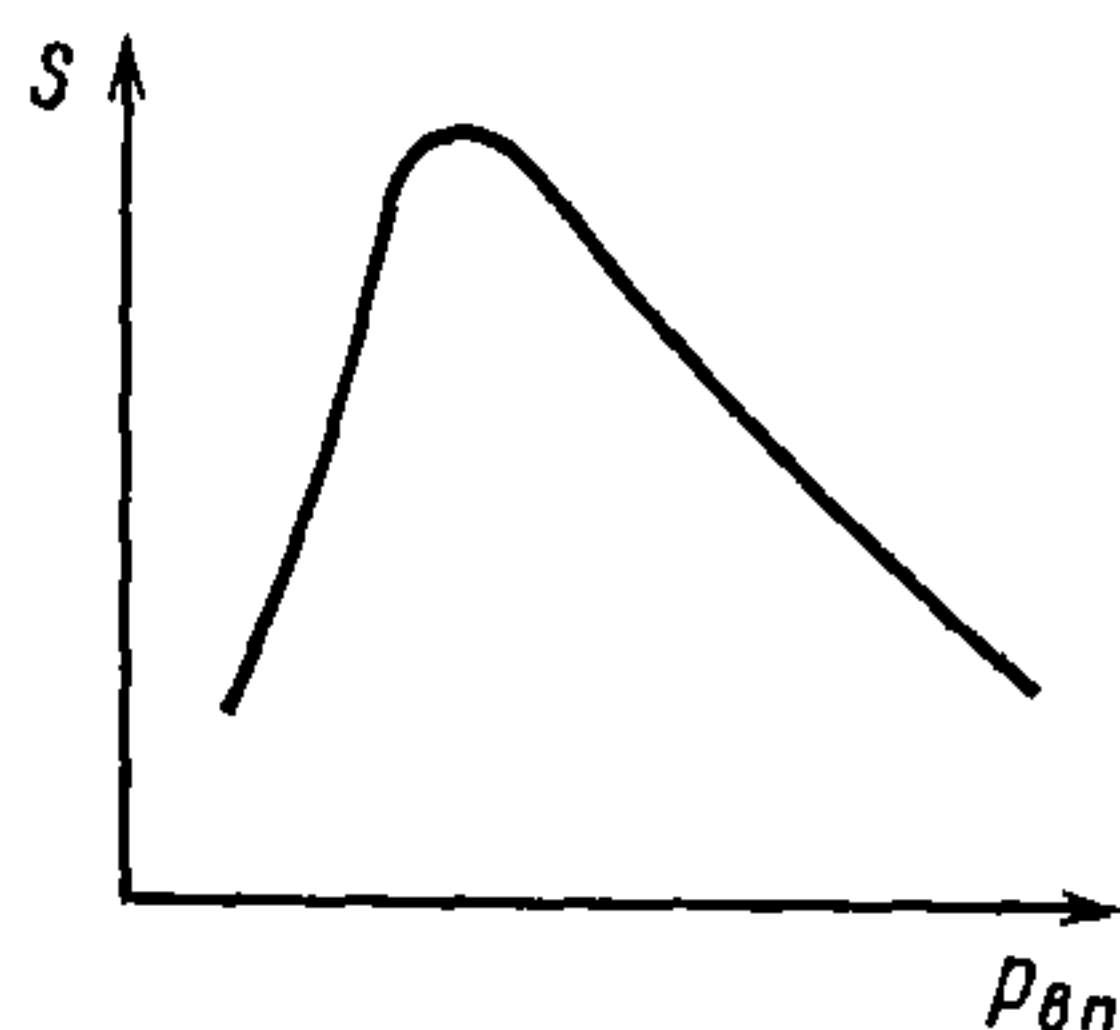


Рис. 10.8. Зависимость быстроты действия парожеторного насоса от впускного давления

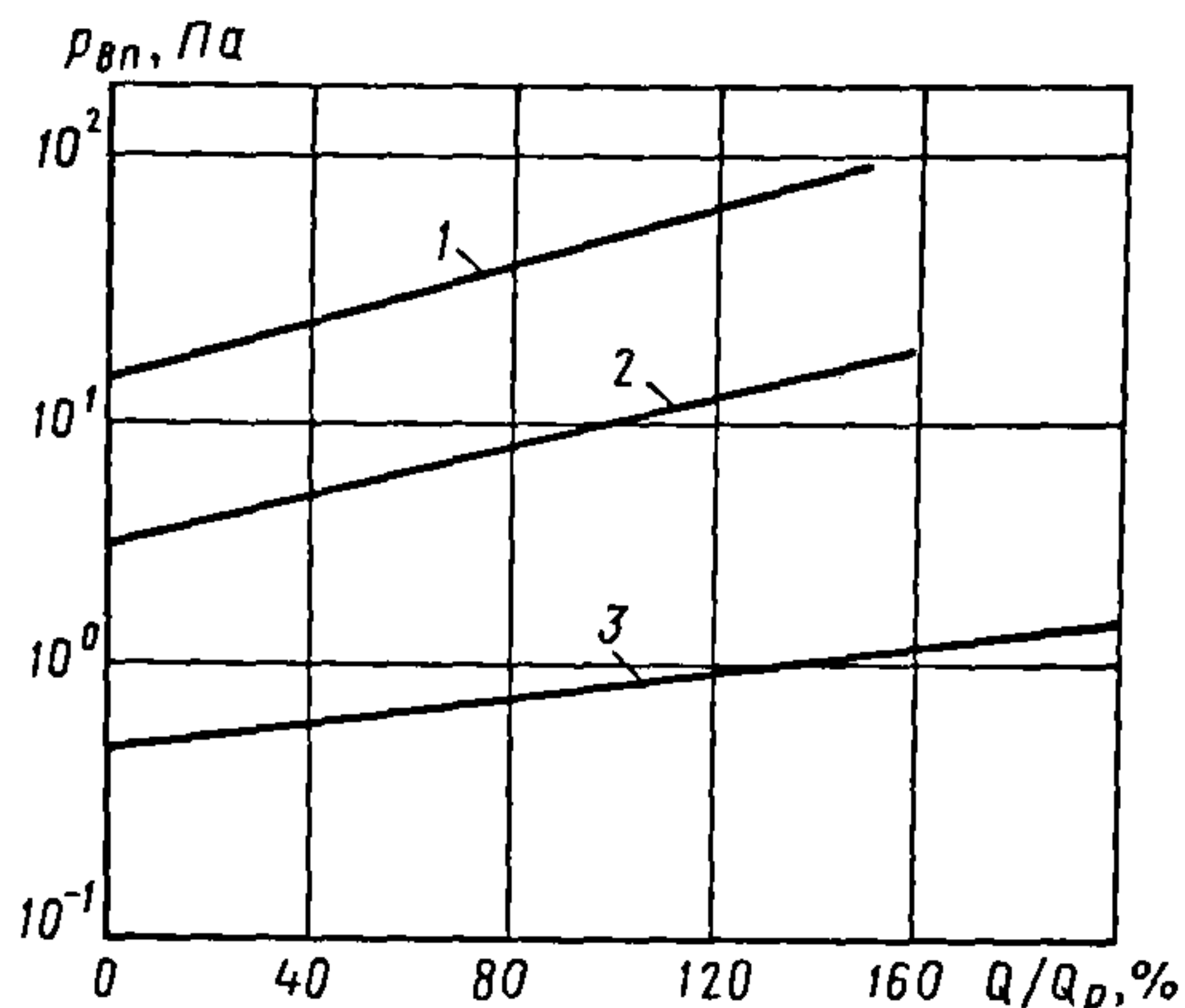


Рис. 10.9. Характеристики многоступенчатых пароводяных эжекторных насосов при давлении пара 0,7 МПа, температуре охлаждающей воды в конденсаторах 303 К и числе ступеней:  
1 – четыре; 2 – пять; 3 – шесть

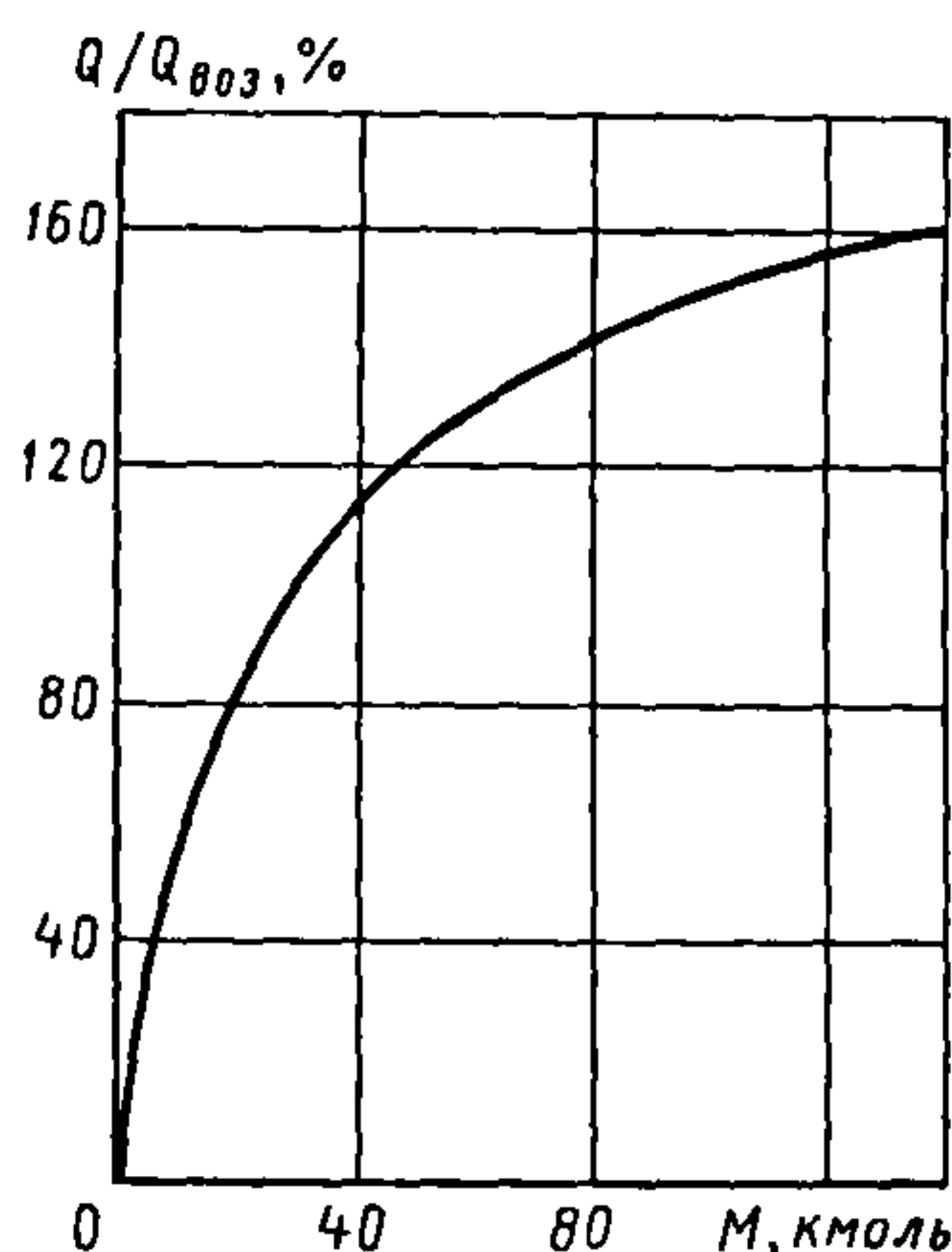


Рис. 10.10. Зависимость удельной производительности парожеторного насоса относительно воздуха от молярной массы откачиваемого газа

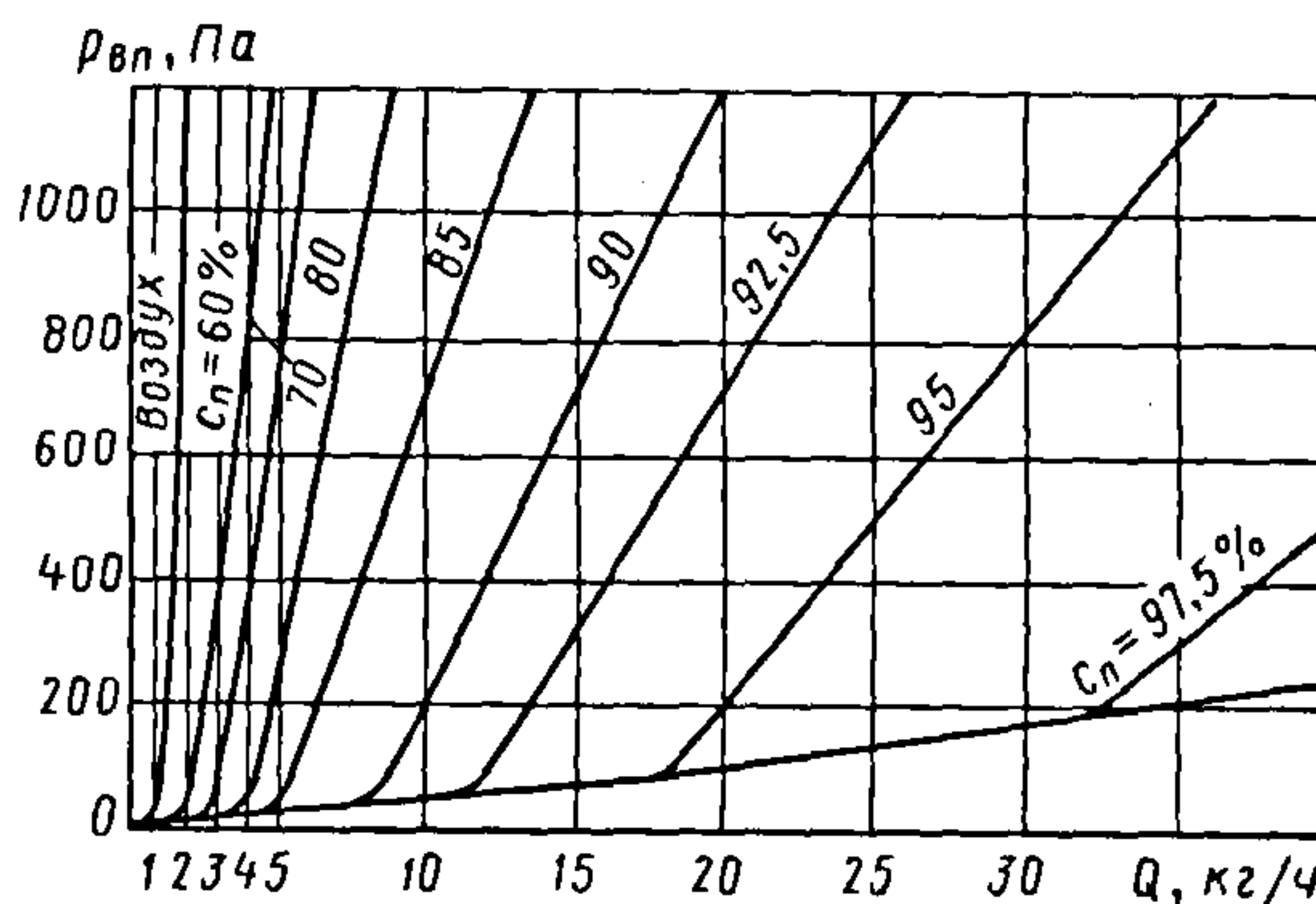


Рис. 10.11. Характеристика пароводяного эжекторного насоса при откачке паровоздушных смесей с различным содержанием пара

Характеристики многоступенчатых пароводяных эжекторных насосов, построенные в виде зависимости впускного давления от относительной производительности  $Q/Q_p$  ( $Q_p$  – расчетная производительность), приведены на рис. 10.9.

Производительность пароводяного эжекторного насоса слабо зависит от температуры откачиваемого газа (при повышении температуры на 100 К производи-

тельность уменьшается примерно на 5 %), но значительно возрастает с увеличением молярной массы откачиваемого газа (рис. 10.10) и доли  $c_n$  пара в паровоздушной смеси (рис. 10.11). На характеристике парожеторного насоса существенно сказывается давление рабочего пара, подаваемого в сопло эжектора: с повышением давления пара производительность возрастает, а впускное давление уменьшается (рис. 10.12).

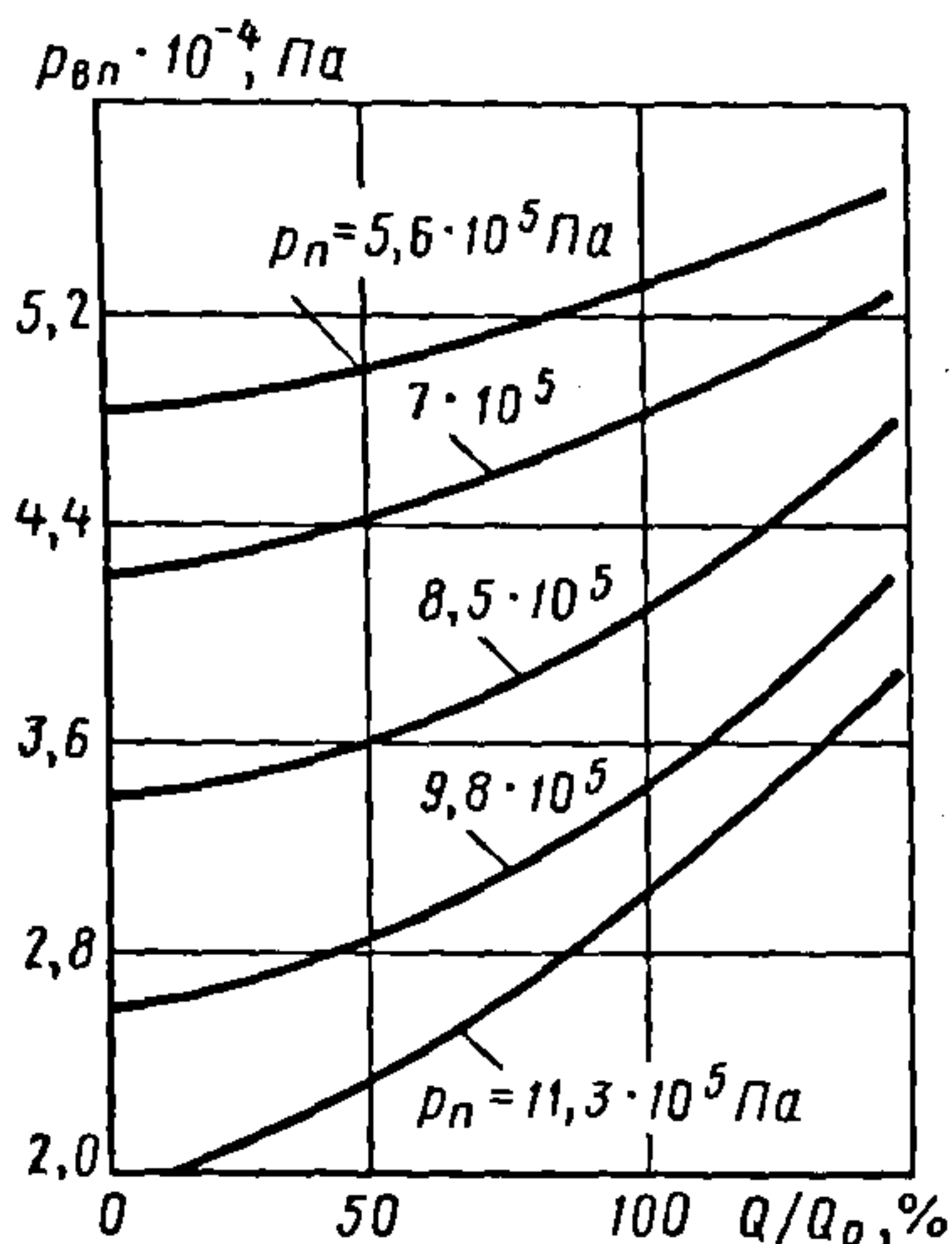


Рис. 10.12. Зависимость впускного давления парожекторного насоса от удельной (на единицу расчетной  $Q_p$  при давлении пара 0,7 МПа) производительности при различных давлениях пара

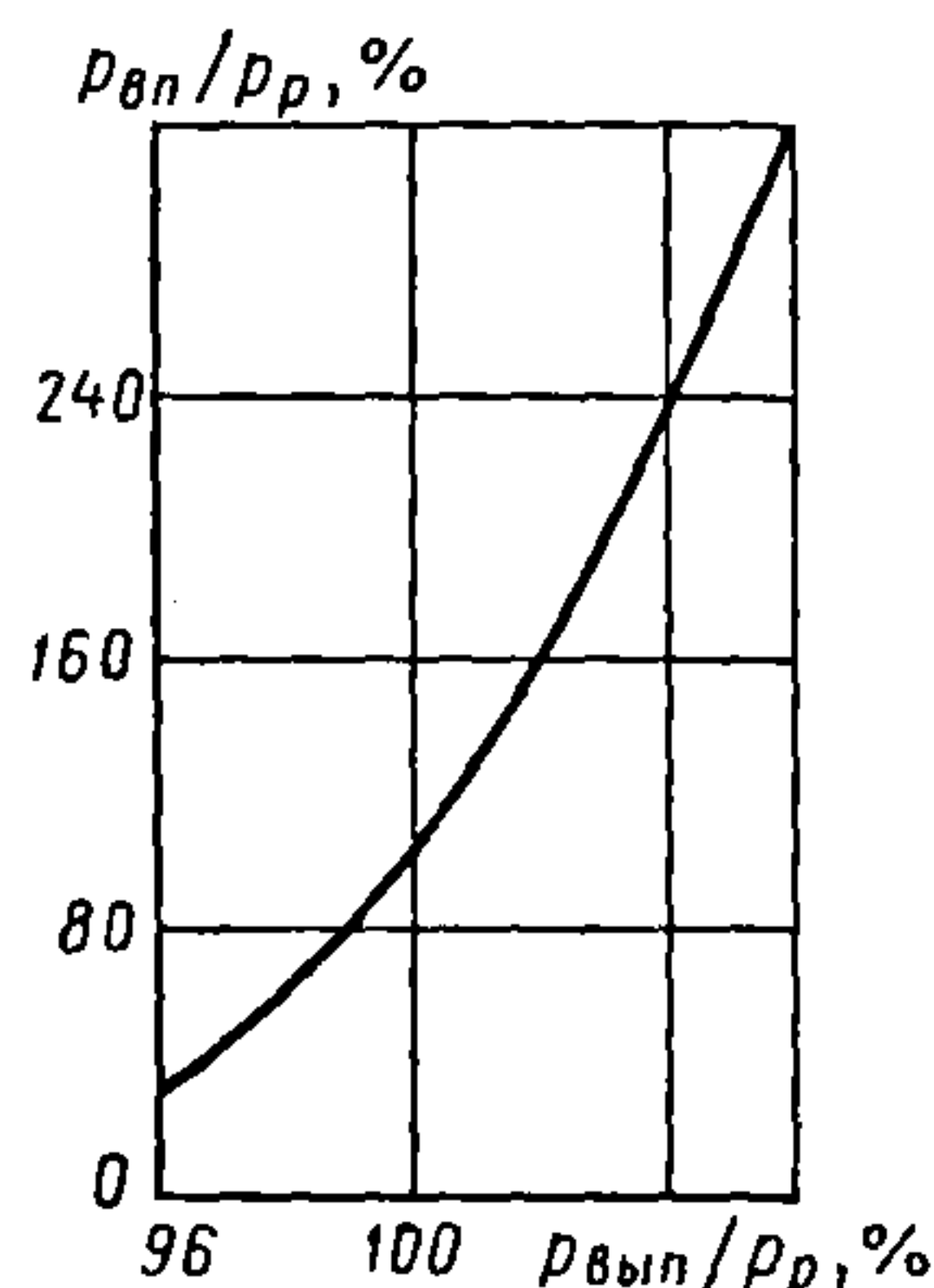


Рис. 10.13. Зависимость относительного впускного от относительного выпускного давления парожекторного насоса:  $p_p$  – расчетное давление

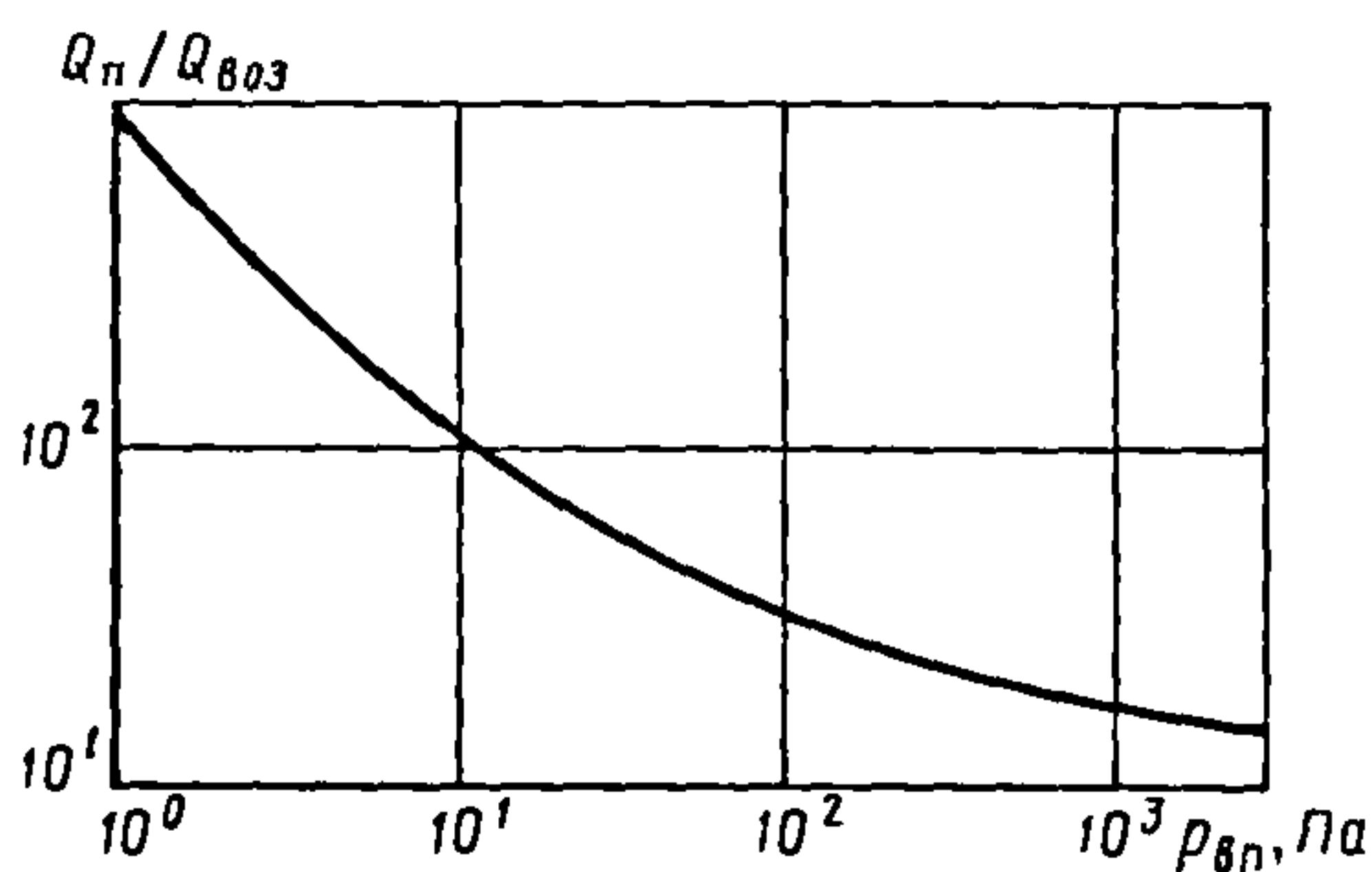


Рис. 10.14. Зависимость удельного (на  $Q_{в03} = 1 \text{ кг/ч}$  откачиваемого сухого воздуха) расхода рабочего пара в шестиступенчатом пароводяном эжекторном насосе от впускного давления в расчетной точке (температура охлаждающей воды 303 К, давление пара 0,7 МПа)

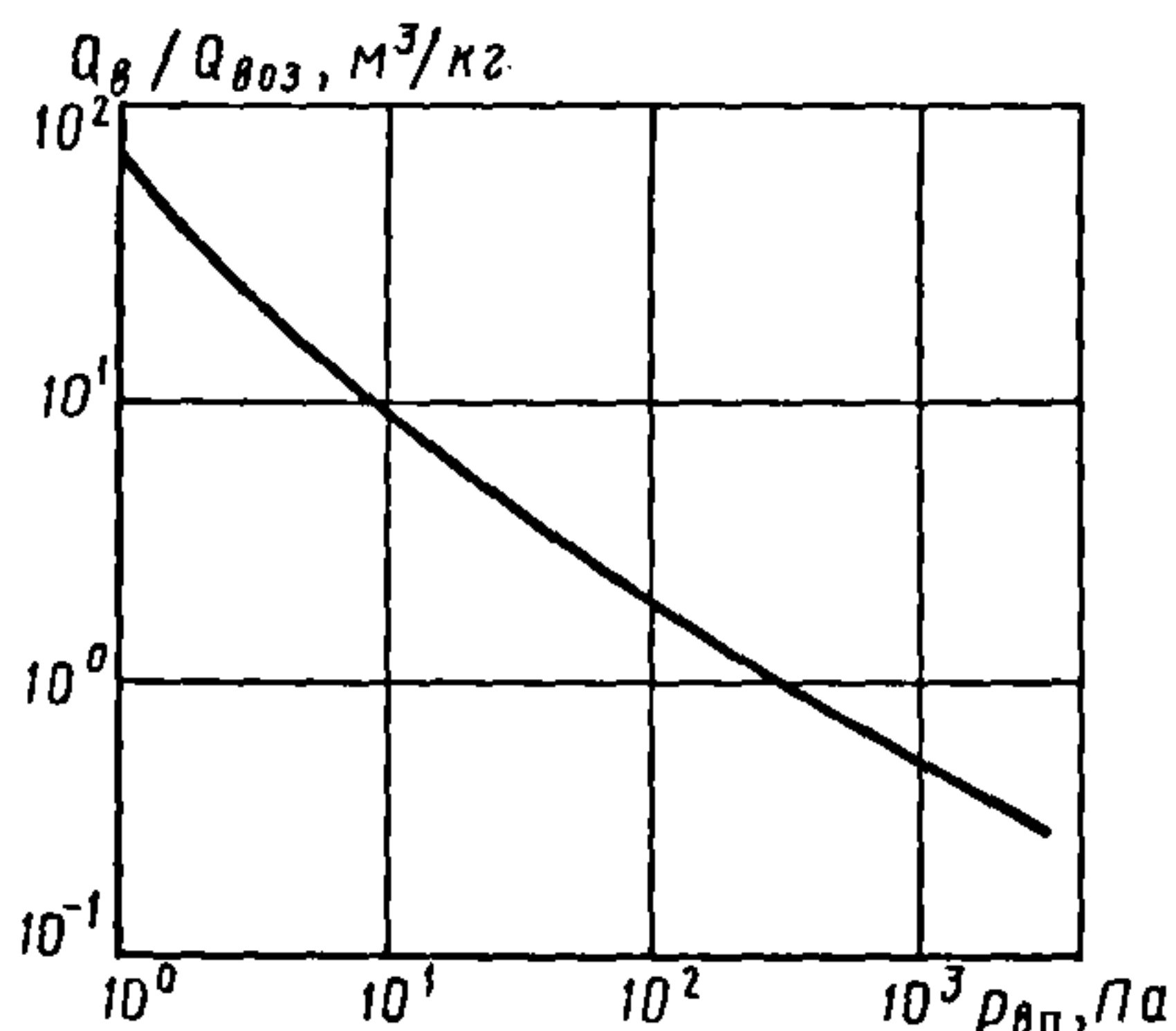


Рис. 10.15. Зависимость удельного (на  $Q_{в03} = 1 \text{ кг/ч}$  откачиваемого сухого воздуха) расхода охлаждающей воды при температуре 303 К в шестиступенчатом пароводяном эжекторном насосе от впускного давления в расчетной точке

Впускное давление, создаваемое эжектором, сильно зависит от выпускного за эжектором (рис. 10.13). Так, повышение давления за эжектором на 2 % приводит к увеличению впускного давления в 1,6 раза.

Удельные характеристики – расходы пара, кг/ч, и охлаждающей воды, м<sup>3</sup>/ч,

отнесенные к 1 кг/ч откачиваемого воздуха, определяющие эффективность работы насосов, существенно зависят от впускного давления, возрастая с его уменьшением (рис. 10.14 и 10.15).

Для пароводяных эжекторных насосов иногда важна скорость диффузии пара из насоса в откачиваемую систему, опре-



деляемая конструкцией насоса, режимом его работы, создаваемым давлением и внешней газовой нагрузкой. Уже при потоке газа, составляющем 10 % от номинальной производительности насоса, диффузия пара уменьшается на несколько порядков, поэтому при работе насоса без внешней газовой нагрузки для снижения диффузии пара следует дополнительно напускать балластный поток осушенного воздуха.

**Методика расчета пароводяного эжекторного насоса.** Исходные данные для расчета: массовая производительность при заданном впускном давлении (рабочая точка); параметры эжектируемого газа в рабочей точке (состав, давление, температура); параметры рабочего пара (давление, температура); температура охлаждающей воды в конденсаторе; наибольшее выпускное давление; основные термодинамические характеристики рабочей и эжектируемой сред.

Требуется определить число ступеней насоса и размеры эжекторов, обеспечивающие заданные характеристики, а также выбрать или рассчитать конденсаторы.

Расчетная схема эжектора приведена на рис. 10.16, а. Допустим, что выходное сечение 1-1 сопла совмещено с входным сечением 2-2 камеры смешения и статические давления пара и газа в сечении 2-2 равны. Процессы течения в сопле и диффузоре, а также процесс смешения протекают с потерями.

Введем обозначения:  $p_{п.0}$ ,  $T_{п.0}$  — параметры рабочего пара на входе в сопло;  $p_{п.к}$ ,  $T_{п.к}$  — то же, в критическом сечении сопла диаметром  $d_k$ ;  $p_{п.1}$ ,  $T_{п.1}$  — то же, в выходном сечении 1-1 сопла;  $p_{г.2}$ ,  $T_{г.2}$  — параметры эжектируемого газа на входе 2-2 в камеру смешения эжектора;  $p_3$ ,  $T_3$  — параметры смеси в сечении 3-3 диаметром  $d_3$ ;  $p_c$ ,  $T_c$  — параметры смеси за диффузором.

В координатах  $I-S$  процесс работы эжектора можно приближенно изобразить диаграммой, показанной на рис. 10.16, б. В идеальном эжекторе без потерь рабочий пар из начального состояния, которому соответствует точка А, расширяется в сопле адиабатически до давления  $p_2$  (точка 2). Состоянию эжектируемого пара (газа) на входе в камеру смешения отвечает точка С, состоянию смеси при изобарическом смешении перед диффузором — точка 3. В диффузоре смесь адиабатически

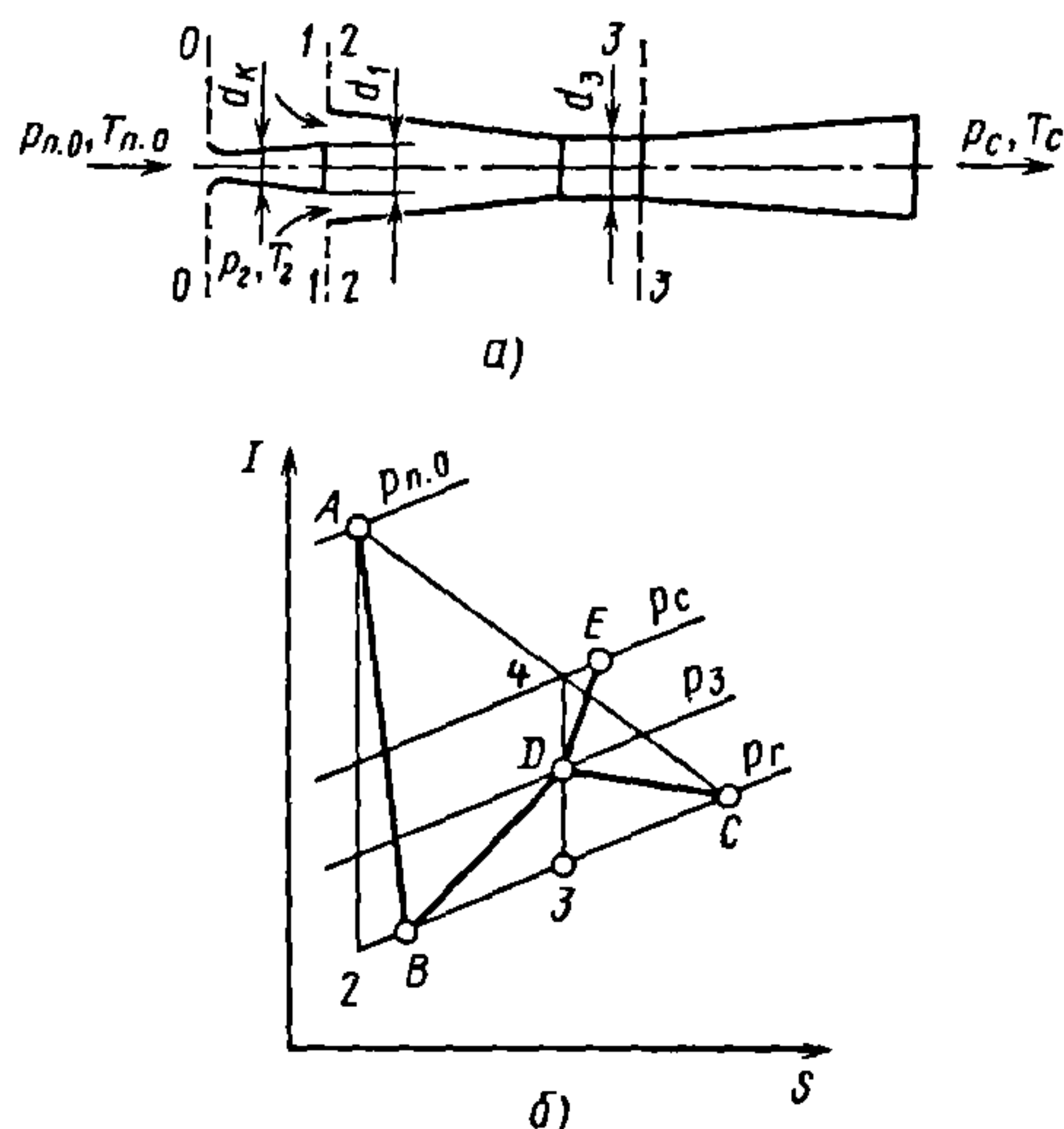


Рис. 10.16. Расчетная схема эжектора (а) и диаграмма состояний пара в координатах энтальпия–энтропия (б)

сжимается от давления  $p_2$  (точка 3) до давления  $p_c$  (точка 4).

В реальном эжекторе пар расширяется в сопле с потерями, поэтому конечному состоянию пара после расширения соответствует точка В. Процесс смешения также сопровождается потерями и не является изобарическим, поэтому состояние смеси в конце камеры смешения характеризуется точкой D. Сжатие смеси в диффузоре тоже влечет за собой потери, и состоянию смеси в конце сжатия соответствует точка Е.

**Порядок расчета.** Степень сжатия откачиваемого газа (парогазовой смеси) в насосе

$$\xi = p_{\text{вып}} / p_{\text{вп}} \quad (10.13)$$

Оптимально равномерное распределение степеней сжатия между и ступенями без конденсаторов, при котором степень сжатия в  $i$ -й ступени

$$\xi_i = \sqrt[n]{\xi} \quad (10.14)$$

Учет условий работы конденсаторов приводит к корректировке распределения.

По диаграмме для паровоздушной смеси (рис. 10.17) определим коэффициент эжекции  $v$  ступени в зависимости от степени расширения  $k$  рабочего пара в сопле и степени сжатия  $\xi_i$  откачиваемого газа в  $i$ -й ступени.

При откачке водяного пара по диаграмме получают заниженное значение  $v$ , что дает 20...30 % запаса по расходу пара. Диаграмма

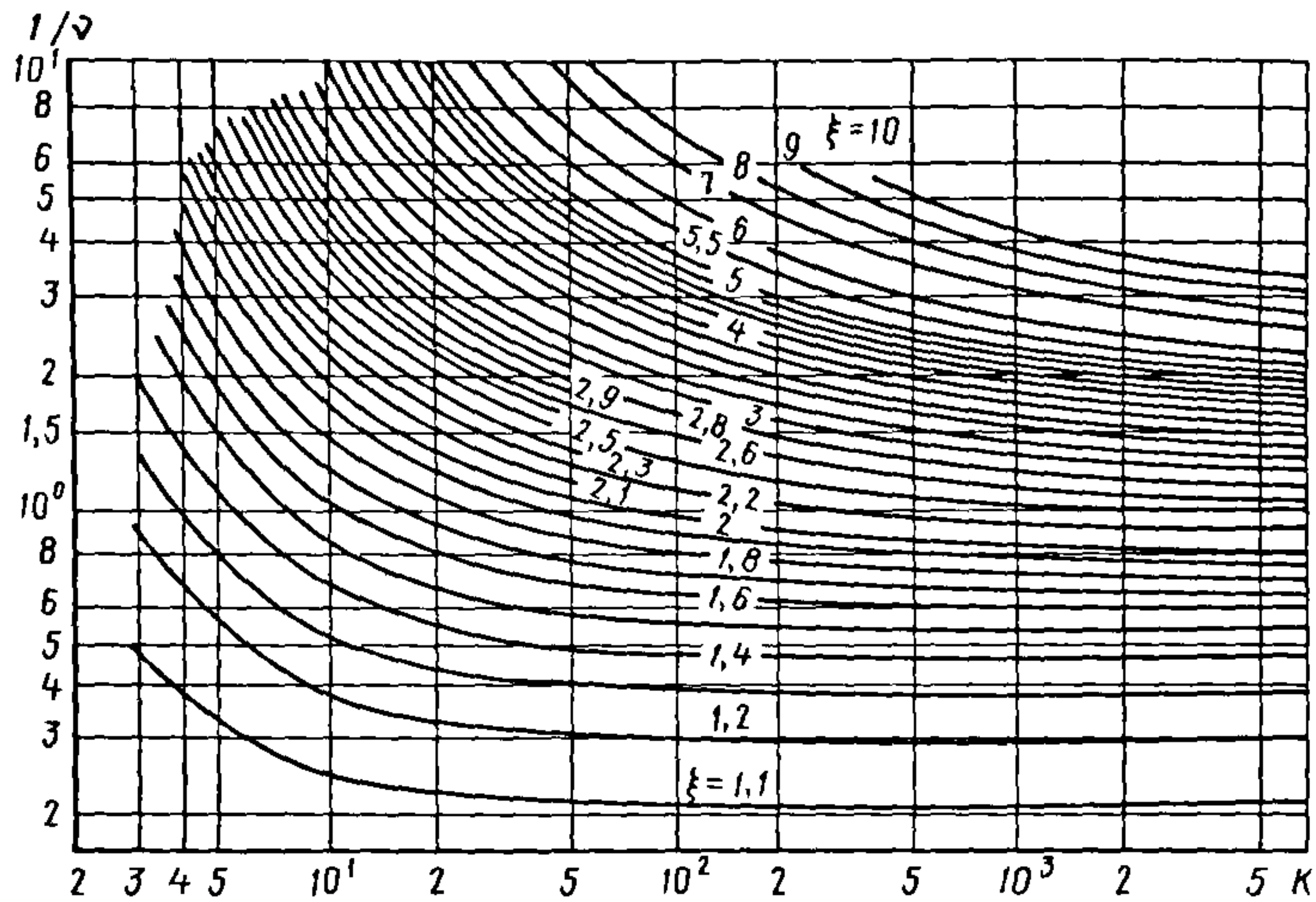


Рис. 10.17. Диаграмма для определения коэффициента эжекции  $v$

действительна для расчета эжекторов с диаметром горловины диффузора 10...100 мм. При больших диаметрах необходимо увеличить расчетное значение степени сжатия  $\xi$  на 5 %. Не рекомендуется диаметр горловины > 250 мм. При давлении рабочего пара > 1,5 МПа диаграмма дает завышенное значение  $v$ .

Массовый расход пара через сопло ступенн, кг/с,

$$Q_n = Q_r / v. \quad (10.15)$$

Площадь сечения горловины (критического сечения сопла),  $m^2$ ,

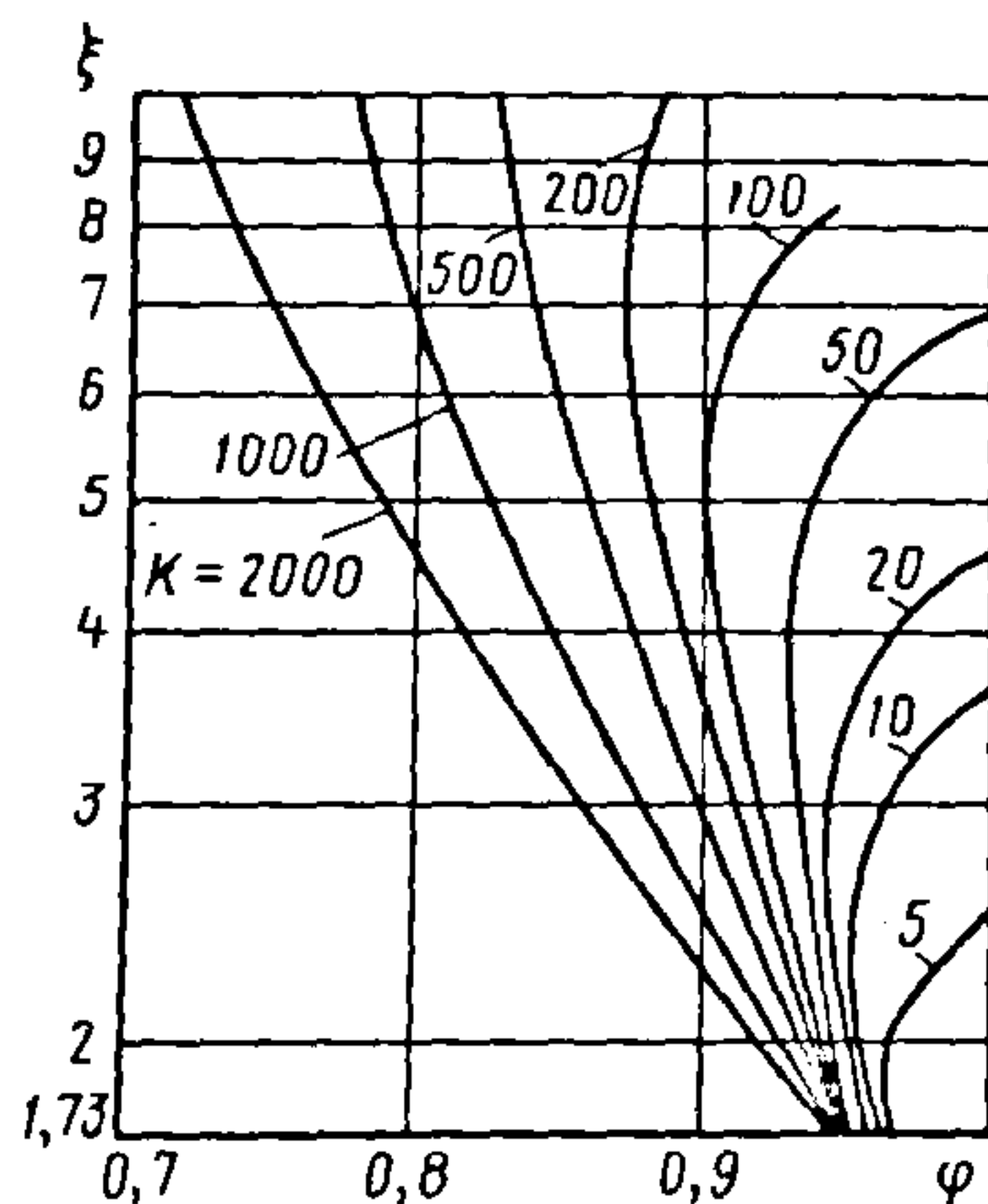


Рис. 10.18. График к определению поправочного множителя  $\phi$

$$F_k = Q_n \left[ \frac{2k_n}{k_n + 1} \frac{p_{n0}}{v_{n0}} \left( \frac{2}{k_n + 1} \right)^{\left( \frac{2}{k_n - 1} \right)^{-0.5}} \right], \quad (10.16)$$

где  $k_n$  — показатель адиабаты рабочего пара (насыщенного —  $k_n = 1,13$ ; перегретого —  $k_n = 1,3$ );  $p_{n0}$  — давление пара, Па;  $v_{n0}$  — удельный объем насыщенного пара,  $m^3/kg$ .

Термодинамические характеристики насыщенного водяного пара при различных температурах приведены в табл. 10.3.

Площадь выходного сечения сопла,  $m^2$ ,

$$F_1 = 1,06 Q_n \left\{ \frac{2k_n}{k_n + 1} \frac{p_{n0}}{v_{n0}} \times \left[ \left( \frac{p_1}{p_{n0}} \right)^{\frac{2}{k_n}} - \left( \frac{p_1}{p_{n0}} \right)^{\frac{k_n + 1}{k_n}} \right]^{-0.5} \right\}. \quad (10.17)$$

Диаметры горловины  $d_k$  и выходного сечения сопла  $d_1$  определим по значениям  $F_k$  и  $F_1$  с углом конусности сопла  $\alpha = 10...20^\circ$ .

Площадь сечения горловины диффузора,  $m^2$ ,

$$F_3 = 1,6(Q_n + Q_r) / (\phi \sqrt{p_c / v_c}), \quad (10.18)$$

где  $p_c$  — давление за ступенью, Па;  $v_c$  — удельный объем смеси при давлении  $p_c$  (принимается как для насыщенного пара),  $m^3/kg$ ;  $\phi$  — поправочный множитель, зависящий от степени расширения  $k$  пара в сопле и степени сжатия  $\xi$  газа в ступени (рис. 10.18).



10.3. Термодинамические характеристики насыщенного водяного пара

$T, K$	$p, Pa$	$v, m^3/kg$	$j \cdot 10^{-6},$ Дж/кг	$r \cdot 10^{-6},$ Дж/кг	$T, K$	$p, Pa$	$v, m^3/kg$	$j \cdot 10^{-6},$ Дж/кг	$r \cdot 10^{-6},$ Дж/кг
173	$1,403 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^7$	2,31	2,84	353	$4,737 \cdot 10^4$	3,41	2,64	2,31
183	$9,676 \cdot 10^{-3}$	$8,74 \cdot 10^7$	2,32	2,84	358	$5,782 \cdot 10^4$	2,83	2,65	2,30
193	$5,474 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^6$	2,33	2,84	363	$6,983 \cdot 10^4$	2,36	2,66	2,28
203	$2,606 \cdot 10^{-1}$	$3,58 \cdot 10^5$	2,34	2,84	368	$8,455 \cdot 10^4$	1,98	2,67	2,27
213	1,081	$9,10 \cdot 10^4$	2,35	2,84	373	$1,013 \cdot 10^5$	1,67	2,68	2,26
223	3,943	$2,62 \cdot 10^4$	2,35	2,84	378	$1,209 \cdot 10^5$	1,42	2,68	2,24
233	$1,283 \cdot 10^1$	$8,38 \cdot 10^3$	2,36	2,84	383	$1,433 \cdot 10^5$	1,21	2,69	2,23
243	$3,799 \cdot 10^1$	$2,95 \cdot 10^3$	2,37	2,84	388	$1,691 \cdot 10^5$	1,04	2,70	2,22
253	$1,032 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^3$	2,38	2,84	393	$1,985 \cdot 10^5$	0,89	2,71	2,20
263	$2,597 \cdot 10^2$	$4,67 \cdot 10^3$	2,39	2,84	398	$2,321 \cdot 10^5$	0,77	2,71	2,19
273	$6,109 \cdot 10^2$	$2,06 \cdot 10^2$	2,50	2,50	403	$2,701 \cdot 10^5$	0,67	2,72	2,18
278	$8,722 \cdot 10^2$	$1,47 \cdot 10^2$	2,51	2,49	408	$3,131 \cdot 10^5$	0,58	2,73	2,16
283	$1,227 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^2$	2,52	2,48	413	$3,615 \cdot 10^5$	0,51	2,73	2,15
288	$1,708 \cdot 10^3$	$7,79 \cdot 10$	2,53	2,47	418	$4,156 \cdot 10^5$	0,45	2,74	2,13
293	$2,335 \cdot 10^3$	$5,78 \cdot 10$	2,54	2,46	423	$4,761 \cdot 10^5$	0,39	2,75	2,11
298	$3,167 \cdot 10^3$	$4,34 \cdot 10$	2,55	2,44	428	$5,434 \cdot 10^5$	0,35	2,75	2,10
303	$4,243 \cdot 10^3$	$3,29 \cdot 10$	2,56	2,43	433	$6,182 \cdot 10^5$	0,31	2,76	2,08
308	$5,624 \cdot 10^3$	$2,52 \cdot 10$	2,56	2,42	438	$7,010 \cdot 10^5$	0,27	2,76	2,07
313	$7,377 \cdot 10^3$	$1,95 \cdot 10$	2,57	2,41	443	$7,922 \cdot 10^5$	0,24	2,77	2,05
318	$9,585 \cdot 10^3$	$1,53 \cdot 10$	2,58	2,40	448	$8,928 \cdot 10^5$	0,22	2,77	2,03
323	$1,234 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10$	2,59	2,38	453	$1,003 \cdot 10^6$	0,19	2,78	2,01
328	$1,618 \cdot 10^4$	9,58	2,60	2,37	458	$1,124 \cdot 10^6$	0,17	2,78	1,99
333	$1,992 \cdot 10^4$	7,68	2,61	2,36	463	$1,256 \cdot 10^6$	0,16	2,79	1,98
338	$2,501 \cdot 10^4$	6,20	2,62	2,35	468	$1,399 \cdot 10^6$	0,14	2,79	1,96
343	$3,117 \cdot 10^4$	5,04	2,63	2,33	473	$1,155 \cdot 10^6$	0,13	2,79	1,94
348	$3,856 \cdot 10^4$	4,13	2,64	2,32					

Условные обозначения:  $T, p$  – температура и давление пара в состоянии насыщения;  $v, i, r$  – удельные объем, энтальпия и теплота парообразования соответственно.

Площадь входного сечения конфузора, которая должна обеспечить скорость эжектируемого потока в кольцевом сечении между соплом и конфузуром  $v_r < 90$  м/с, равна  $F_2 \approx (2,0...2,8)F_3$ .

Диаметры  $d_3$  и  $d_2$  определим по значениям  $F_3$  и  $F_2$ , диаметр выходного сечения диффузора  $d_c = (1,6...2,0)d_3$ . Угол конусности конфузора примем равным  $5...7^\circ$ , угол конусности диффузора  $5...8^\circ$ .

Длину камеры смешения (расстояние от выходного сечения сопла до горловины диффузора) найдем по зависимости

$$L/d_3 = 4,6 + 0,054\xi. \quad (10.19)$$

Длину  $l$  горловины диффузора выбираем равной  $2d_3$ .

10.4. БУСТЕРНЫЕ НАСОСЫ

**Принцип действия.** Бустерные насосы применяют для удаления больших потоков газа из вакуумных установок в диапазоне давлений  $10...10^{-2}$  Па и наибольшем выпускном давлении  $100...200$  Па, обеспечиваемом вспомогательным форвакуумным насосом.

Область рабочих давлений бустерных насосов характеризуется режимом течения откачиваемого газа переходным от вязкостного (на верхней границе диапазона  $10$  Па) до молекулярного (на нижней границе диапазона  $10^{-2}$  Па).

Увлечение газа паровой струей в бустерном насосе определяется вязкостным трением на границе струя – газ при высоком давлении и диффузией газа в струю при низком. В связи с этим для лучшего откачивающего действия при высоком давлении струя должна быть достаточно плотной, при низком давлении – довольно разреженной. Так как режим

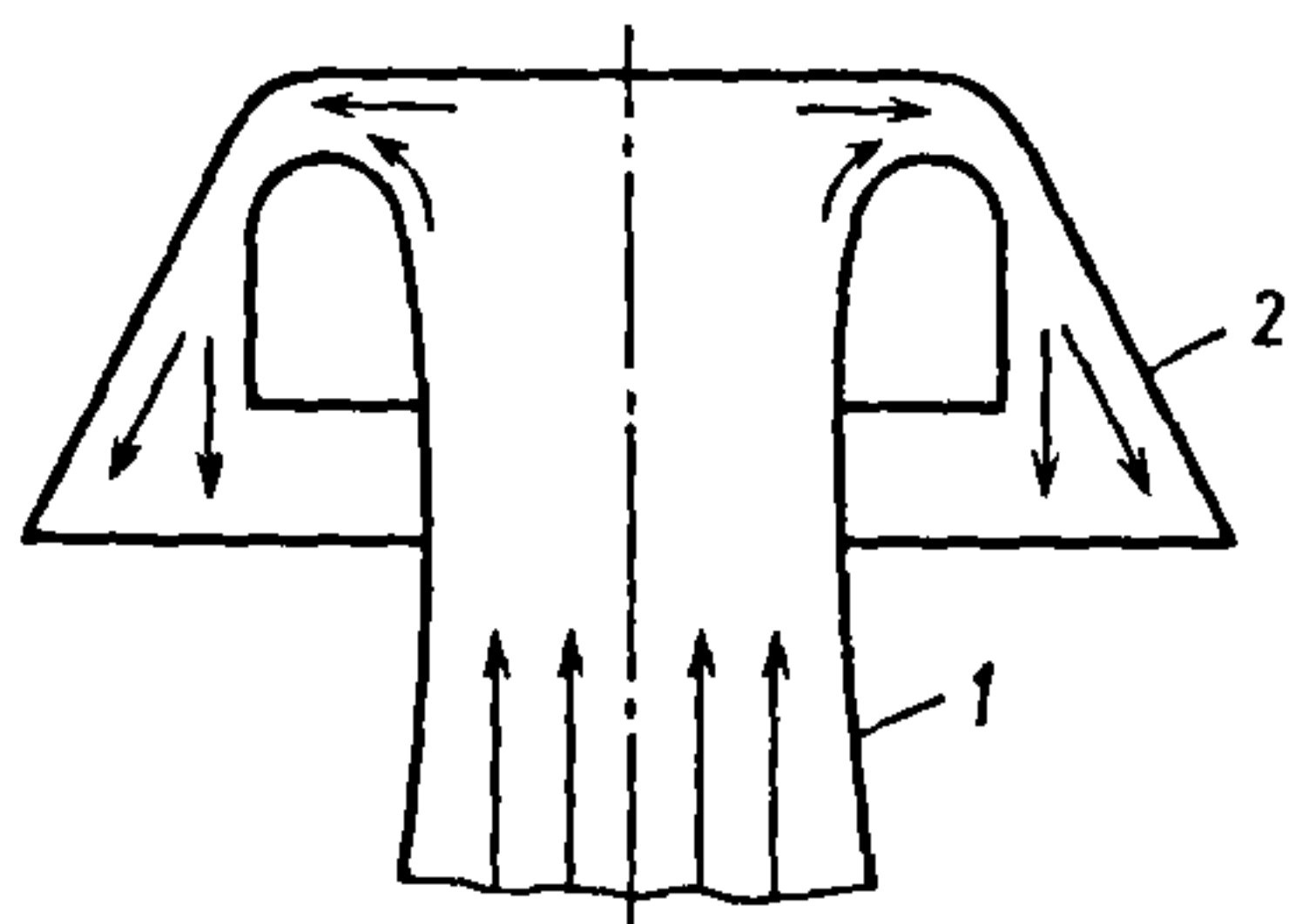


Рис. 10.19. Схема обращенного сопла зонтичного типа

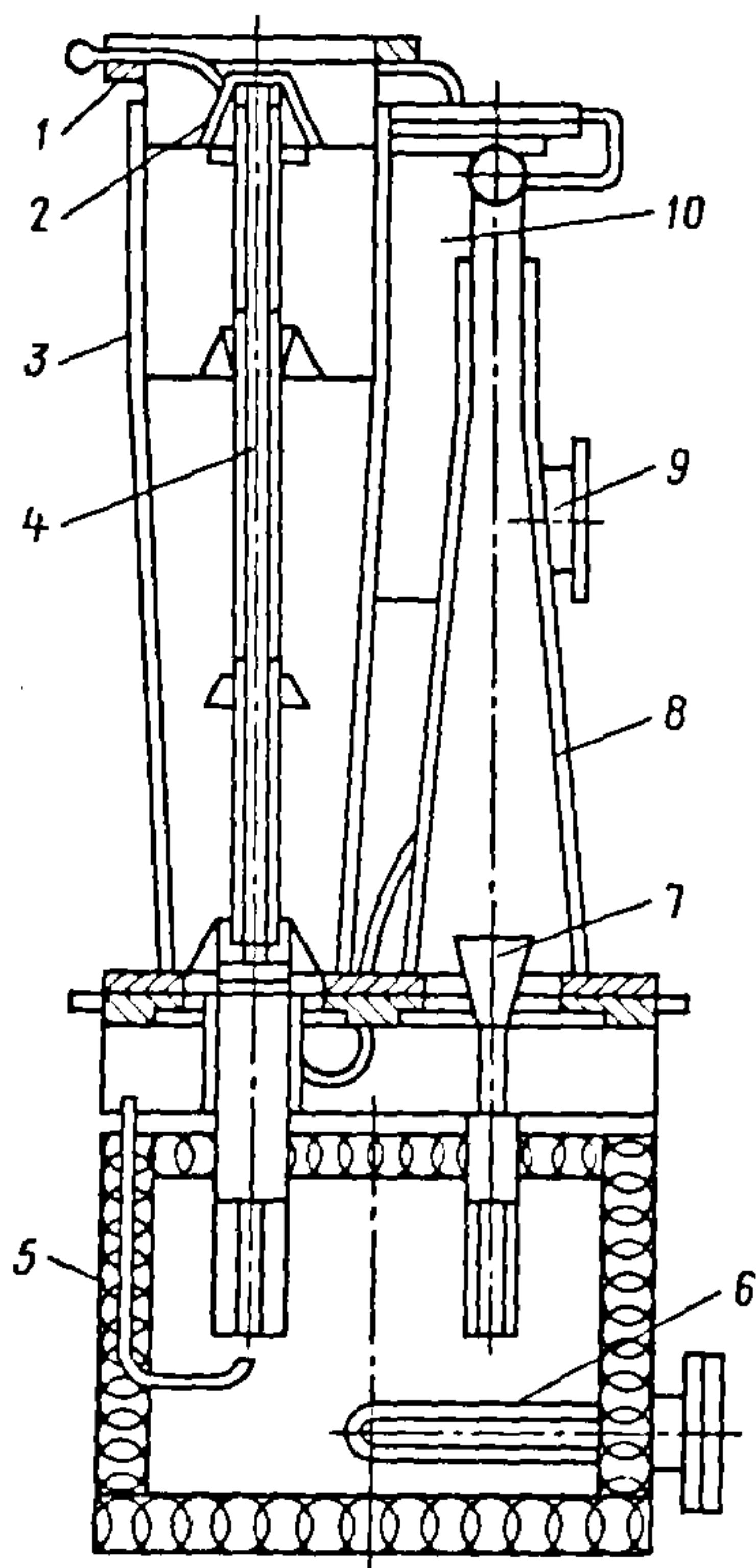


Рис. 10.20. Схема четырехступенчатого паромасляного бустерного насоса

истечения паровой струи практически не зависит от давления откачиваемого газа в рабочем диапазоне впускных давлений и в процессе откачки не меняется, его приходится выбирать с таким расчетом, чтобы обеспечить достаточно высокую быстроту действия во всей рабочей области. Зависимость быстроты действия насоса от впускного давления имеет максимум при среднем давлении для выбранной области рабочих давлений. Максимальная быстрота действия [74] современных бустерных насосов соответствует давлению  $\sim 1$  Па.

**Устройство насосов.** Бустерные насосы являются многоступенчатыми пароструйными насосами, в которых рабочим телом является пар специальных вакуумных рабочих жидкостей.

Отличие бустерных насосов от многоступенчатых парожеткорных состоит в использовании в первых ступенях насосов не прямооточных, а так называемых обращенных сопел зонтичного типа (рис. 10.19).

Пар поступает по паропроводящей трубе, соединенной с подсопельником 1, затем изменяет направление движения на обратное, проходит через наименьшее сечение сопла, где скорость пара становится равной критической, и далее расширяется с увеличением скорости до сверхзвуковой в кольцевом канале, образуемом подсопельником и зонтом 2.

На рис. 10.20 приведена схема четырехступенчатого паромасляного бустерного насоса. Насос состоит из охлаждаемого водой корпуса 3 со впускным 1 и выпускным 9 фланцами, паропровода 4, объединяющего три зонтичные ступени; сопла 7 и конфузора 8 выходной эжекторной ступени, кипятильника 5; маслоотражателя 2 и выходной ловушки 10. Кипятильник цилиндрической формы сообщается со ступенями насоса двумя паропроводами. Внутри кипятильника установлен сменный трубчатый нагреватель 6 закрытого типа. Снаружи кипятильник окружен теплоизоляционным материалом и защитным кожухом. В нижней части кипятильника имеется сливное отверстие для рабо-



чей жидкости; для измерения уровня рабочей жидкости предусмотрен уровнемер.

Рабочая жидкость нагревается до рабочей температуры, соответствующей давлению насыщенного пара (1...2 кПа), который поступает по паропроводам к соплу эжекторной ступени и к зонтичным соплам первых трех ступеней. Откачиваемый газ, захватываемый паровой струей первой ступени, сжимается до выпускного давления этой ступени и увлекается к холодной стенке, где пар конденсируется и стекает в кипятильник, а газ увлекается струей последующей ступени и т.д.

Для уменьшения количества паров рабочей жидкости, проникающих из струи первой ступени в откачиваемую систему, над зонтом ступени установлен охлаждаемый водой маслоотражатель 2, уменьшающий миграцию масла в систему примерно на 95 %. Для улавливания паров рабочей жидкости за эжекторной ступенью служит охлаждаемая водой дисковая ловушка 10.

**Рабочие жидкости.** Основными требованиями [74], предъявляемыми к рабочим жидкостям, являются: высокое давление пара при рабочей температуре в кипятильнике; малая теплота парообразования; узкий фракционный состав, исключаяющий заметное изменение характеристик рабочей жидкости при удалении из нее легких фракций во время работы насоса.

В отечественных бустерных насосах в качестве рабочих жидкостей применяют масло для вспомогательных пароструйных насосов, масло ВМ-3, а также синтетическую жидкость Алкарен-11.

Масло для вспомогательных пароструйных насосов представляет собой продукт дистилляции медицинского вазелинового масла, сравнительно дешево, имеет низкую термическую и термоокислительную стойкость (стойкость к окислению кислородом воздуха при рабочей температуре в насосе).

Масло ВМ-3 – продукт дистилляции недоочищенных веретенных масел. По термоокислительной стойкости масло

ВМ-3 почти в 50 раз превосходит масло для вспомогательных насосов. Вместе с тем масло ВМ-3 более легкокипящее, поэтому его потери из насоса больше, чем масла для вспомогательных насосов при одинаковых рабочих условиях.

Алкарен-11 – синтетическая углеводородная жидкость на основе алкилнафталинов – может быть применена при откачке коррозионных сред.

Характеристики вакуумных масел для бустерных насосов приведены в табл. 10.4, где обозначены  $p_n$  и  $p$  – давление паров и плотность масла при  $T=293$  К;  $\nu$  – кинематическая вязкость масла при  $T=323$  К.

**10.4. Характеристики вакуумных масел для бустерных насосов**

Вакуумное масло	$p_n$ , Па	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Для вспомо- гательных насосов	$6,7 \cdot 10^{-3} \dots$ $1,3 \cdot 10^{-4}$	12,5... 15,3	850
ВМ-3	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	7...10	
Алкарен-11	$4 \cdot 10^{-3}$	8...11	927

**Характеристики бустерных насосов** – быстрота действия, производительность и наибольшее выпускное давление – существенно зависят от мощности, подводимой к кипятильнику насоса. Изменяя подводимую мощность, можно сдвигать максимум кривой зависимости быстроты действия от впускного давления в области высоких или низких давлений (рис. 10.21).

Вследствие значительной плотности паровых струй, истекающих из сопел бустерных насосов, последние хорошо откачивают легкие газы. Так, быстрота действия по водороду для некоторых насосов вдвое превышает аналогичный показатель по воздуху при номинальной мощности нагревателя насоса.

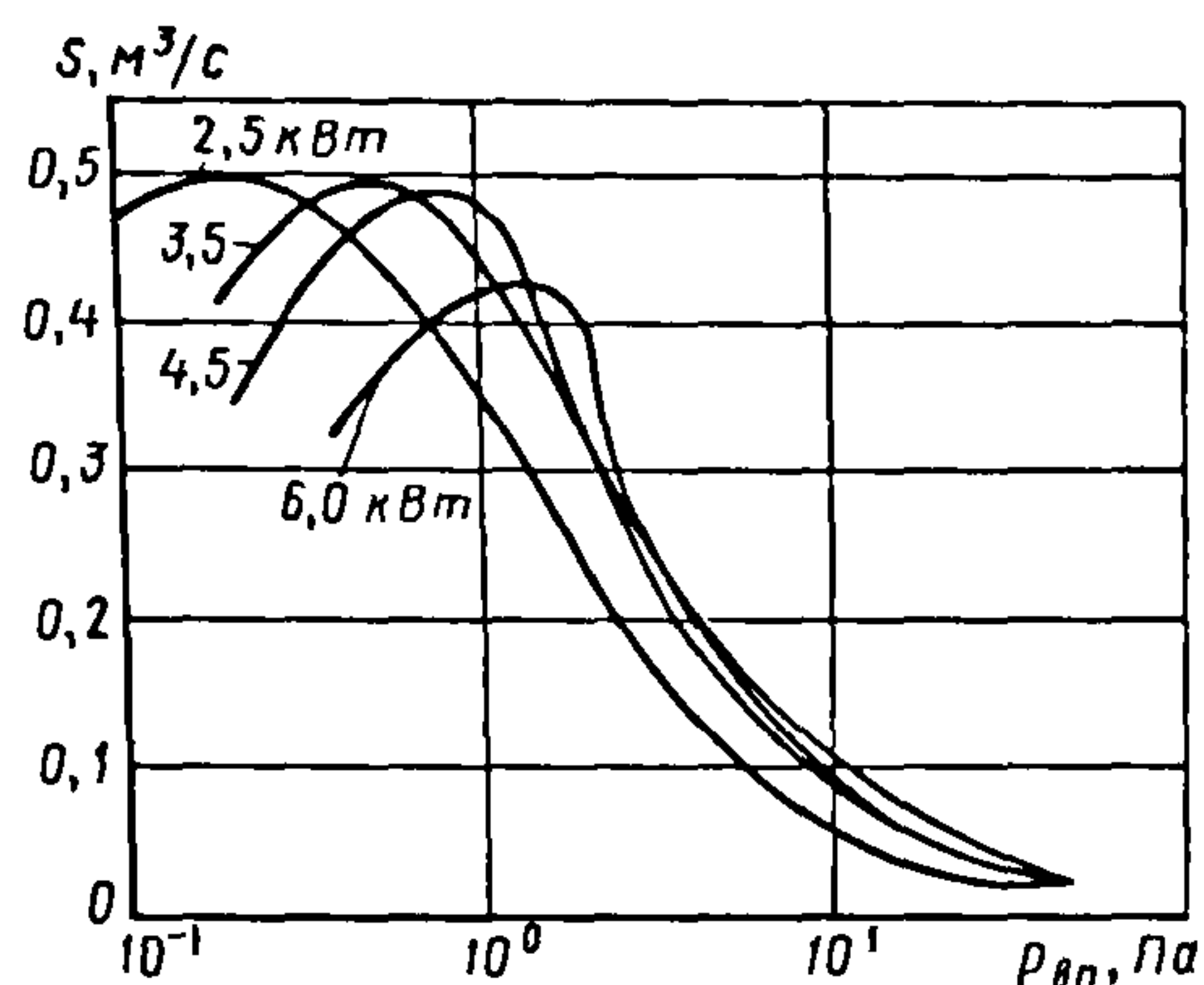


Рис. 10.21. Зависимость быстроты действия бустерного насоса от впускного давления при разной мощности нагревателя

Важнейшая характеристика бустерных насосов – обратный поток масляного пара из насоса в откачиваемую систему. Для бустерных насосов с колпачковым охлаждаемым водой маслоотражателем удельный обратный поток масла составляет  $\leq 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ мг/(мин} \cdot \text{см}^2)$  при работе насосов в области давлений  $\leq 1 \text{ Па}$ .

Характеристики отечественных бустерных насосов 2НВБМ-0,9, 2НВБМ-3, 2НВБМ-6, 2НВБМ-20 (рис. 10.22, а, б, в), выпускаемых ОАО «Вакууммаш» (г. Казань), приведены в табл. 10.5.

#### 10.5. Технические характеристики бустерных насосов, выпускаемых в России

Параметр	Значение параметра для насоса			
	2НВБМ-0,9	2НВБМ-3	2НВБМ-6	2НВБМ-20
Быстрота действия при $p_{\text{вп}} = 1,3 \dots 1,3 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ , $\text{дм}^3/\text{с}$	880	2800	6200	18600
Предельное остаточное давление $p_0^*$ , Па	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$		
Наибольшее выпускное давление (при $p_{\text{вп}} = 1,3 \text{ Па}$ ), Па	93	200		
Расход охлаждающей воды $Q_v$ при $T = (288 \pm 5) \text{ К}$ и $p = 0,1 \dots 0,3 \text{ МПа}$ , $\text{дм}^3/\text{ч}$	145	360	600	1800
Мощность нагревателя (при номинальном напряжении 380 В), кВт	2	6	12	36
Объем масла ВМ-3, заливаемого в насос, $\text{дм}^3$	7	30	50	80
$D_y$ фланца, мм:				
впускного	160	250	400	630
выпускного	40	100	160	160
Требуемая быстрота действия форвакуумного насоса, $\text{дм}^3/\text{с}$	15	20	40	120
Габаритные размеры, мм	500×424×1026	721×588×1691	1150×910×2323	1500×1290×2667
Масса, кг	60	160	300	1400

\*Давление измерено при работе насоса на масле ВМ-3 манометрическим преобразователем давления с ловушкой, охлажденной жидким азотом.



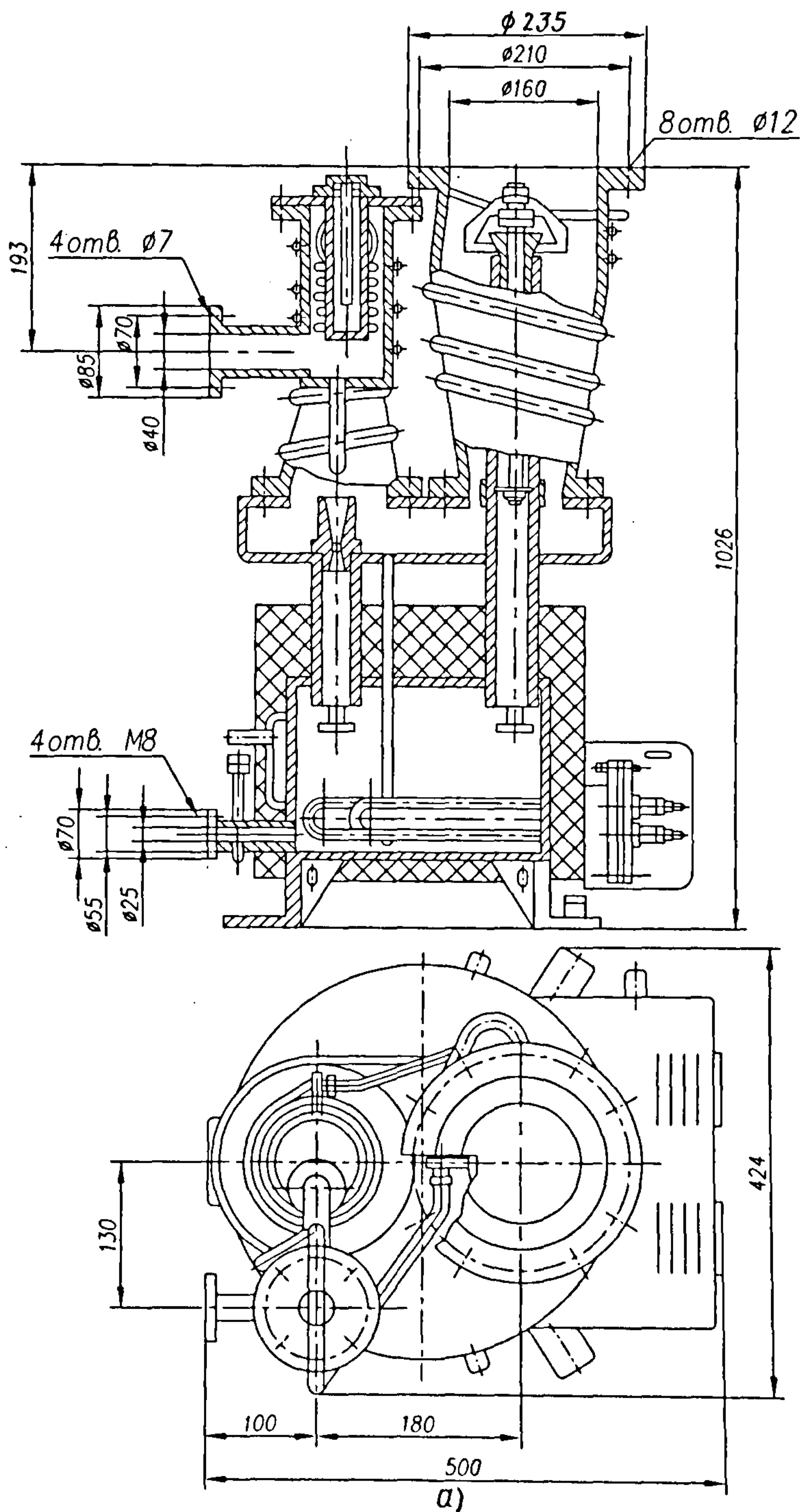


Рис. 10.22. Бустерные насосы 2НВБМ-0,9 (а), 2НВБМ-3 (б), 2НВБМ-6 (в), 2НВБМ-20 (г)

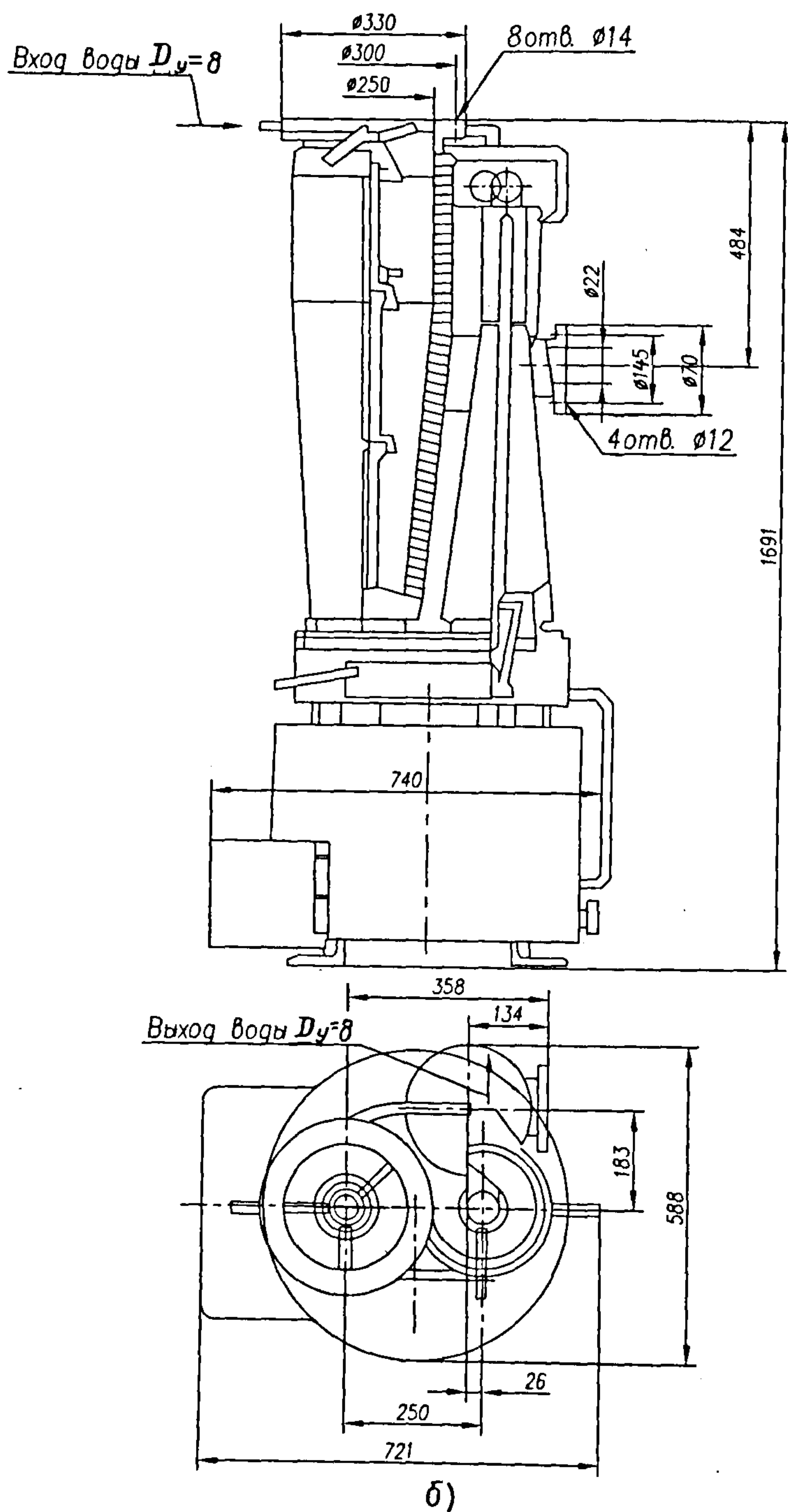


Рис. 10.22. Продолжение



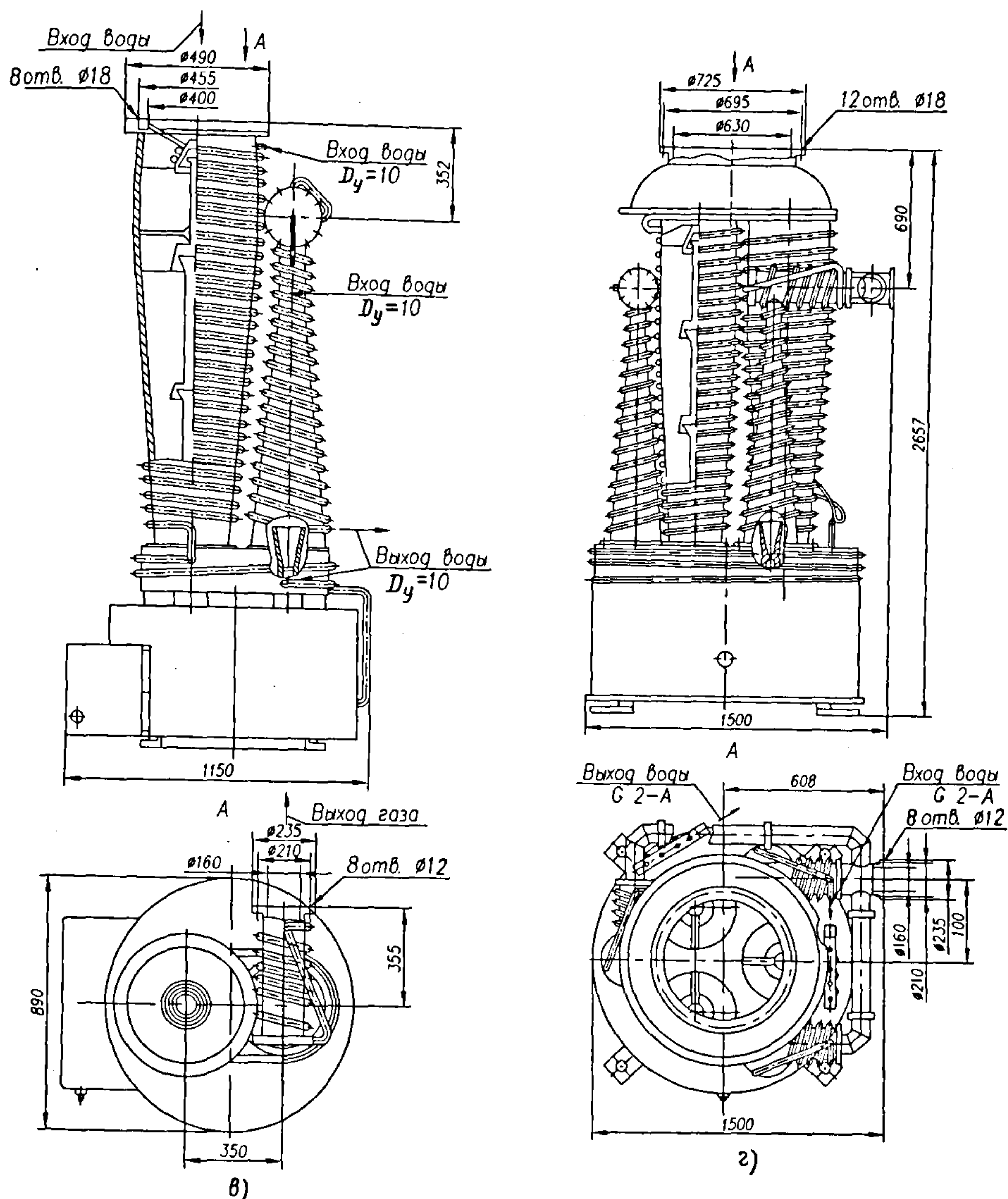


Рис. 10.22. Окончание

### 10.5. ДИФфуЗИОННЫЕ НАСОСЫ

**Принцип действия.** Диффузионные насосы применяют для откачки вакуумных систем до остаточных давлений  $10^{-1} \dots 10^{-5}$  Па и ниже, соответствующих молекулярному режиму течения газа. При тепловом движении через впускное отверстие насоса молекулы газа направляются к паровой струе. Под действием разности

концентраций газа над паровой струей и в струе (концентрация газа в струе вблизи сопла пренебрежимо мала) происходит нестационарная диффузия газа в струю. Попав в струю, молекулы газа получают импульсы от молекул пара в направлении парового потока и уносятся вместе со струей к стенке корпуса насоса; при этом пар конденсируется на охлаждаемой стенке, а газ, сжатый в струе до выпускного

давления ступени, перетекает вдоль стенки в пространство над следующей ступенью насоса.

Наряду с прямым потоком проходит и обратный поток газа в струю со стороны форвакуума. Однако в этом случае молекулы газа, движущиеся в обратном направлении, сталкиваются со встречными молекулами пара и получают импульсы движения в сторону форвакуума; лишь небольшая часть молекул может пройти через струю в обратном направлении. Число молекул газа, проходящих через струю в обратном направлении, при оптимальном режиме работы насоса незначительно мало по сравнению с числом молекул газа, попадающих в струю со стороны впускного отверстия насоса. Однако в ряде случаев, например при откачке легких газов насосом, режим работы которого оптимален для откачки азота, влияние обратного потока может заметно сказываться на характеристиках насоса.

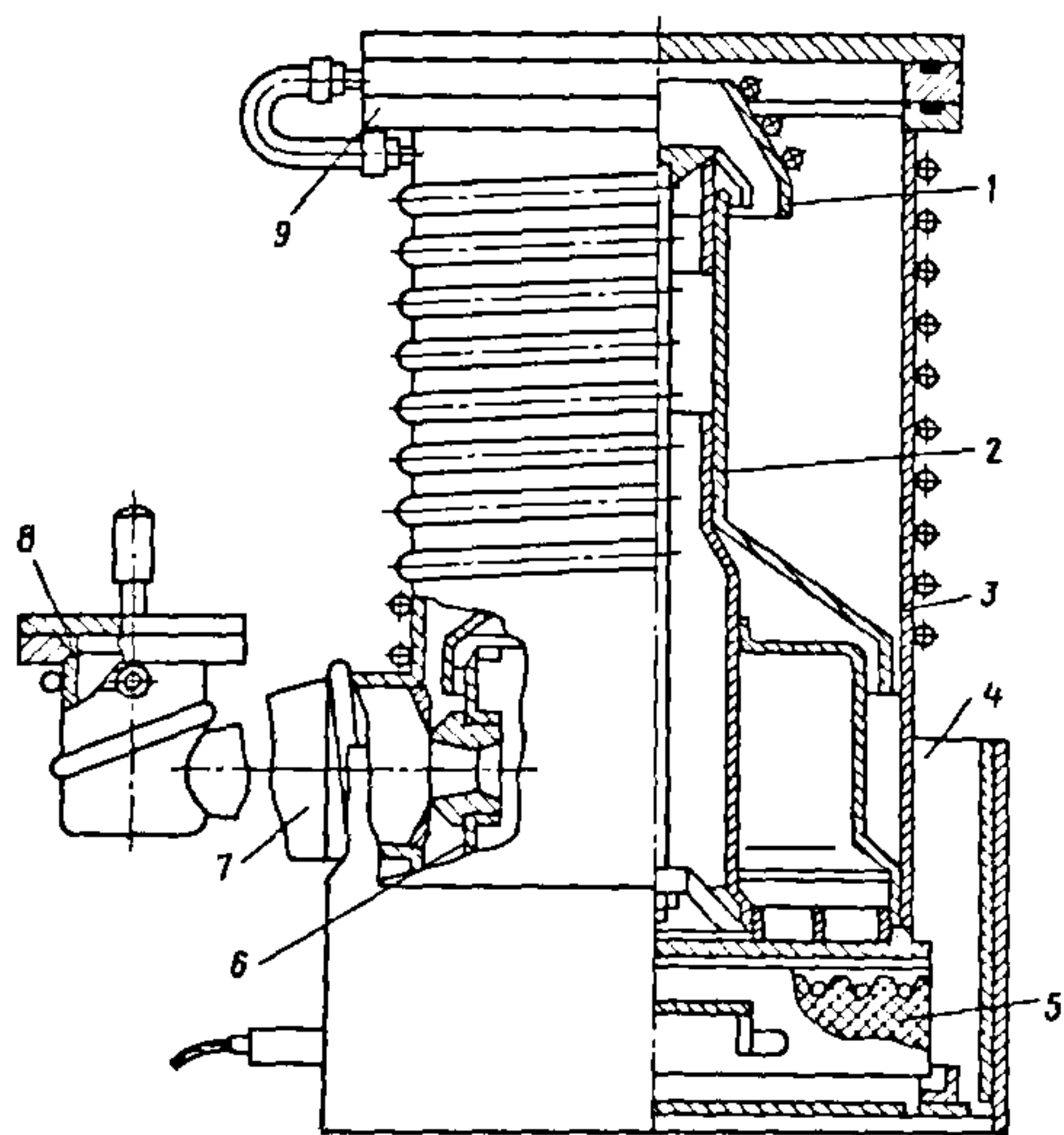


Рис. 10.23. Схема паромасляного трехступенчатого фракционирующего диффузионного насоса:

1 — маслоотражатель; 2 — паропровод; 3 — корпус; 4 — защитный кожух; 5 — электронагреватель; 6 — эжекторное сопло; 7 — конфузор эжектора; 8 и 9 — выпускной и впускной фланцы соответственно

**Устройство насосов.** Диффузионные насосы, подобно бустерным, являются многоступенчатыми системами с соплами обращенного зонтичного типа. В зависимости от рода рабочей жидкости, используемой в насосе, диффузионные насосы подразделяют на *паромасляные* и *парортутные*. В паромасляных насосах используют рабочие жидкости органического происхождения с низким давлением пара при нормальной температуре. Как правило, это смеси фракций с различными молярными массами и давлениями пара.

Требования к рабочей жидкости паромасляных насосов, обеспечивающие наиболее благоприятные условия работы отдельных ступеней, различны. Так, для работы первой (входной) ступени, определяющей предельное остаточное давление и быстроту действия насоса, нужна рабочая жидкость с низким давлением пара при нормальной температуре (для получения низкого остаточного давления) и при рабочей температуре в кипятильнике (в связи с необходимостью создания паровой струи малой плотности для обеспечения большой скорости диффузии газа в струю).

Для последней (выходной) ступени, определяющей наибольшее выпускное давление насоса, давление пара при нормальной температуре незначительно, а при рабочей температуре в кипятильнике оно должно быть возможно большим для получения струи высокой плотности. С учетом этого в конструкциях современных паромасляных диффузионных насосов предусматривают фракционирование рабочей жидкости в самом насосе. При этом тяжелые фракции с малым давлением пара направляются к первой ступени, а легкие фракции с большим давлением пара — к последней ступени. Такие насосы называют *фракционирующими*.

Схема типичного паромасляного трехступенчатого фракционирующего диффузионного насоса дана на рис. 10.23. Первые две ступени насоса — зонтичного типа, третья — эжекторная. Для фракционирования рабочей жидкости в насосе



разделены трубы, подводящие пар к ступеням, и на днище насоса установлен специальный лабиринт, образуемый фракционирующими кольцами. Конденсат масла, стекающий по стенке корпуса 3 насоса в кипятильник, проходя по лабиринту во фракционирующем устройстве, испаряется, обедняясь по мере движения к внутренней трубе легкими фракциями с высоким давлением пара.

Утяжеленная часть рабочей жидкости, состоящая из фракций с низким давлением пара, попадает во внутреннюю трубу и направляется к первой, высоковакуумной ступени, а легкие фракции *поступают во вторую и эжекторную ступени*. Корпус 3 насоса и маслоотражатель 1 охлаждаются водой.

В ряде случаев, например в передвижных установках, насосы с водяным охлаждением применять неудобно; тогда используют насосы с принудительным воздушным охлаждением (рис. 10.24). Насос охлаждается вентилятором 1, установленным на корпусе 2, для более эф-

фективного охлаждения на корпусе насоса предусмотрены ребра.

Основные конструкционные материалы паромасляных насосов – алюминий (детали паропровода, сопла) и низкоуглеродистая или коррозионно-стойкая сталь (корпус).

Общий вид, габаритные и присоединительные размеры паромасляных диффузионных насосов типа НД с диаметрами входного патрубка 250; 400; 500; 630; 800 и 1000 мм, выпускаемых ОАО «Вакууммаш» (г.Казань), представлены на рис. 10.25.

Парортутные насосы конструктивно отличаются от паромасляных, что обусловлено свойствами ртути, существенно ограничивающими возможность ее использования в насосах в качестве рабочей жидкости. Ртутные насосы применяют главным образом для откачки систем, в которых пары ртути являются рабочей средой (ртутные выпрямители, лампы), и в установках, где необходима высокая

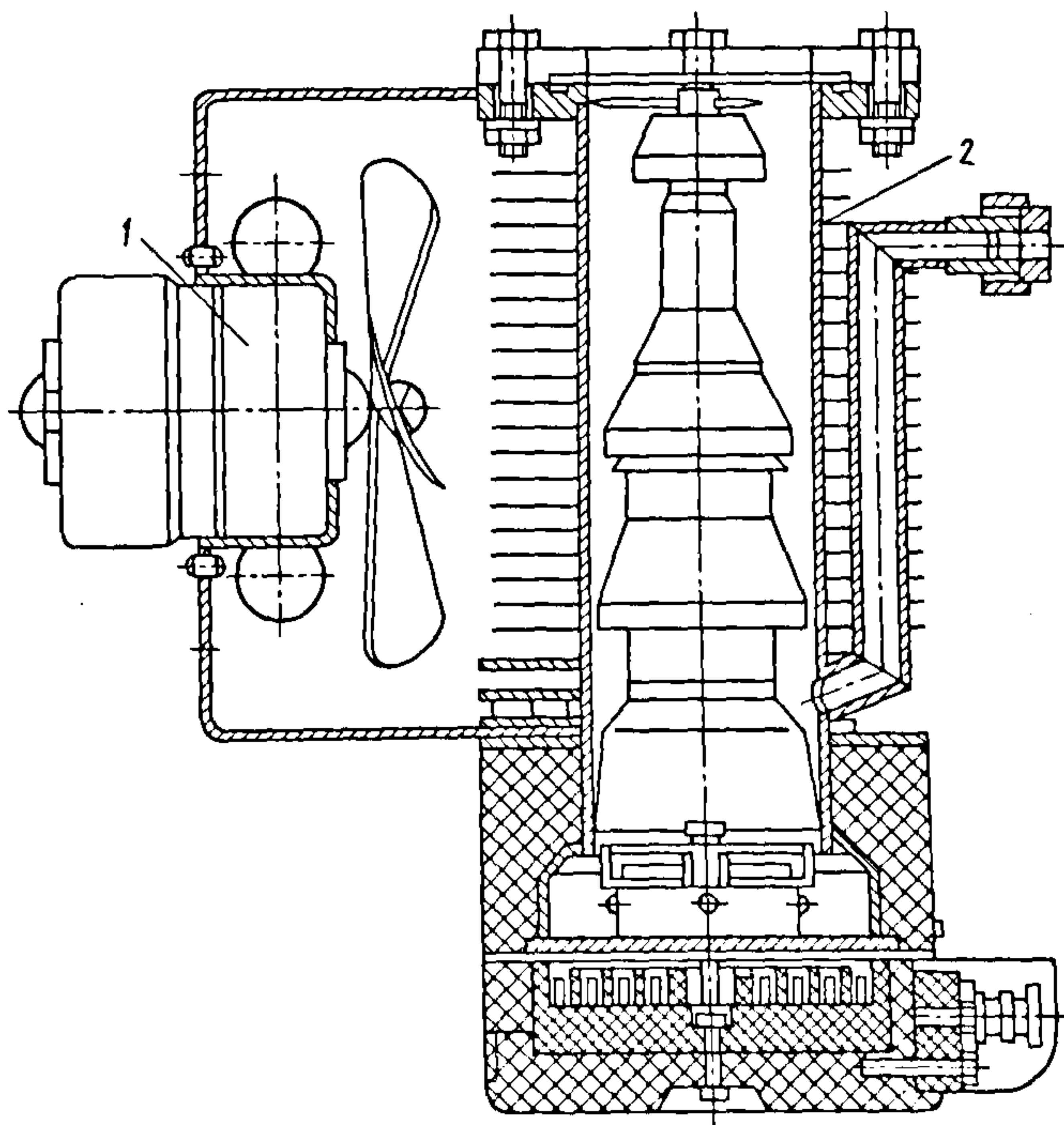


Рис. 10.24. Схема паромасляного диффузионного насоса с воздушным охлаждением

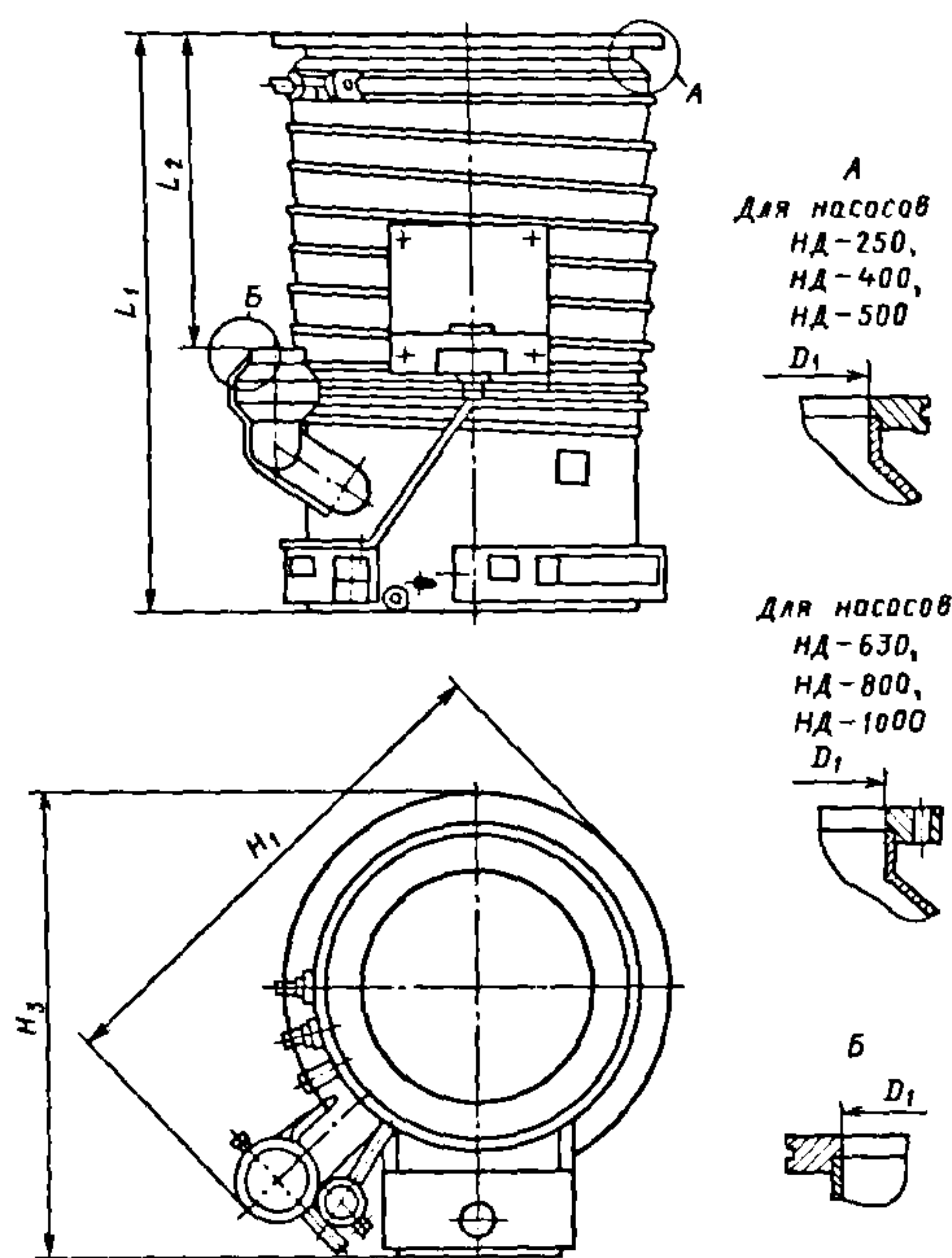


Рис. 10.25. Общий вид паромасляных диффузионных насосов типа НД:  
 $D_y, D_1$  — диаметры условного прохода впускного и выпускного фланцев;  
 $H_1, H_3, L_1$  — габаритные размеры насоса

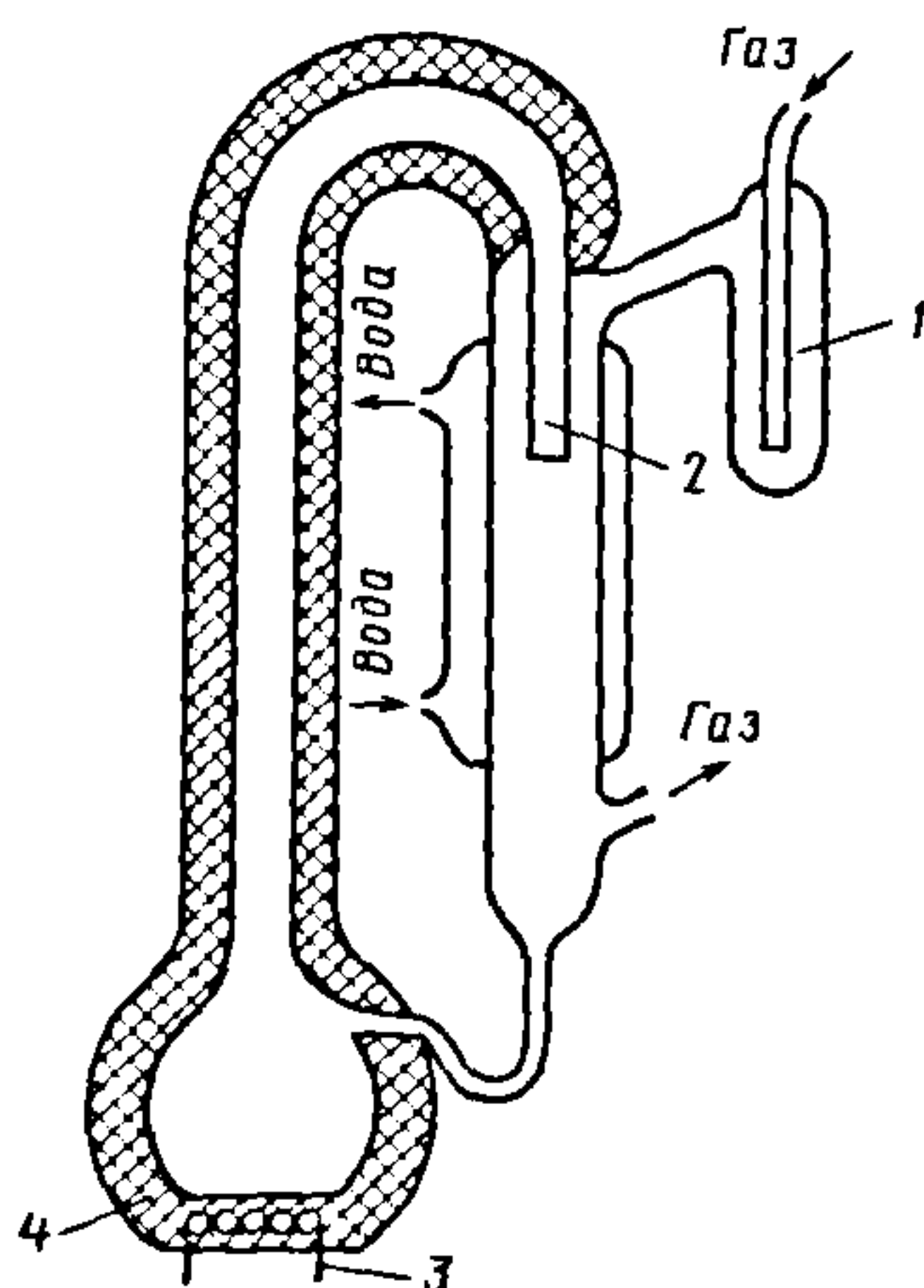


Рис. 10.26 Схема одноступенчатого стеклянного парортутного насоса:  
 1 — ловушка; 2 — сопло; 3 — нагреватель;  
 4 — теплоизоляция

чистота рабочей среды (в масс-спектрометрах, сверхвысоковакуумных системах термоядерных установок и др.).

В лабораторных условиях хорошо зарекомендовали себя простые по устройству парортутные насосы, такие как одноступенчатый стеклянный насос с цилиндрическим соплом 2, нагревателем 3 и теплоизолирующим паропроводом 4 (рис. 10.26), обычно изготавливаемые самими потребителями. При использовании между парортутным насосом и откачиваемым сосудом ловушки 1, охлаждаемой жидким азотом, парортутный насос позволяет получить в хорошо обезгаженной (при  $T = 723 \text{ K}$ ) системе  $p = 10^{-10} \text{ Па}$ .

**Рабочие жидкости.** Ртуть обладает рядом преимуществ, обусловивших ее применение в качестве рабочей жидкости в высоковакуумных насосах: однородностью состава; стабильностью свойств в процессе работы в насосе (ртуть не разлагается при рабочих температурах); стойкостью к окислению воздухом; высоким давлением пара при рабочей температуре в кипятильнике; сравнительно малой растворимостью газов.

Недостатки ртути: высокое давление пара ( $0,1 \text{ Па}$ ) при нормальной температуре (для получения в откачиваемом сосуде давления  $< 0,1 \text{ Па}$  между насосом и сосудом необходимо устанавливать охлаждаемую до низкой температуры ловушку); высокая химическая активность по отношению к металлам (ртуть образует амальгамы с большей частью металлов, что ограничивает выбор конструкционных материалов для насоса); токсичность паров (необходимо создавать специальные помещения для работы со ртутью и соблюдать меры предосторожности, исключающие повышение концентрации паров ртути в рабочих помещениях).

Ртуть, предназначенная для работы в насосах, должна быть хорошо очищена. Для высоковакуумных насосов применяют дистиллированную ртуть Р-1 и Р-2.

Высоковакуумные масла не имеют указанных недостатков. Они химически инертны, неядовиты и отличаются низким давлением пара при нормальной температуре, позволяющим получать предельное остаточное давление  $p_0 = 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ Па}$  и ниже без применения низкотемпературных ловушек.



В высоковакуумных паромасляных насосах используют в основном рабочие жидкости четырех типов: минеральные масла; кремнийорганические соединения; сложные эфиры органических кислот и спиртов; синтетические углеводородные жидкости. Основные характеристики рабочих жидкостей диффузионных насосов приведены в табл. 10.6.

Минеральные масла получают вакуумной дистилляцией продуктов переработки нефти. Это неоднородные по составу

жидкости, которые представляют собой смеси углеводородов с различными молекулярными массами и температурами кипения, отличающиеся низким давлением пара при нормальной температуре. Минеральные масла имеют, как правило, достаточно высокую термостойкость и сравнительно небольшую термоокислительную стойкость (при окислении образуют смолистый осадок на внутренних поверхностях насоса).

#### 10.6. Основные характеристики рабочих жидкостей диффузионных насосов

Рабочая жидкость	$p_n$ , Па	$p_o$ , Па	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$M$ , г/моль	$r$ , кДж/моль	$\lg p_n = A - B/T$	
							A	B
ВМ-1	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	65...69	887	450	115	14,5	6000
ВМ-5 (ОСТ 38 01402-86)	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	64...74	885		119	14,8	6200
Алкарен-24	$5 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-7}$	50...60	915	420	132	17,6	6900
ПЭС-В-1	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	16...33	970	700	103	13,0	5300
ПЭС-В-2	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$				87	11,1	4500
ПФМС-2/5л (ТУ 6-02-777-73)		$2,5 \cdot 10^{-4}$	8...13	1050... 1070	571	108	15,0	5700
133-38 (ПФМС-13) (ТУ 6-02-1-274-74)			18...22	1100	480	100	13,2	5200
133-35 (МФТ-1) (ТУ 6-02-934-74)	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	35...37	1125	544	128	16,4	6700
ФМ-1 (ТУ 6-02-758-73)	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$		1095	547	118	13,0	6200
ФМ-2 (ТУ 6-02-286-76)	$10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-8}$	55...62	1105	689	144	15,8	7550
5Ф4Э (ТУ 6-09-4626-78)	$10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-7}$	116...130	1200	446	130	14,2	6800
М-5Ф4Э (ТУ 6-09-06-307-76)	$10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-8}$	117...120			145	16,0	7600
Н-ПФЭ (ТУ 6-09-06-822-76)			120...137		450		16,32	6900
МВД	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	20	—	3000	131	17,6	6870
ДС 704	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	24	1070	484	—		
ДС 705	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	66	1090	546			
Diffelen ultra	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	110	870	600			
Santovac 5 (фирма Edwards)	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	2400*	1200	446			

\* При 293 К.

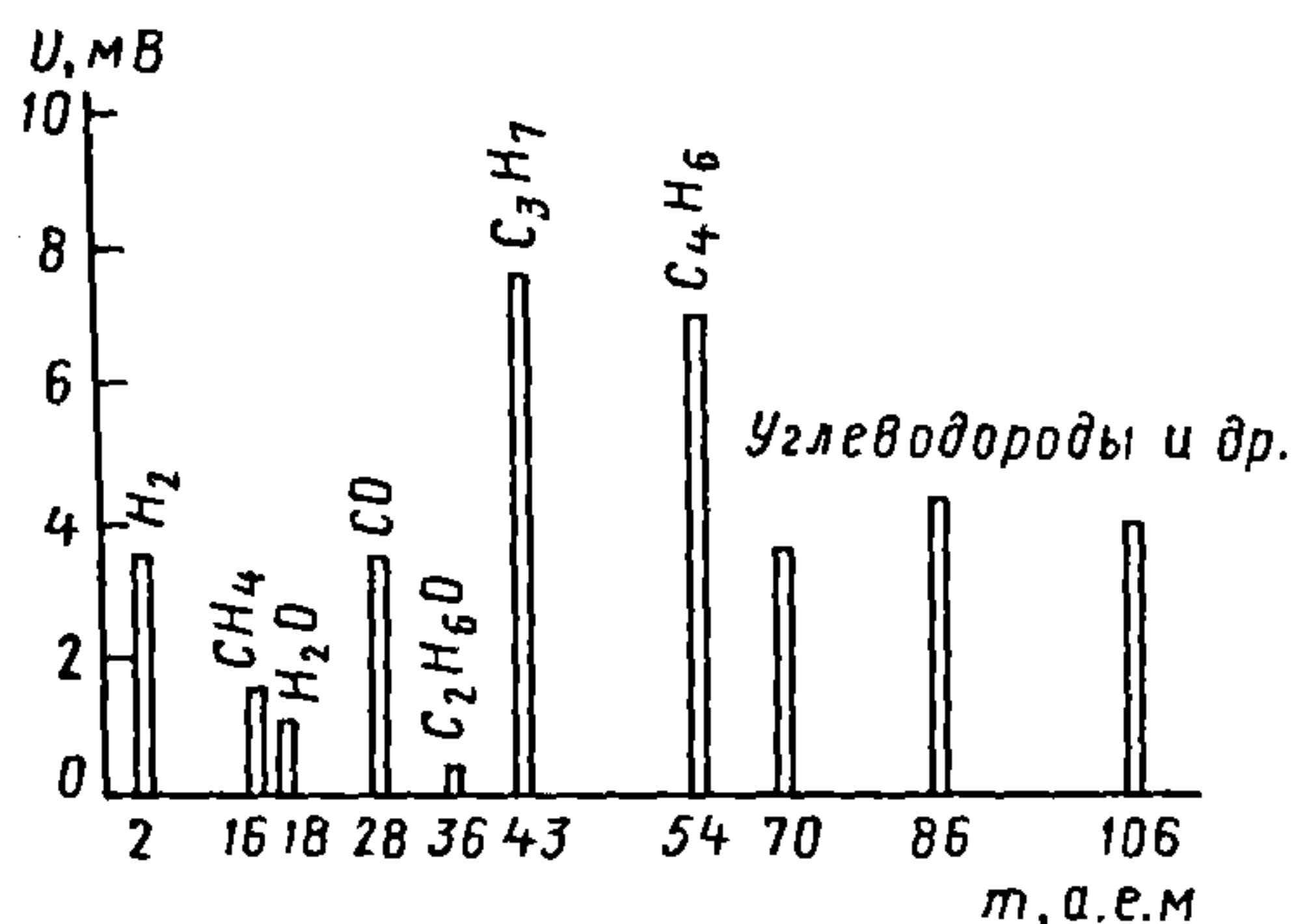


Рис. 10.27. Спектр остаточных газов в диффузионном насосе при работе на масле ВМ-5:  
U — показания выходного прибора

Состав остаточных газов в хорошо «тренированном» насосе во многом определяется продуктами разложения масла в кипятильнике насоса. В спектре остаточных газов (рис. 10.27) в насосе, работающем на минеральном масле, присутствует значительное количество тяжелых углеводородов. Несмотря на малую термоокислительную стойкость и образование летучих углеводородов, минеральные масла наиболее широко распространены благодаря относительно невысокой стоимости (по сравнению с другими рабочими жидкостями).

Отечественная промышленность выпускает высоковакуумные минеральные масла ВМ-1 и ВМ-5, являющиеся продуктами одно- (ВМ-1) и двукратной (ВМ-5) дистилляции медицинского вазелинового масла. Масло ВМ-5 имеет более однородный состав и более высокую термическую стойкость по сравнению с маслом ВМ-1. Характеристики минеральных масел зависят от сорта нефти, используемой в качестве исходного сырья.

Синтетические углеводородные жидкости дороже минеральных, состав и характеристики их точно воспроизводимы; жидкость Алкарен-24 на основе алкилнафталинов по термоокислительной стойкости превосходит минеральные масла.

Кремнийорганические жидкости — полисилоксановые соединения, молекулы

которых состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода с присоединенными углеводородными радикалами по свободным связям кремния. Благодаря сильной связи между кремнием и кислородом кремнийорганические жидкости обладают высокой термической и термоокислительной стойкостью. Попадание в насос атмосферного воздуха не влияет, как правило, на эксплуатационные свойства рабочей жидкости. Кремнийорганические жидкости инертны к воде.

Выпускаются высоковакуумные кремнийорганические жидкости ПЭС-В-1 и ПЭС-В-2 (узкие фракции полиэтилсилоксановой жидкости); ПФМС-2/5л (узкая фракция полифенилметилсилоксановой жидкости); 133-38 (ПФМС-13) — смесь метилфенилсилоксанов, по окислительной стойкости в 1,5 раза превосходящая жидкость ПФМС-2/5л; 133-35 (МФТ-1) — метилфенилциклотетрасилоксан, по термоокислительной стойкости в 2–3 раза превосходящей жидкость 133-38.

Для получения сверхвысокого вакуума в диффузионных насосах применяют кремнийорганические жидкости ФМ-1 (пентафенилтрисилоксан) и ФМ-2 (гексафенилтетрасилоксан), позволяющие создавать предельное остаточное давление диффузионного насоса  $< 10^{-7}$  Па без использования ловушек, охлаждаемых жидким азотом. По термоокислительной стойкости жидкости ФМ-1 и ФМ-2 лишь немного уступают жидкости 133-35.

Эфиры, используемые в качестве рабочих жидкостей в отечественных диффузионных насосах, представляют собой полифениловые соединения 5Ф4Э и М-5Ф4Э, отличающиеся исключительно высокой термической стабильностью. В спектре остаточных газов практически нет тяжелых углеводородов. По термоокислительной стойкости эфиры превосходят минеральные масла, но уступают кремнийорганическим жидкостям ФМ-1 и ФМ-2. Недостатки эфиров — сравнительно высокая температура застывания (277,4 К) и кристаллизации на холодных поверхностях.



Некристаллизующаяся полифениловая жидкость Н-ПФЭ имеет температуру застывания  $< 273$  К.

Для откачки коррозионных газов (кислорода, галоидов, галоидсодержащих соединений и др.) в диффузионных насосах может быть применена высоковакуумная рабочая жидкость МВД на основе перфторполиэфиров. Жидкость пожаро- и взрывобезопасна.

Основные характеристики рабочих жидкостей диффузионных насосов приведены в табл. 10.6, где  $p_n$  и  $p$  — соответственно давление пара и плотность жидкости при  $T = 293$  К;  $p_0$  — предельное остаточное давление диффузионного насоса с соответствующей рабочей жидкостью;  $\nu$  — вязкость жидкости при  $T = 323$  К;  $M$  и  $r$  — средняя молекулярная масса и теплота парообразования жидкости.

**Характеристики диффузионных насосов.** В рабочем диапазоне давлений быстрота действия диффузионного насоса не зависит от впускного давления (рис. 10.28, участок II) и уменьшается в области низких (участок I) и высоких (участок III) давлений. Уменьшение быстроты действия при низком давлении обусловлено тем, что в этой области проявляется обратный поток газа через паровую струю. Кроме того, существенную роль начинают играть газы, выносимые с паровой струей из кипятыльника насоса и выделяемые стенками насоса.

По мере увеличения впускного давления поток откачиваемого газа возрастает по сравнению с обратным потоком газа. Когда эти потоки становятся несоизмеримыми, быстрота действия перестает зависеть от впускного давления (участок II). Увеличение выпускного давления приводит к возникновению скачка уплотнений в струе, перемещению его к соплу и отрыву струи от стенок насоса, сопровождающемуся потоком молекул газа из области форвакуума в область высокого вакуума (участок III).

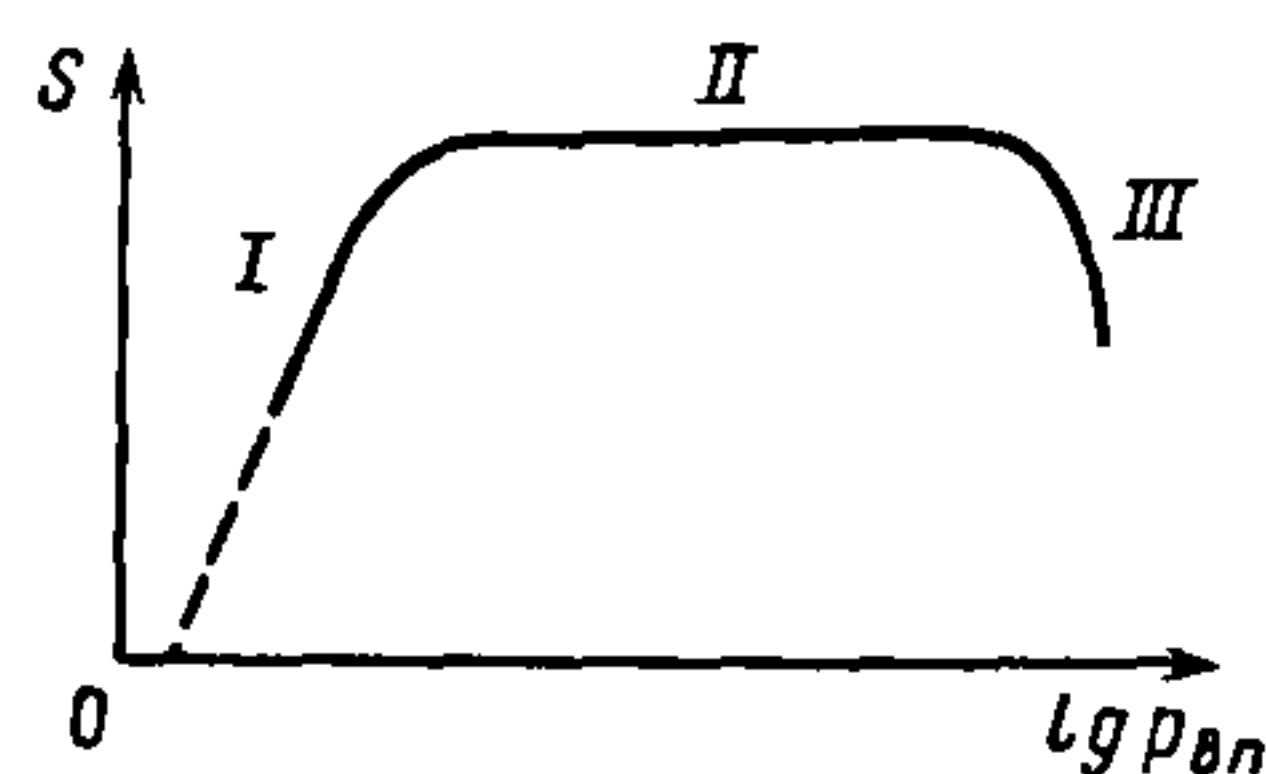


Рис. 10.28. Зависимость быстроты действия диффузионного насоса от впускного давления

Быстрота действия насоса зависит от совокупного изменения плотности и скорости струи. Если, например, повышать скорость парового потока  $v_n$  при неизменной плотности  $\rho_n$ , то быстрота действия увеличится; если увеличивать плотность  $\rho_n$  при неизменной скорости  $v_n$ , то быстрота действия уменьшится. При одновременном увеличении  $\rho_n$  и  $v_n$  максимум быстроты действия соответствует некоторому оптимальному соотношению между  $\rho_n$  и  $v_n$ . Так как эти параметры пропорциональны мощности нагревателя, то кривая зависимости быстроты действия от этой мощности имеет максимум (рис. 10.29).

До некоторой мощности  $N_{\min}$ , затрачиваемой на компенсацию различного рода тепловых потерь, насос не работает ( $S = 0$ ). При  $N > N_{\min}$  часть мощности идет на парообразование, формируется паровая струя и насос начинает работать; при оптимальной мощности  $N_{\text{опт}}$  достигается максимальная быстрота действия. Зависимость быстроты действия от впускного давления при мощности подогрева  $> N_{\text{опт}}$  приведена на рис. 10.30.

Согласно уравнению диффузии быстрота действия диффузионного насоса должна быть обратно пропорциональна квадратному корню из молярной массы газа:

$$S_1 / S_2 = \sqrt{M_2 / M_1}. \quad (10.20)$$

В зависимости от конструкции насоса отношение оптимальных значений быстроты действия для разных газов может в той или иной мере приближаться к определяемому уравнением (10.20), однако практически никогда не достигается.

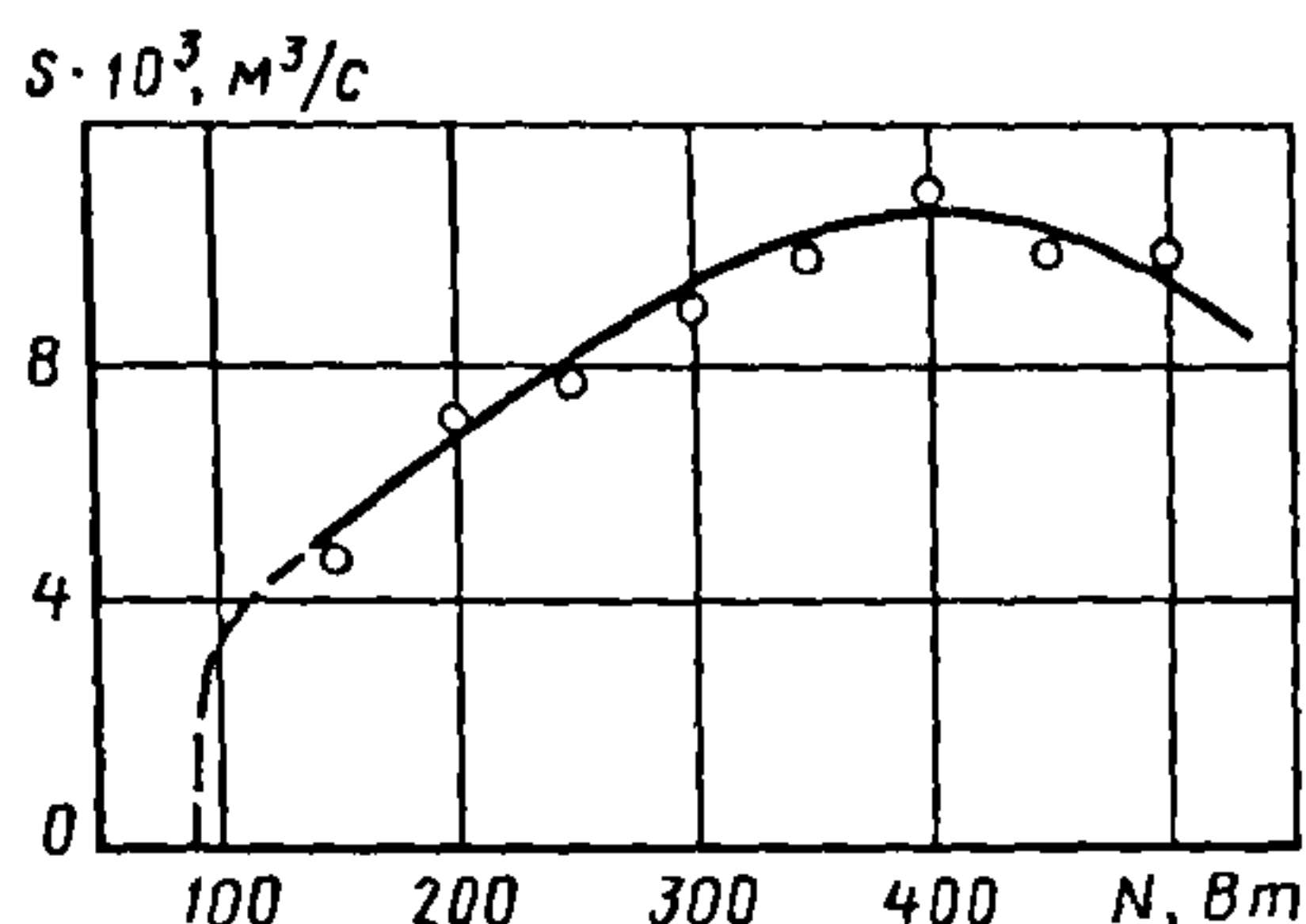


Рис. 10.29. Зависимости быстроты действия диффузионного насоса от мощности нагревателя

Для выбора оптимальной мощности нагревателя насоса при откачке различных газов можно с удовлетворительной для практики точностью пользоваться эмпирическим уравнением

$$N_{\text{опт.г}} / N_{\text{опт.воз}} = 0,78 + 1,17 / \sqrt{M_{\text{г}}}, \quad (10.21)$$

где  $N_{\text{опт.г}}$  и  $N_{\text{опт.воз}}$  — мощности нагревателя, оптимальные для откачки соответственно данного газа и воздуха;  $M_{\text{г}}$  — молярная масса газа.

На практике часто необходимо откачивать из вакуумных систем смеси различных газов. Если состав смеси известен, то быстроту действия и производительность насоса для смеси газов можно рассчитать с удовлетворительной для практики точностью по формулам, полученным из обычных соотношений для газовых смесей:

$$S_{\text{опт.см}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_i p_i M_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (c_i M_i) \sum_{i=1}^{i=n} p_i}; \quad (10.22)$$

$$Q_{\text{опт.см}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_i p_i M_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (c_i M_i)}, \quad (10.23)$$

где  $S_{\text{опт.см}}$  и  $Q_{\text{опт.см}}$  — быстрота действия и производительность насоса для смеси газов при оптимальной мощности нагревателя;  $S_i$  — быстрота действия насоса для  $i$ -го газа, входящего в смесь;  $p_i$  — парци-

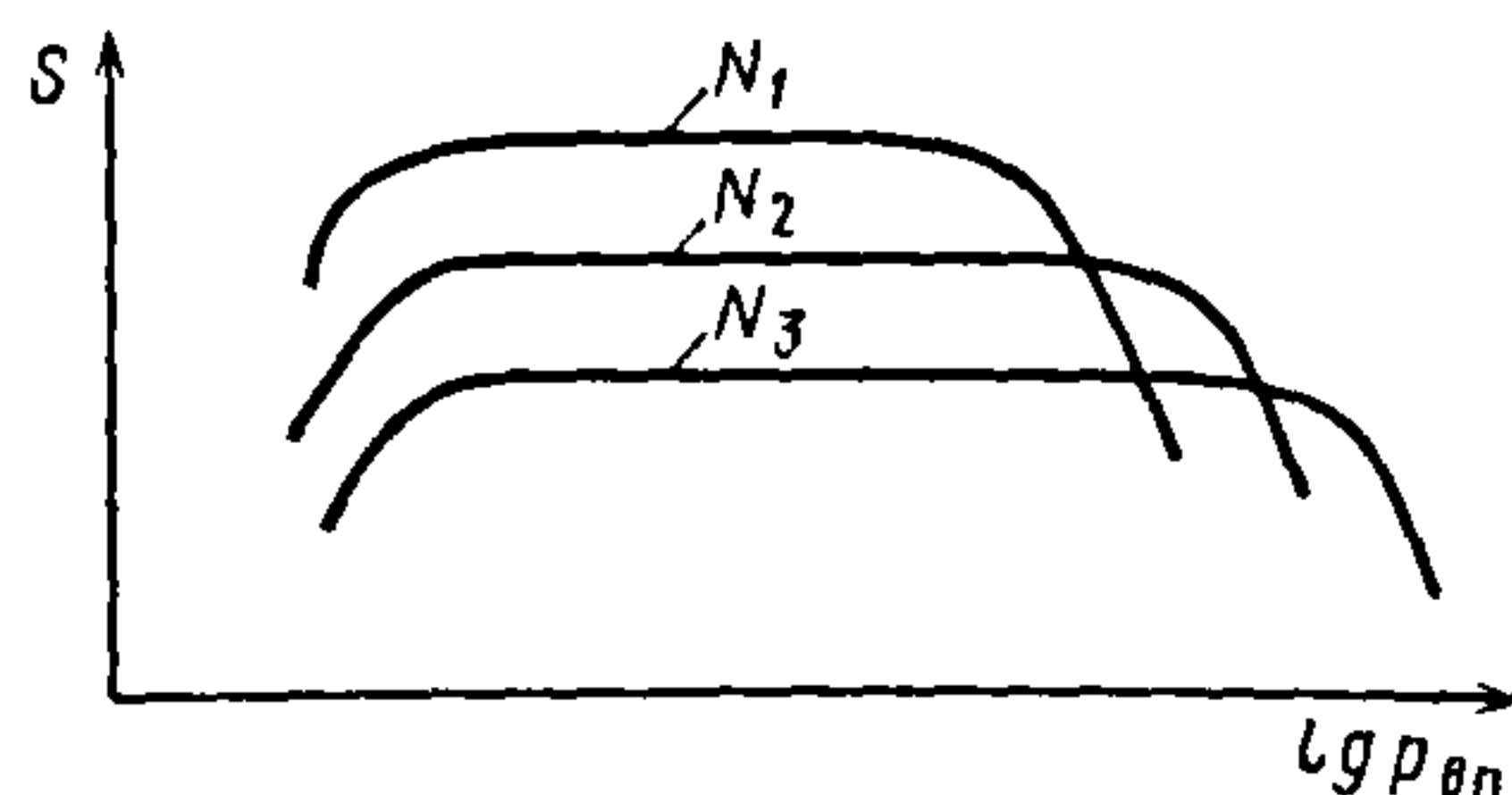


Рис. 10.30. Зависимость быстроты действия диффузионного насоса от впускного давления при мощностях нагревателей  $N_3 > N_2 > N_1$ ,  $N_1 = N_{\text{опт}}$

альное давление газа в смеси;  $M_i$  — молярная масса газа;  $c_i$  — объемная доля газа в смеси.

Если значения быстроты действия насоса для отдельных газов, входящих в смесь, неизвестны, то для ориентировочных расчетов по формулам (10.22) и (10.23) значение  $S_i$  можно определить из уравнения (10.20).

Оптимальную мощность нагревателя насоса при откачке смесей газов выбирают с помощью эмпирической зависимости

$$\frac{N_{\text{опт.см}}}{N_{\text{опт.воз}}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{N_{i \text{ опт.г}}}{N_{i \text{ опт.воз}}} c_i, \quad (10.24)$$

где  $N_{i \text{ опт.г}} / N_{i \text{ опт.воз}}$  — отношение, определяемое по уравнению (10.21).

Быстрота действия насоса прямо пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры откачиваемого газа. Изменения температуры последнего, наблюдаемые на практике, незначительно влияют на быстроту действия насоса. Так, чтобы быстрота действия увеличилась на 10 %, температуру откачиваемого газа следует повысить с 293 до 353 К.

Быстрота действия зависит от рода рабочей жидкости, к выбору которой подходят обычно с практической позиции. Если, например, в откачиваемой системе недопустимо присутствие углеводородов, применение органических соединений в качестве рабочей жидкости исключается; в таких случаях обычно используют ртуть или неорганические рабочие жидкости.



Для получения низкого предельного остаточного давления без применения низкотемпературных ловушек как рабочая жидкость рекомендуется вакуумное масло с низким давлением пара.

Ввиду сложности одновременно протекающих процессов проектирование ведется на основе моделирования процесса взаимодействия молекул газа и пара в полости насоса. Конструирование и отработку насоса выполняют обычно для определенной рабочей жидкости, поэтому характеристики насоса оптимальны для этой жидкости. Для работы на другой рабочей жидкости необходимо подбирать (изменением мощности) новый оптимальный режим работы насоса.

**Предельное остаточное давление насоса** определяется: обратной диффузией газа со стороны форвакуума; давлением пара жидкости при температуре стенок насоса; выносом газов, частично растворенных в конденсате, и продуктов термического крекинга масла со струей пара из кипятильника; газовыделениями стенок насоса.

Давление пара рабочей жидкости насоса (за исключением ртути) обычно на несколько порядков меньше реального предельного остаточного давления и поэтому не влияет на него. Однако при повышении температуры стенки насоса это влияние может оказаться существенным. Так, при повышении температуры воды, охлаждающей насос, от 293 до 323 К предельное остаточное давление при работе на масле ВМ-1 возрастает в несколько раз, а в насосе с воздушным охлаждением при таком же повышении температуры охлаждающего воздуха – на два порядка.

Обезгаживание стенок насоса прогревом до  $T = 370$  К позволяет понизить предельное остаточное давление насоса более чем на порядок.

**Наибольшее выпускное давление насоса** определяется работой последней выпускной ступени и зависит главным образом от плотности струи, расхода пара через сопло и конструкции ступени, на-

пример выполненной в виде эжекторного узла с конической сужающейся камерой смешения.

Обычно насосы характеризуют наибольшим выпускным давлением при предельном остаточном давлении или при наибольшем впускном давлении в рабочем диапазоне (диапазон давлений, в котором быстрота действия постоянна).

Для сравнительной оценки степени совершенства диффузионных пароструйных насосов применяют удельные характеристики, важнейшие из которых – удельная быстрота действия, вакуум-фактор и термодинамический КПД.

Удельная быстрота действия – это быстрота действия  $S_n$  насоса, отнесенная к единице площади  $F$  сечения впускного отверстия:

$$S_{уд} = S_n / F. \quad (10.25)$$

Для современных диффузионных насосов  $S_{уд} = 5,0 \dots 6,5$  дм<sup>3</sup>/(с·см<sup>2</sup>).

Вакуум-фактор – отношение фактической быстроты действия  $S_\phi$  насоса к теоретической максимально возможной скорости действия  $S_t$  (объему газа, который теоретически может пройти через 1 см<sup>2</sup> площади диффузионной диафрагмы в единицу времени):

$$\lambda = S_\phi / S_t. \quad (10.26)$$

При откачке воздуха при  $T = 293$  К в молекулярном режиме течения газа  $S_t = 11,6$  дм<sup>3</sup>/(с·см<sup>2</sup>). Для большинства современных насосов вакуум-фактор  $\lambda \approx 0,3 \dots 0,5$ .

Иногда на практике при оценке вакуумного насоса в качестве технико-экономического показателя применяют так называемую удельную мощность, т.е. расход мощности на единицу быстроты действия, Вт·с/дм<sup>3</sup>:

$$q = N / S. \quad (10.27)$$

Комплексным показателем является *термодинамический КПД*, который с учетом выражений (10.25) – (10.27) можно записать в виде

$$\eta = \frac{\lambda}{q'} \rho R T \ln \xi, \quad (10.28)$$

где  $\rho$  – плотность газа при давлении  $p_{\text{вп}}$ ;  $q' = N/S_r$ .

Термодинамический КПД в соответствии с выражением (10.5) для различных пароструйных диффузионных насосов составляет  $10^{-4} \dots 10^{-3}$ , т.е. только сотые или десятые доли процента мощности нагревателя затрачиваются на сжатие газа.

**Обратный поток** паров масла из насоса в откачиваемую систему для большей части насосов составляет 0,11... 0,001 % от потока пара, истекающего из верхнего сопла насоса; в среднем по сечению входного отверстия обратный поток равен  $(1 \dots 5) \cdot 10^{-2}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>).

Многие современные технологические процессы протекают при впускном давлении до 1 Па при необходимом в начале процесса предельном остаточном давлении  $1 \cdot 10^{-4} \dots 6,5 \cdot 10^{-5}$  Па. Выпускаемые диффузионные насосы сохраняют

быстроту действия постоянной до давления  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Это условие ограничивает их использование в ряде технологических процессов.

С целью расширения областей возможного применения диффузионных насосов ОАО «Вакууммаш» разрабатывает типоразмерный ряд диффузионных насосов с расширенным диапазоном впускных давлений; насос НД-630Э обладает рядом преимуществ:

- сохраняет стабильное значение быстроты действия  $\geq 10$  м<sup>3</sup>/с в диапазоне впускных давлений  $6,5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-1}$  Па;
- обеспечивает откачку потоков газа от 1,3 до 2,0 м<sup>3</sup>·Па/с в диапазоне впускных давлений  $1 \cdot 10^{-1} \dots 1$  Па соответственно;
- может длительное время работать, сохраняя свои характеристики, при впускном давлении  $6,5 \cdot 10^{-4} \dots 1$  Па.

Основные характеристики паромасляных серийно выпускаемых диффузионных насосов приведены в табл. 10.7 и 10.8.

**10.7. Технические параметры паромасляных диффузионных насосов серии НД**

Параметр	Значение параметра для насоса						
	НД-250	НД-400	НД-500	НД-630	НД-630Э	НД-800	НД-1000
Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с, при $p_{\text{вп}}$ , Па:							
5,0·10 <sup>-2</sup>	2700	7200	10 800	18 000	10 000	27 000	45 000
1,0·10 <sup>-1</sup>	1500	4000	6000	10 000	11 400	15 000	23 000
5,0·10 <sup>-1</sup>					3650		
1,0	225	600	900	1500	1900	2250	3500
Предельное остаточное давление $p_o$ , Па	1,3·10 <sup>-5</sup>						
Наибольшее выпускное давление, Па	60				0,45	60	
Расход охлаждающей воды (при $T = 283 \dots 293$ К и $p = 0,15$ МПа) $G_{\text{охл}}$ , дм <sup>3</sup> /ч	180	330	550	680	650	1020	1650
Мощность нагревателя $N$ , кВт	2,4	4,8	7,2	12,0	10,8	18,0	24,0
Диаметр впускного фланца $D_v$ , мм	250	400	500	630	630*	800	1000



Окончание табл. 10.7

Параметр	Значение параметра для насоса						
	НД-250	НД-400	НД-500	НД-630	НД-630Э	НД-800	НД-1000
Диаметр выпускного фланца $D'_1$ , ( $D'_2$ ), мм (по рис. 10.25) (по рис. 10.25)	70, (95)		102, (130)		160*	153, (180)	
Габаритные размеры $H_1 \times H_3 \times L_1$ , мм (по рис. 10.25)	470×387× ×560	677×590× ×785	818×695× ×940	1041× 830× ×1130	1145×750× ×1215	1225× ×950× ×1450	1530× ×1154× ×1880
Масса без заглушек и деталей их крепления, кг	28,0	58,0	92,0	125,0	145	300,0	460,0

\* Присоединение впускного фланца DN 630 ISO-F, выпускного DN 160 ISO-K; для указанных насосов напряжение 220 В; обратный поток рабочей жидкости при  $p_{\text{вп}} = 5,0 \cdot 10^{-2}$  Па  $< 8 \cdot 10^{-4}$  мг/(мин·см<sup>2</sup>).

## 10.8. Технические параметры паромасляных диффузионных насосов серии НВДМ

Параметр	Значение параметра для насоса					
	НВДС-100	НВДМ-100	НВДМ-160	НВДМ-250	НВДМ-400	НВДМ-630
Быстрота действия, дм <sup>3</sup> /с, при $p_{\text{вп}}$ , Па: 1,0·10 <sup>-3</sup> ...1,0·10 <sup>-1</sup> 6,6·10 <sup>-4</sup> ...1,3·10 <sup>-1</sup> 6,6·10 <sup>-4</sup> ...6,6·10 <sup>-2</sup>	240 —	340	700	— 2350	5900	— 16 250
Предельное остаточное давление $p_0$ , Па	1,3·10 <sup>-5</sup>	6,6·10 <sup>-5</sup>				
Наибольшее выпуск- ное давление, Па	40	35	33,3			
Обратный поток паров рабочей жидкости, мг/(мин·см <sup>2</sup> )	1,7·10 <sup>-4</sup>	8,0·10 <sup>-4</sup>				
Расход охлаждающей воды (при $T = 283...$ 293 К и $p = 0,15$ МПа), дм <sup>3</sup> /ч	42	35	60	150	280	600
Мощность нагревате- ля, кВт	0,6	0,5	0,8	2,0	4,0	9,0
Напряжение, В	220					380/220
Объем масла, дм <sup>3</sup>	0,05	0,05	0,3	0,6	1,4	3,5
Диаметр фланца $D_y$ , мм: впускного выпускного	100 25	100 25	160 40	250 63	400 63	630 100
Требуемая быстрота действия форвакуум- ного насоса, дм <sup>3</sup> /с	1,2	1,5	3,0	10	16	50
Габаритные размеры (длина×ширина× высота), мм	275×180× ×359	275×170× ×360	425×2060× ×380	705×350× ×600	860×530× ×800	1345×1010× ×1300
Масса, кг	8,0	6,0	16,0	31	80,0	280,0

### 10.6. ВАКУУМНЫЕ ПАРОСТРУЙНЫЕ АГРЕГАТЫ

В условиях промышленной эксплуатации вакуумные пароструйные насосы обычно присоединяют к откачиваемым системам трубопроводами через вакуумные затворы, отражатели, ловушки. Пароструйный насос, соединенный с необхо-

димой арматурой и установленный на раме, называют *вакуумным агрегатом*. Агрегат АВДМ-1000ДН состоит из диффузионного насоса, азотной ловушки, плоского шиберного вакуумного затвора, смонтированных на раме-тележке.

Характеристики агрегатов отечественного производства приведены в табл. 10.9.

### 10.9. Технические параметры паромасляных агрегатов серии АВДМ

Параметр	Значение параметра для насоса					
	АВДМ-100	АВДМ-160	АВДМ-250	АВДМ-400	АВДМ-630	АВДМ-1000ДН
Быстрота действия, $\text{дм}^3/\text{с}$ при $p_{\text{вп}}$ , Па: $1,0 \cdot 10^{-3} \dots 1,0 \cdot 10^{-1}$ $6,5 \cdot 10^{-4} \dots 1,3 \cdot 10^{-1}$ 1,0	130	310	870	2280	5700	15000 — 3500
Предельное остаточное давление $p_o$ , Па	$6,5 \cdot 10^{-6}$			$3,0 \cdot 10^{-5}$		
Наибольшее выпускное давление, Па	35		33,3		60,0	
Расход жидкого азота в установившемся режиме при $p = 6,5 \cdot 10^{-4}$ Па ( $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па), $\text{дм}^3/\text{ч}$	0,8		1,0	2,0	3,0	(26,0)
Расход охлаждающей воды (при $T = 283 \dots 293$ К и $p = 0,15$ МПа), $\text{дм}^3/\text{ч}$	35	60	150	280	600	1650
Мощность нагревателя, кВт	0,56	0,90	2,10	4,20	9,50	24,0
Напряжение, В	220		380/220			
$D_y$ , мм, фланца:						
впускного	100	160	250	400	630	1000
выпускного	25	40	63	63	100	153
Габаритные размеры (длина $\times$ ширина $\times$ высота), мм	670 $\times$ 630 $\times$ 450	750 $\times$ 720 $\times$ 540	1150 $\times$ 780 $\times$ 780	1440 $\times$ 1350 $\times$ 930	2100 $\times$ 1900 $\times$ 1400	2158 $\times$ 1520 $\times$ 3494
Масса, кг, не более	40	65	140	294	870	2800



## Глава 11

### ВАКУУМНЫЕ ЛОВУШКИ

---

#### 11.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Обеспечение технологических процессов в таких областях науки и техники, как микро- и нанoeлектроника, нанотехнология, получение чистых материалов, химические технологии обычно сопряжено с созданием высокого безмасляного вакуума. При осуществлении подобных технологических процессов внутри вакуумной камеры происходят сложные химические реакции, продукты которых должны откачиваться вакуумной системой. В состав смесей могут входить такие компоненты, как пары воды, гелий, а также активные компоненты: кислоты, свободные радикалы ( $F^+$ ,  $Cl^+$ ), которые негативно воздействуют на конструктивные элементы насоса, соприкасающиеся с ними.

Вакуумные насосы также могут стать сильными источниками загрязнения вакуумной камеры примесями различных газов. Например, диффузионные, турбомолекулярные и многие механические насосы являются источниками паров масла, которое попадает в откачиваемую камеру.

В связи с этим встает проблема по удалению этих компонентов из газовой смеси. Данная проблема может быть решена либо путем замены насоса, что мо-

жет привести к существенному увеличению стоимости вакуумной установки или ухудшению технических и технологических показателей системы в целом, либо удалением или существенным уменьшением концентрации этих компонентов перед входом в насос.

Одним из наиболее простых способов селективной откачки газовых смесей является установка между насосом и технологической камерой таких устройств, как *вакуумная ловушка*. В результате труднооткачиваемые или активные компоненты смеси улавливаются ловушкой, а оставшиеся откачиваются насосом. Как правило, вакуумная ловушка представляет собой достаточно простое устройство, и ее стоимость на порядок ниже стоимости насоса.

В свою очередь, применение ловушек сопровождается рядом таких отрицательных моментов, как:

- уменьшение скорости откачки вакуумной камеры;
- насыщение рабочих поверхностей ловушек улавливаемыми компонентами, что приводит к прекращению выполнения защитных функций.

Поэтому важно знать еще на стадии проектирования, как будет влиять ловуш-

ка на технические характеристики вакуумной системы. Также необходимо отметить, что для получения более полной информации о рабочих характеристиках ловушки ее нужно рассматривать не в качестве отдельного элемента, а как составляющую всей вакуумной системы.

Устройства селективной откачки газовых смесей широко применяются во многих областях современной науки и техники, где используется вакуумное оборудование. Основное назначение устройств селективной откачки (ловушек) – это защита различных технологических и испытательных камер от паров веществ, мешающих проведению технологических процессов. Поэтому от такого относительно простого устройства, как ловушка, могут зависеть технологические процессы, в результате которых получают изделия, чья стоимость превышает во много раз стоимость самой ловушки. Некоторые типы ловушек также служат своего рода насосами и помогают удалять из вакуумной системы некоторые компоненты смесей, например пары воды.

В настоящее время наибольшим спросом пользуются ловушки конденсационного типа, которые охлаждаются в основном водой, жидким азотом или холодильными машинами. Существуют различные подходы к анализу устройств вакуумной техники, в том числе и конденсационных ловушек. Однако расчет таких характеристик ловушек, как проводимость и защитная способность, проводится, как правило, отдельно, без учета влияния насоса и испытательной камеры, между которыми располагается ловушка. Хотя известно, что неучет влияния испытательной камеры в ряде случаев может приводить к изменению результатов до 20 %.

Совершенствование конденсационных высоковакуумных ловушек осуществляется по двум основным направлениям: 1) изменению температуры рабочих поверхностей ловушек и 2) изменению геометрии рабочих поверхностей. Второй

путь является наиболее простым и дешевым способом повышения эффективности. С учетом развития современных вычислительных средств комплексный анализ основных характеристик высоковакуумных ловушек можно проводить с помощью метода статистических испытаний пробной частицы и его приложений.

Также при анализе характеристик высоковакуумных криоловушек надо учитывать то, что на рабочих поверхностях постоянно образуется слой криоосадка (криослоя). Рост криослоя приводит к уменьшению проводимости ловушки и уменьшению коэффициента прилипания, что, в свою очередь, ведет к тому, что ловушка прекращает выполнять свои защитные и селективные функции. Поэтому для получения исчерпывающих данных об эффективности работы криоловушки необходимо знать форму и структуру образующегося на ее поверхностях криослоя.

Эта проблема также актуальна при эксплуатации крионасосов, где от толщины криослоя зависит эффективность откачки; напылении различных функциональных и декоративных покрытий, качество которых также зависит от толщины и формы нанесенного слоя; молекулярной эпитаксии.

Наличие перечисленных проблем, требующих решения, обуславливает актуальность комплексного анализа устройств селективной откачки и процессов, связанных с их эксплуатацией.

Для предотвращения попадания паров веществ, конденсированных в обычных условиях (масел, паров ртути, паров воды, паров металлов и др.), из одной части вакуумной системы в другую применяют устройства, которые в вакуумной технике принято называть *ловушками*. Ловушки могут предназначаться как для защиты насосов от летучих продуктов, выделяющихся в ходе технологического процесса, так и для защиты откачиваемого объема от рабочего вещества насоса, а также для возвращения рабочего вещества обратно в насос.



Улавливание мешающего вещества может быть осуществлено путем конденсации, сорбции или химического связывания. Поэтому рабочие поверхности ловушки должны либо охлаждаться, либо покрываться слоем сорбента или химически активного вещества.

По типу конструкции ловушки классифицируются на *оптически прозрачные* и *оптически непрозрачные*. Ловушка является оптически непрозрачной, если она обеспечивает по крайней мере однократное столкновение молекулы с поглощающей поверхностью. Если ловушка не обеспечивает, как минимум, однократного столкновения молекулы с поглощающей поверхностью, то она оптически прозрачна.

Качество ловушки характеризуется ее проводимостью и защитной способностью, а также конструктивными (компактностью, сложностью изготовления) и экономическими (стоимостью, энергопотреблением, затратами на обслуживание) показателями.

В данной книге под *защитной способностью* понимается отношение количества вещества, прошедшего через ловушку, к количеству вещества, поступающего на нее со стороны насоса (отка-

чиваемого объема). Также в различных источниках используют понятие «*коэффициент захвата ловушки*» — отношение количества вещества, захваченного ловушкой, к количеству вещества, поступающего на нее со стороны насоса (откачиваемого объема).

К каждой ловушке предъявляется требование максимальной проводимости при максимальной защитной способности. Однако удовлетворить этим требованиям одновременно невозможно, и обычно останавливаются на компромиссе. В табл. 11.1 приведены конструкции наиболее часто встречающихся ловушек [1].

Обычно высокопроводящие и достаточно надежные ловушки уменьшают эффективную быстроту откачки объема не более чем на 50 %. Проводимость ловушки определяется только ее конструкцией. Теоретический расчет проводимости ловушки достаточно точно осуществляется с использованием метода пробной частицы Монте-Карло [2].

Паромасляный насос является источником паров масла. Масло в откачиваемый объем поступает как вследствие естественного испарения конденсата масла со стенок в вакуум, так и в результате механического

11.1. Наиболее часто встречающиеся конструкции ловушек

№ п/п	Ловушка	Принципиальная схема	№ п/п	Ловушка	Принципиальная схема
1	Шевронная		5	Коническая шевронная	
2	Шевронная кольцевая		6	Диафрагменная	
3	Жалюзийная двухрядная		7	Угловая	
4	Коническая кольцевая				

«распушения» струи. Как правило, для диффузионных насосов применяют оптически плотные ловушки, однако и через такую ловушку возможно проникновение следов насосной жидкости в откачиваемый объем следующими путями:

- испарением с поверхности ловушки;
- отражением от поверхности ловушки вследствие того, что коэффициент прилипания на улавливающих поверхностях не равен 1;
- взаимным столкновением молекул между собой;
- диффузией молекул масла в вязкостном режиме течения газа;
- поверхностной миграцией.

Скорость испарения определяется температурой ловушки и упругостью насыщенных паров рабочей жидкости. Если рабочее вещество представляет собой индивидуальное вещество или смесь близки кипящих фракций, то, зная кривую упругости пара и температуру ловушки, можно оценить долю обратного потока, определяемую испарением с поверхности ловушки. В работе [3] приводится вывод приближенной формулы для расчета пролета молекул масла через оптически плотную угловую ловушку. При коэффициенте прилипания  $\alpha \neq 1$  доля прошедшего через ловушку потока равна  $1,09(1 - \alpha)$ .

Число молекул масла  $N$ , проникших через ловушку за 1 с вследствие взаимных столкновений, выражается следующей формулой:

$$N = 2 \cdot 10^4 \frac{pa^3}{\sqrt{M}},$$

где  $p$  – давление насыщенных паров масла, мм рт. ст.;  $a$  – радиус ловушки, см;  $M$  – молекулярная масса масла, г/моль.

Вероятность вылета масла  $p$  вследствие столкновения молекул масла с молекулами газа определяется формулой

$$p = 4,5 \cdot 10^{-5} \left( 1 - e^{-\frac{l}{L}} \right),$$

где  $l$  – средний путь молекулы в ловушке (в данном случае  $l = 2,1 a$ ), см;  $L$  – средний свободный пробег молекулы масла, см.

Перенос масла  $W$ , г/с, вследствие диффузии подсчитывается по формуле

$$W = 2,51 \cdot 10^{-8} \frac{a^2 M p_0 v}{T_0} \times \left[ \left( 1 + \frac{23,2 D^2}{a^2 v^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] e^{-\frac{1}{2} \frac{av}{D}} \times \left[ 1 + \left( 1 + \frac{23,2 D^2}{a^2 v^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] y, \quad (11.1)$$

где  $p_0$  – парциальное давление паров масла над водяной ловушкой;  $T_0$  – температура водяной ловушки, К;  $v$  – массовая скорость газа, см/с;  $y$  – средняя длина ловушки, см;  $D$  – коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с.

Отмечаются три характерные области работы ловушки с позиции вылета масла:

- область низких давлений ( $p < 10^{-4}$  Па), где обратный поток определяется величиной коэффициента прилипания;
- область высоких давлений при условии течения газа, в которой сметающее действие газа практически полностью исключает обратный поток,
- переходная область ( $10^{-1} \dots 10^{-4}$  Па), когда доминируют столкновения с молекулами газа. Наибольший обратный поток наблюдается в этой области.

## 11.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛОВУШЕК

В зависимости от способа охлаждения, природы адсорбента или химического поглотителя можно провести следующую классификацию ловушек. На рис. 11.1 приведена одна из возможных классификаций высоковакуумных ловушек. Опираясь на эту схему, рассмотрим ловушки более подробно.



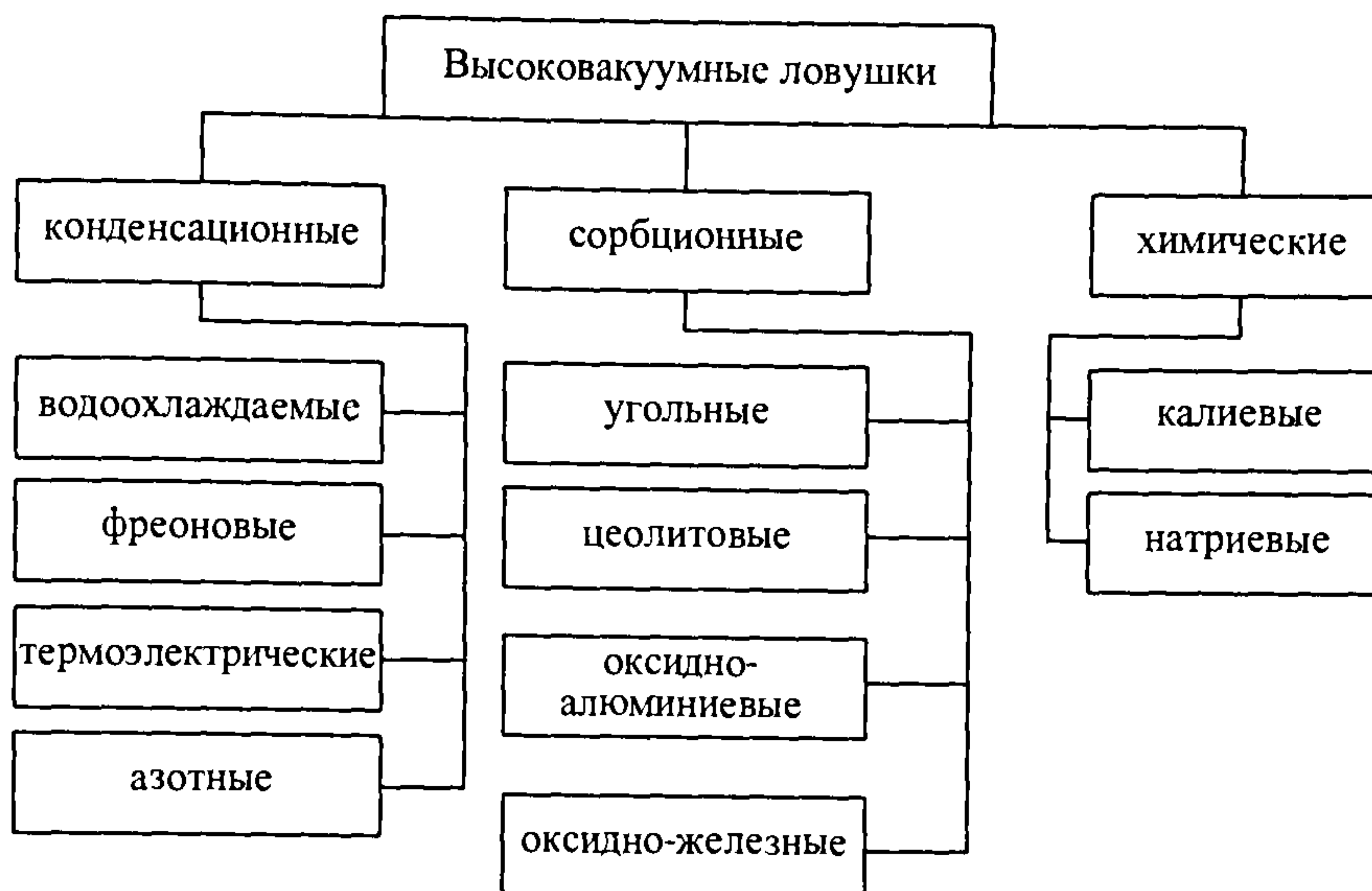


Рис. 11.1. Схема классификации высоковакуумных ловушек

### 11.2.1. Водоохлаждаемые ловушки

В зарубежной литературе охлаждаемые водой ловушки, как правило, называют словом «baffles», к которому ближе всего по смыслу русское слово «отражатель». Водоохлаждаемые ловушки служат для возвращения обратного потока масла в насос при его длительной непрерывной работе с вымораживаемыми ловушками, а также для проведения технологического процесса при скорости проникновения масла в откачиваемый объем, равной  $5 \cdot 10^{-3}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>).

Общепринятое обозначение величины обратного потока масла. В системе СИ  $1 \text{ мг/(ч·см}^2\text{)} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ мг/(ч·см}^2\text{)}$ . Водяные ловушки необязательно должны быть оптически плотными по отношению к любому направлению. Достаточно, чтобы они экранировали только самый главный источник обратного потока, например для диффузионного насоса это область шириной 3...5 мм вблизи кромки верхнего сопла или маслоотражателя.

Вылет масла через водяную ловушку определяется скоростью испарения масла при температуре ловушки и равен для масла ВМ-1 при 20 °С  $5 \cdot 10^{-3}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>).

Вылет масла через водяную ловушку вследствие взаимных столкновений молекул незначителен по сравнению с этой величиной. Водоохлаждаемые ловушки широко применяются в напылительных установках и электроламповом производстве. Охлаждаются ловушки не только трубопроводами с водой, но и благодаря теплопроводности от стенок, а также принудительно воздухом. Как правило, если диффузионный насос используется с водоохлаждаемой ловушкой, то ставить на нем маслоотражатель нецелесообразно. Удаление маслоотражателя позволит увеличить быстроту откачки объема на 10 %.

В настоящее время производятся водоохлаждаемые ловушки, дающие возможность понижать обратный поток паров масла из диффузионного насоса до  $1 \cdot 10^{-6}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>). В частности, такие ловушки (рис. 11.2) выпускает в России ОАО «Вакууммаш» (табл. 11.2 и 11.3).

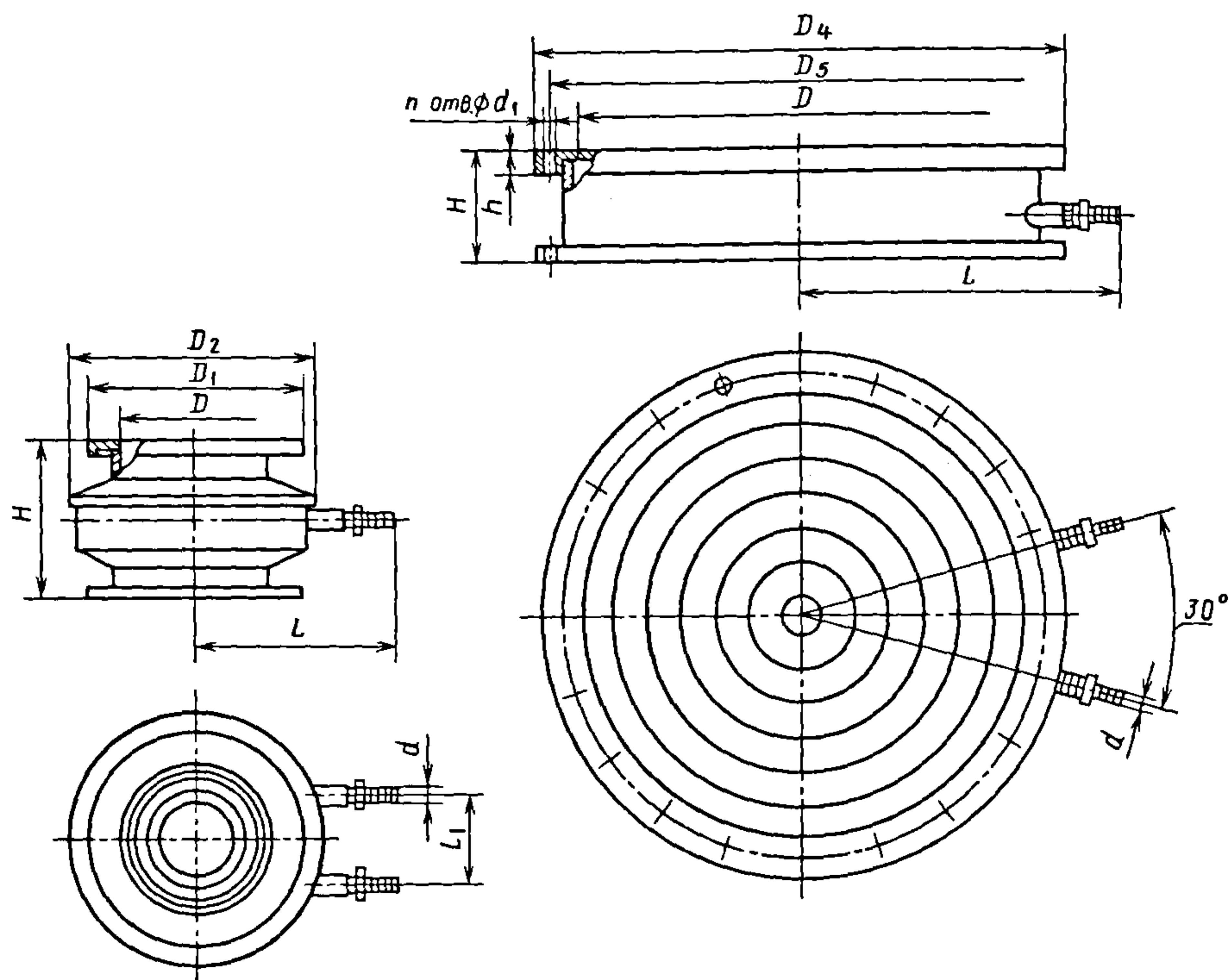


Рис. 11.2. Ловушки проточные водяные типа ЛП

## 11.2. Габаритные и присоединительные размеры ловушек типа ЛП, мм

Тип ЛОВУШКИ	$D_y$	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$L$	$L_1$	$H$	$h$	$d$	$d_1$	$n$
ЛП-250	250	261	290	416	—	302	120	195	—	12	—	—
ЛП-400	400	400	450	512		362		193				
ЛП-500	500	501	550	612		412						
ЛП-630	630	651	750	—	720	440	—	140	24	13	14	20
ЛП-800	800	800	920		890	525						24
ЛП-1000	1000	1000	1120		1090	625						32

## 11.3. Технические характеристики ловушек типа ЛП

Наименование параметра	ЛП-250	ЛП-400	ЛП-500	ЛП-630	ЛП-800	ЛП-1000
Проводимость при давлении $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ( $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.), л/с, не менее	1130	3200	5800	10 100	12 160	22 900
Рекомендуемый расход воды (при температуре воды 4...25 °C), л/с	100	180	270	390	590	900
Пролет паров масла при давлении $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ( $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.), мг/мин	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$
Масса, кг, не более	15	35	37	53	84	150



### 11.2.2. Умеренно охлаждаемые ловушки

Достаточно высокой защитной способностью обладают ловушки, охлаждаемые до температуры  $-20 \dots -70^\circ\text{C}$ . Такую температуру можно получить как с помощью холодильных машин, так и с использованием термоэлектрических охлаждающих аппаратов. Например, при температуре  $-30^\circ\text{C}$  давление насыщенных паров масла ВМ-1 составляет  $1,33 \cdot 10^{-10}$  Па и скорость испарения его в вакуум равна  $2 \cdot 10^{-7}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>). Для большинства практических приложений откачных систем на основе паромасляных диффузионных насосов такой вылет масла может считаться допустимым. В прогреваемой системе такая ловушка позволила бы достичь предельного вакуума на масле ВМ-1  $1,33 \cdot 10^{-8}$  Па.

В ловушках, охлаждаемых холодильными машинами, улавливающие поверхности привариваются или припаиваются к трубке, по которой циркулирует хладагент.

**Термоэлектрические ловушки.** Если для охлаждения ловушки применяется эффект Пельтье, то ловушка называется *термоэлектрической*. Принципиальная схема термоэлектрической ловушки показана на рис. 11.3.

Две ветви полупроводникового элемента *A* и *B*, одна из которых обладает электронной, а другая дырочной проводимостью, с помощью коммутационных пластин соединяются последовательно и включаются в цепь постоянного тока. Один ряд коммутационных пластин, например тот, в котором ток идет от *A* к *B*, охлаждается либо водой, либо воздухом. К другому ряду коммутационных пластин припаиваются улавливающие пластины. Форма последних может быть какой угодно в зависимости от требующейся проводимости, но каждая пластина припаивается только к одной коммутационной пластине, чтобы работали все спай.

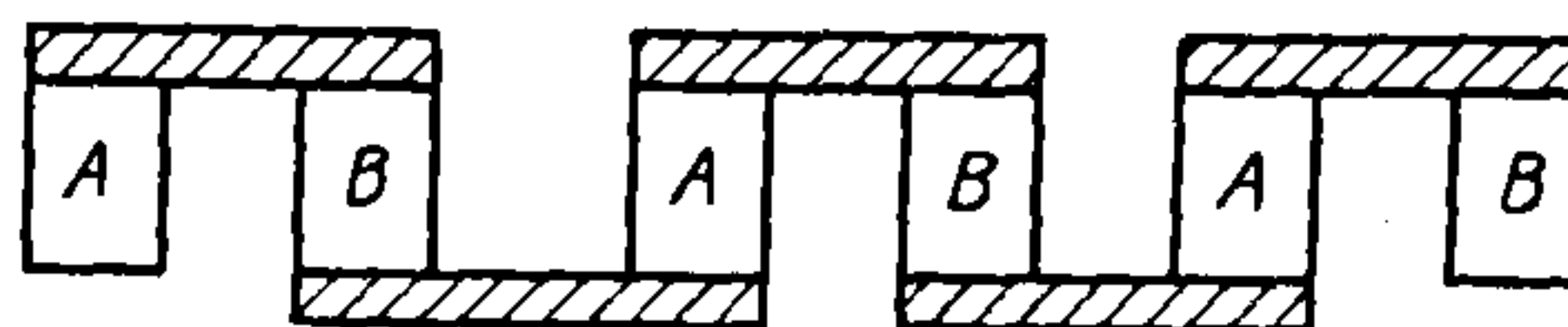


Рис. 11.3. Принципиальная схема термоэлектрической ловушки

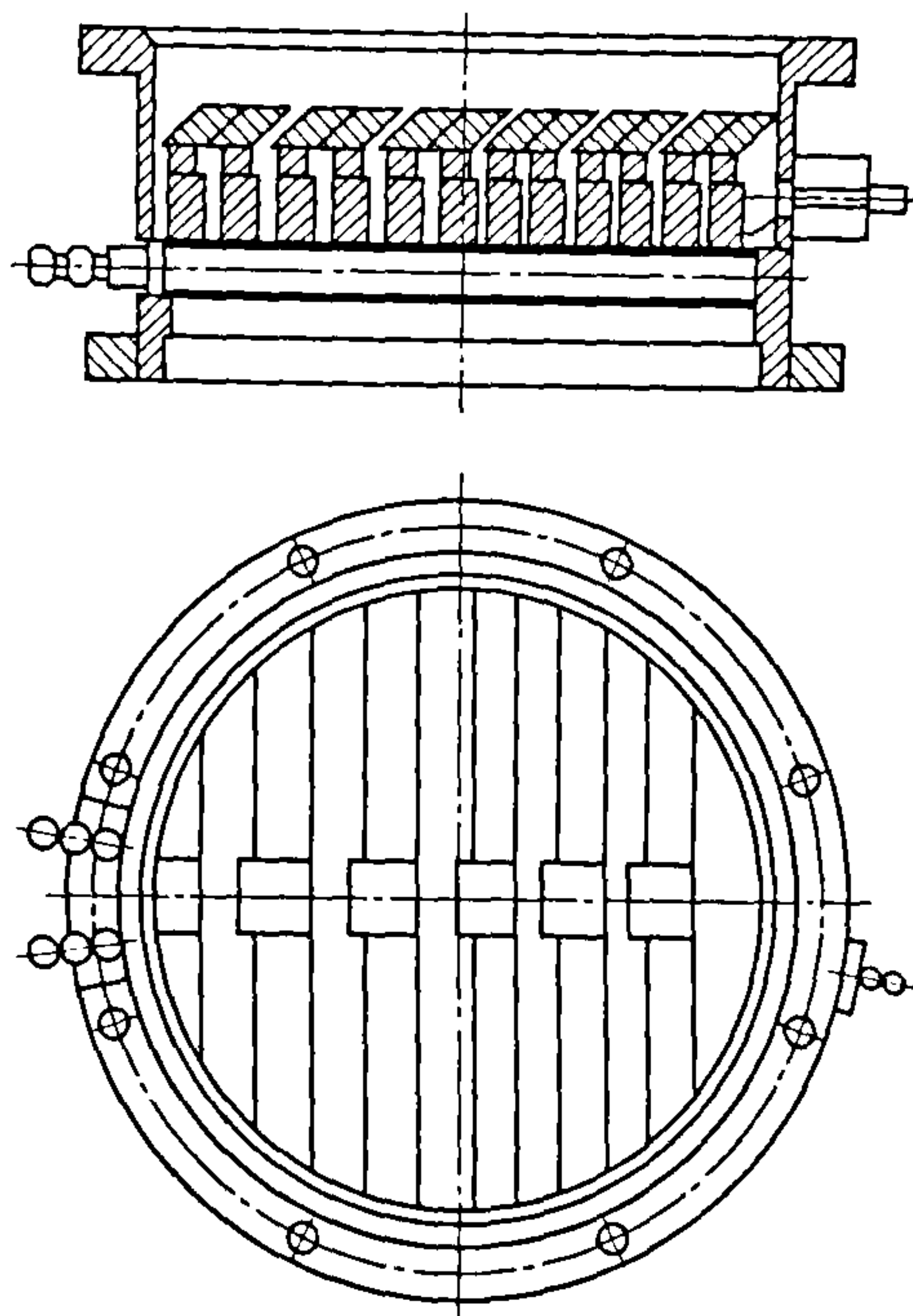


Рис. 11.4. Термоэлектрическая ловушка

Холодопроизводительность термоэлектрических машин очень мала, поэтому в таких ловушках большое значение имеет надежность тепловых и электрических контактов.

Фирма Edwards (Великобритания) производит термоэлектрические ловушки с коммутационными пластинами, охлаждаемыми воздухом. При температуре воздуха  $25^\circ\text{C}$  температура жалюзи ловушки достигает  $-15^\circ\text{C}$ , в случае охлаждения водой с температурой  $15^\circ\text{C}$  температура жалюзи достигает  $-25^\circ\text{C}$ . На рис. 11.4 показана термоэлектрическая ловушка, запатентованная во Франции.

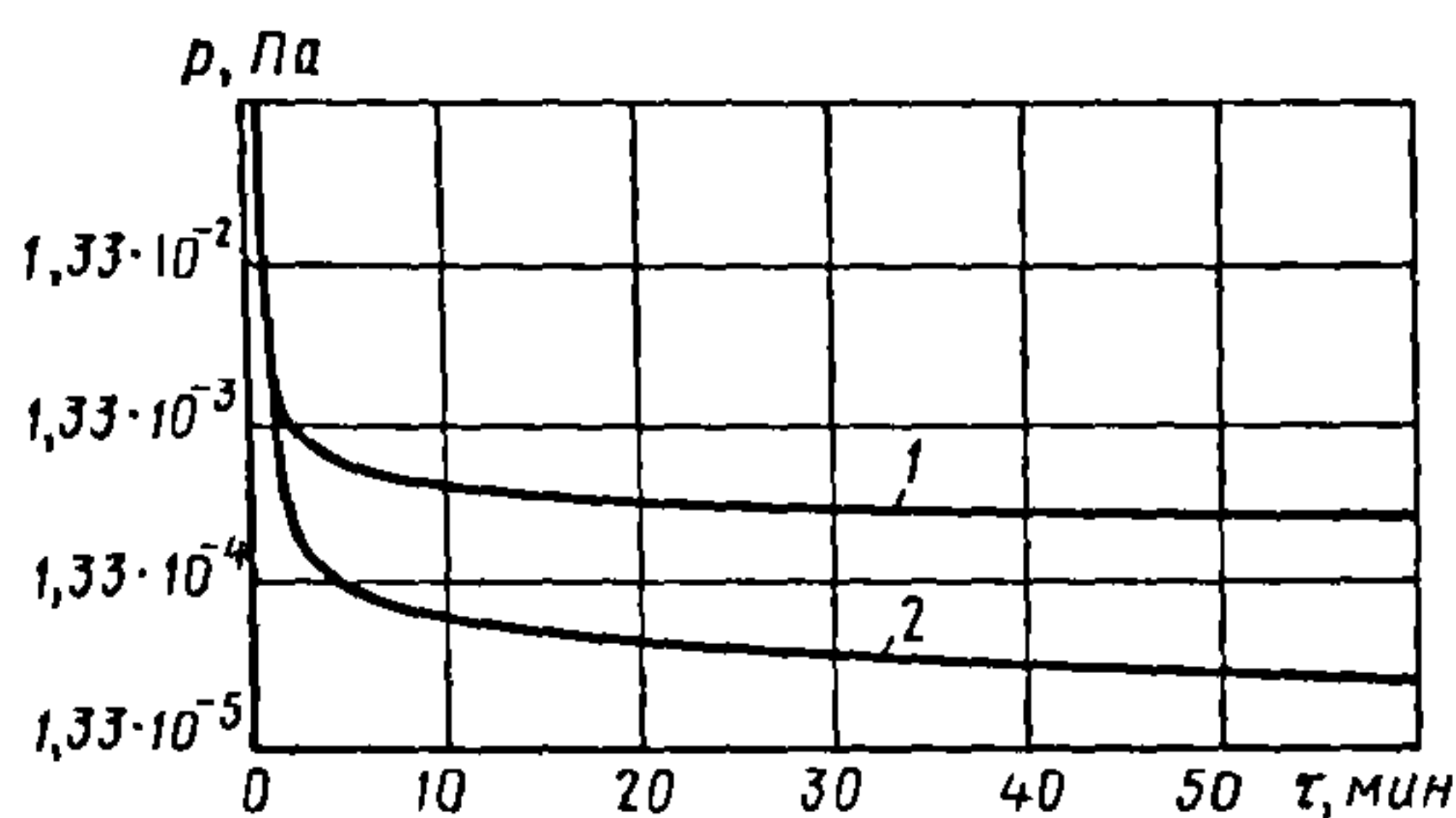


Рис. 11.5. Зависимость давления от времени:  
1 — ловушка включена; 2 — ловушка выключена

Ловушки, охлаждаемые холодильными машинами. В настоящее время в области умеренного холода наибольшей популярностью пользуются ловушки, охлаждаемые при помощи различных холодильных машин. В отличие от термоэлектрических охладителей холодильные машины обладают большей холодопроизводительностью и позволяют охлаждать рабочие поверхности ловушек в широком диапазоне температур (273...120 К).

Помимо работы с диффузионными насосами ловушки, охлаждаемые холодильными машинами, применяются с турбомолекулярными насосами (для откачки паров воды). Такие ловушки могут служить также своего рода крионасосами для откачки некоторых углеводородов [4].

На рис. 11.5 показана зависимость давления от времени в камере, откачиваемой турбомолекулярным насосом при работе с умеренно охлаждаемой ловушкой ( $T_{\text{охл}} = 125...135$  К) и без нее.

На рис. 11.6 приведен график зависимости быстроты действия насоса от давления с ловушкой и без нее.

Конструкция охлаждаемых поверхностей ловушек, используемых с диффузионными насосами, как правило, аналогична конструкции водоохлаждаемых ловушек. Ловушки, используемые с турбомолекулярными насосами, могут значительно отличаться от ловушек, применяемых с диффузионными насосами. Для таких ловушек условие оптической не-

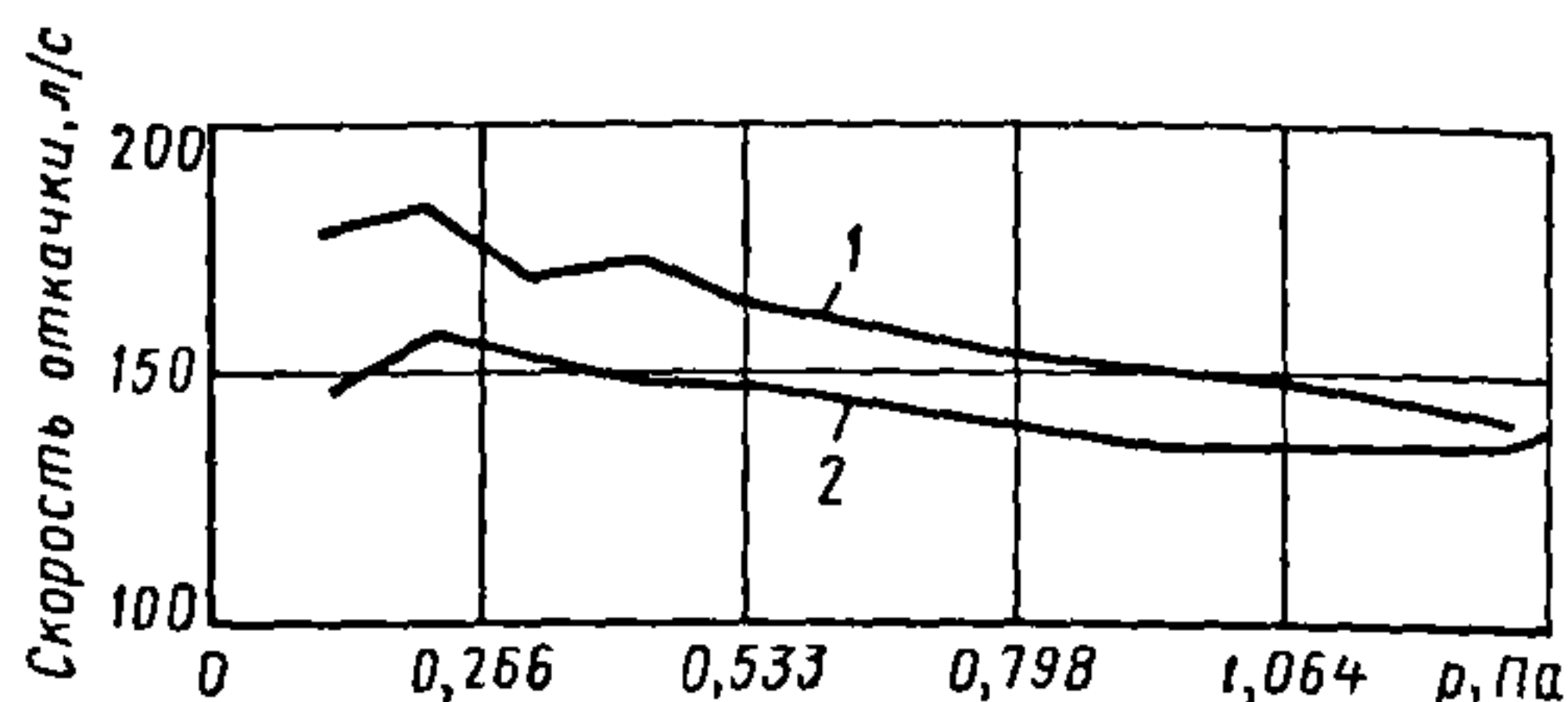


Рис. 11.6. Зависимость быстроты действия турбомолекулярного насоса от давления:  
1 — без ловушки; 2 — с ловушкой

проницаемости не является обязательным, а в некоторых случаях нежелательным.

В частности, выпуском умеренно охлаждаемых ловушек для улавливания паров воды занимаются американские фирмы IGC-Polycold Systems и CTI Cryogenics. На рис. 11.7 и 11.8 приведены некоторые модели, выпускаемые этими фирмами.

Охлаждаемая поверхность ловушки, показанной на рис. 11.7, представляет собой набор из плоских параллельных пластин, расположенных вдоль проходного сечения. Холодная поверхность ловушки, производимой фирмой CTI Cryogenics, имеет форму пластины, размещенной поперек проходного сечения (поперек откачиваемого потока) ловушки.

### 11.2.3. Криоловушки

**Азотные ловушки.** Наибольшей защитной способностью обладают ловушки, охлаждаемые до температур 120 К и ниже. В отечественной промышленности для охлаждения ловушек до таких температур чаще всего применяют азотные ловушки. На рис. 11.9 представлена жалюзийная, охлаждаемая жидким азотом ловушка.

Защитные поверхности 2 ловушек такого типа охлаждаются с помощью медного хладопровода 3, конец которого опущен в сосуд Дьюара 4 с жидким азотом. В табл. 11.4 приведены некоторые технические характеристики ловушек такого типа.



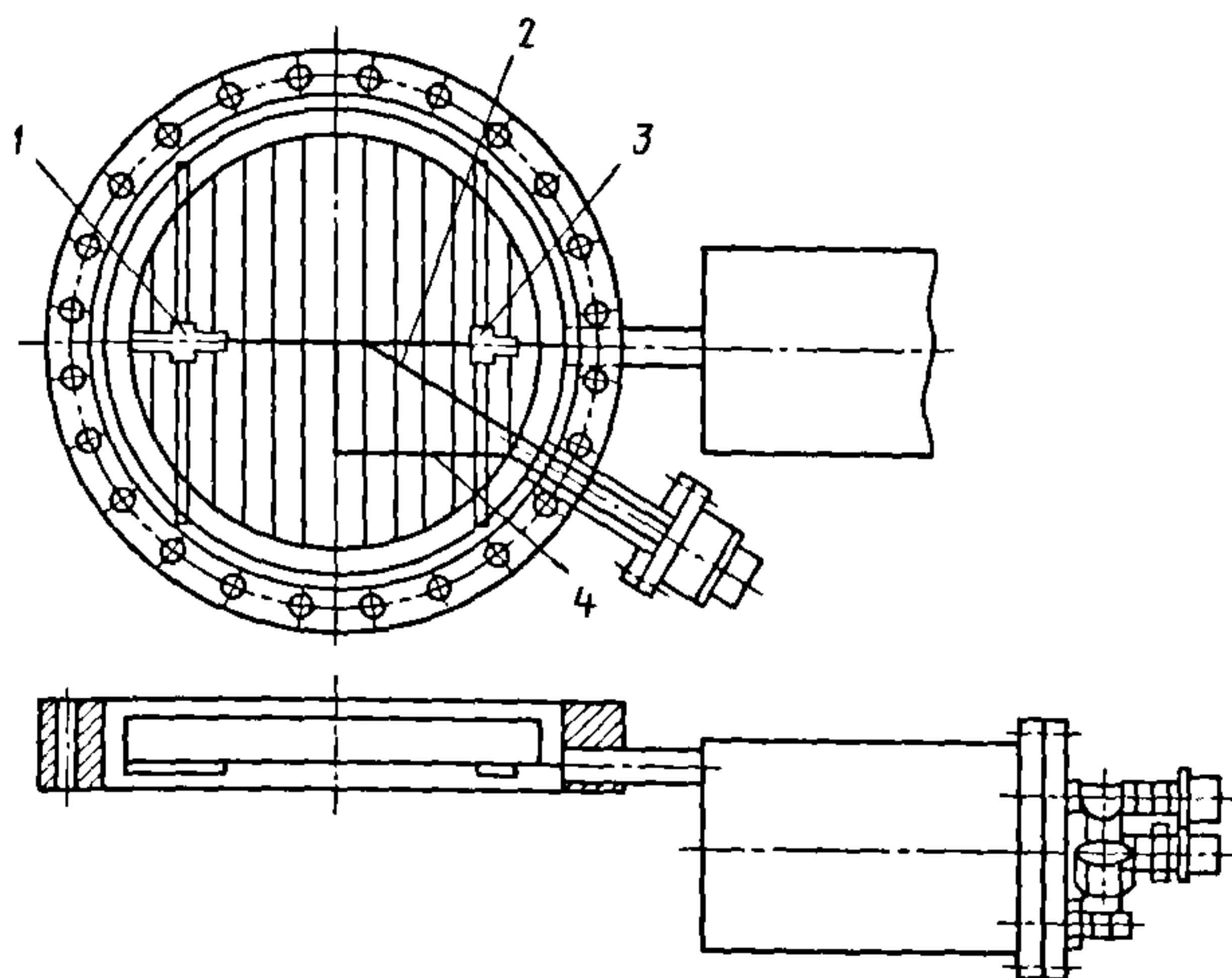


Рис. 11.7. Ловушка АТ-160 (IGC- Polycold Systems):  
1 – датчик; 2 – чувствительный элемент датчика;  
3 – нагреватель; 4 – чувствительный элемент нагревателя

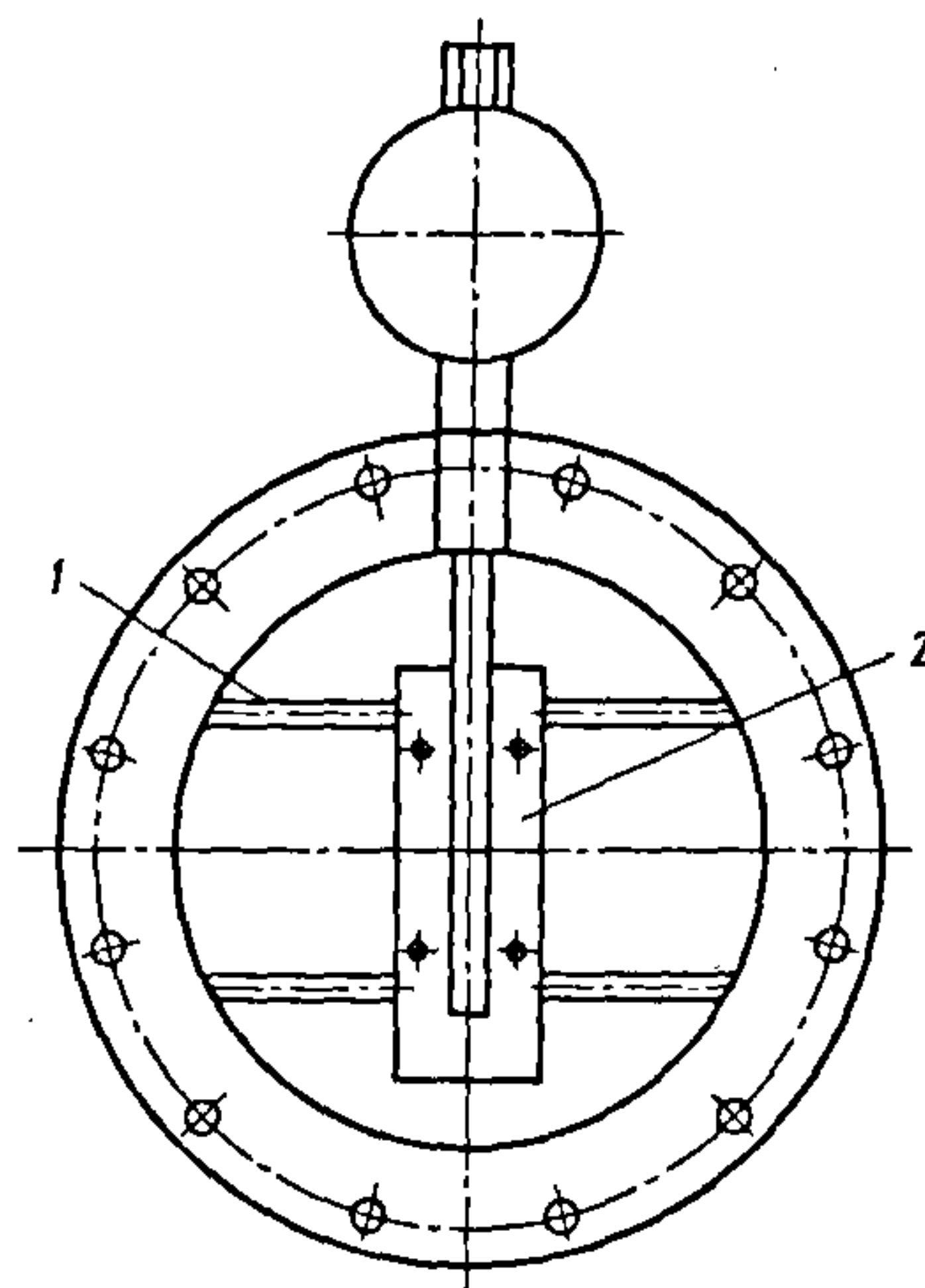


Рис. 11.8. Ловушка диаметром 200 мм (CTI Cryogenics):  
1 – кронштейн; 2 – охлаждаемый объект

#### 11.4. Технические характеристики ловушек

Характеристика	Типоразмер ловушки				
	Ду-85	Ду-160	Ду-260	Ду-380	Ду-500
Проводимость, л/с	133	313	1460	2840	6100
Минимальная температура защитных элементов, К	103				
Расход жидкого азота в установившемся режиме, л/ч	0,12	0,25	0,9...1	0,9...1	1,3...1,5

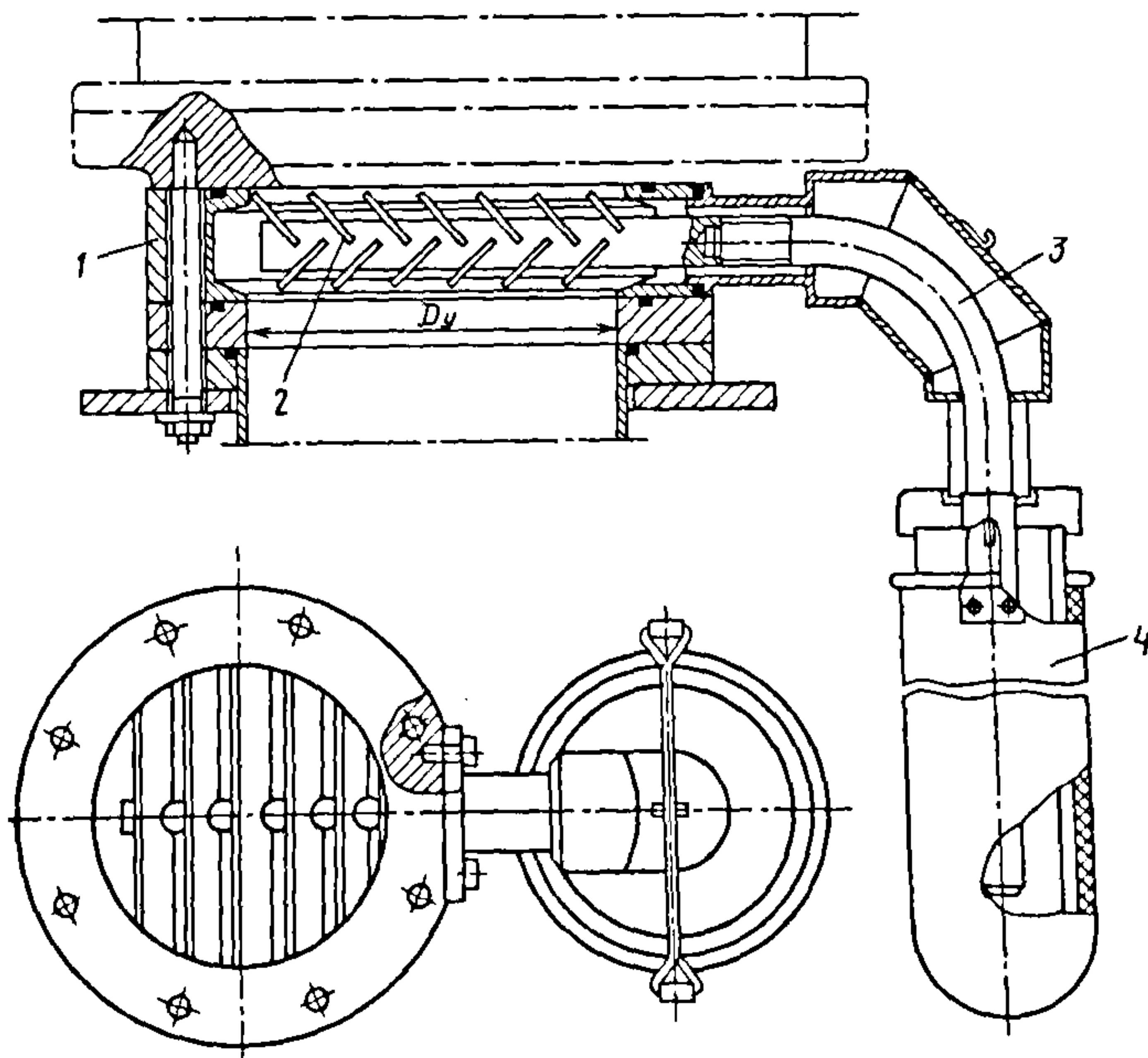


Рис. 11.9. Жалюзийная азотная ловушка:  
1 – корпус; 2 – защитные поверхности; 3 – медный хладопровод; 4 – сосуд Дьюара

Основное преимущество заливных азотных ловушек перед другими криоловушками заключается в простоте их изготовления и, соответственно, в более низкой цене по сравнению с ловушками, охлаждаемыми холодильными машинами и микроохладителями.

В свою очередь, азотные ловушки имеют ряд недостатков: необходимо наличие жидкого азота, нельзя плавно регулировать температуру рабочих поверхностей ловушки до температур ниже азотных.

Упругость паров большинства конденсированных в обычных условиях веществ при температуре кипения азота ничтожно мала. Поскольку, например, для улавливания молекул при температуре кипения азота достаточно одного соударения, то казалось бы, что для полной защиты от паров масла достаточно откачиваемый объем отделить однопролетной ловушкой. Однако плотность паров масла, поступающего от насоса, бывает достаточно велика для того, чтобы вклад в вылет масла вследствие взаимных соударений в объеме ловушки, как было показано ранее, значительно превышал скорость испарения масла.

При температуре кипения азота скорость испарения масла ВМ-1 должна составлять  $7 \cdot 10^{-10}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>). Но от столкновений молекул поток может достигать значения  $5 \cdot 10^{-7}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>). Поэтому для более эффективного захвата паров масла (или другого вещества) применяются ловушки (рис. 11.10).

Такие многоярусные (обычно двухъярусные) [1, 4] конструкции ловушки позволяют значительно уменьшить поток масла, проходящий через ловушку. Например, если первая (нижняя) ступень ловушки охлаждается водой до температуры 293 К, а вторая жидким азотом, то поток, протекающий через ловушку, будет равен  $5 \cdot 10^{-8}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>). Для того чтобы

поток через ловушку был близок к скорости испарения масла ВМ-1 при температуре жидкого азота, необходимо, чтобы первая ступень ловушки охлаждалась до температуры 268 К и ниже.

Расход хладагента в единицу времени в охлаждаемых ловушках зависит от притока теплоты, идущего от наружных стенок корпуса ловушки, теплопритоков благодаря излучению и теплоте, идущей от вымораживаемого вещества (масла, пара, воды и т.п.).

Снижение расхода хладагента может быть достигнуто путем охлаждения корпуса ловушки водой; установки промежуточной водоохлаждаемой ловушки; применения различных тепловых развязок (рис. 11.11). Одним из наиболее действенных способов повышения эффективности ловушки является использование собственного охранного вакуума. Между корпусом ловушки и сосудом для жидкого азота поддерживается вакуум порядка  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  Па, что позволяет снизить расход жидкого азота до 1...2 л/сут.

На рис. 11.12 представлена конструкция ловушки с собственным охранным вакуумом. Такая конструкция дает возможность эксплуатировать ловушку на одной заправке в течение 3–6 сут.

**Ловушки, охлаждаемые микроохладителями.** Для охлаждения ловушек до азотных температур и ниже также применяются микроохладители, работающие по циклам Мак-Магона и Стерлинга (рис. 11.13). Преимущество ловушек такого типа перед азотными ловушками заключается в том, что они в зависимости от требований эксплуатации позволяют достаточно плавно изменять температуру рабочих поверхностей и не нужно постоянного наличия жидкого азота. Однако ловушки с микроохладителями значительно превышают азотные ловушки по своей стоимости.



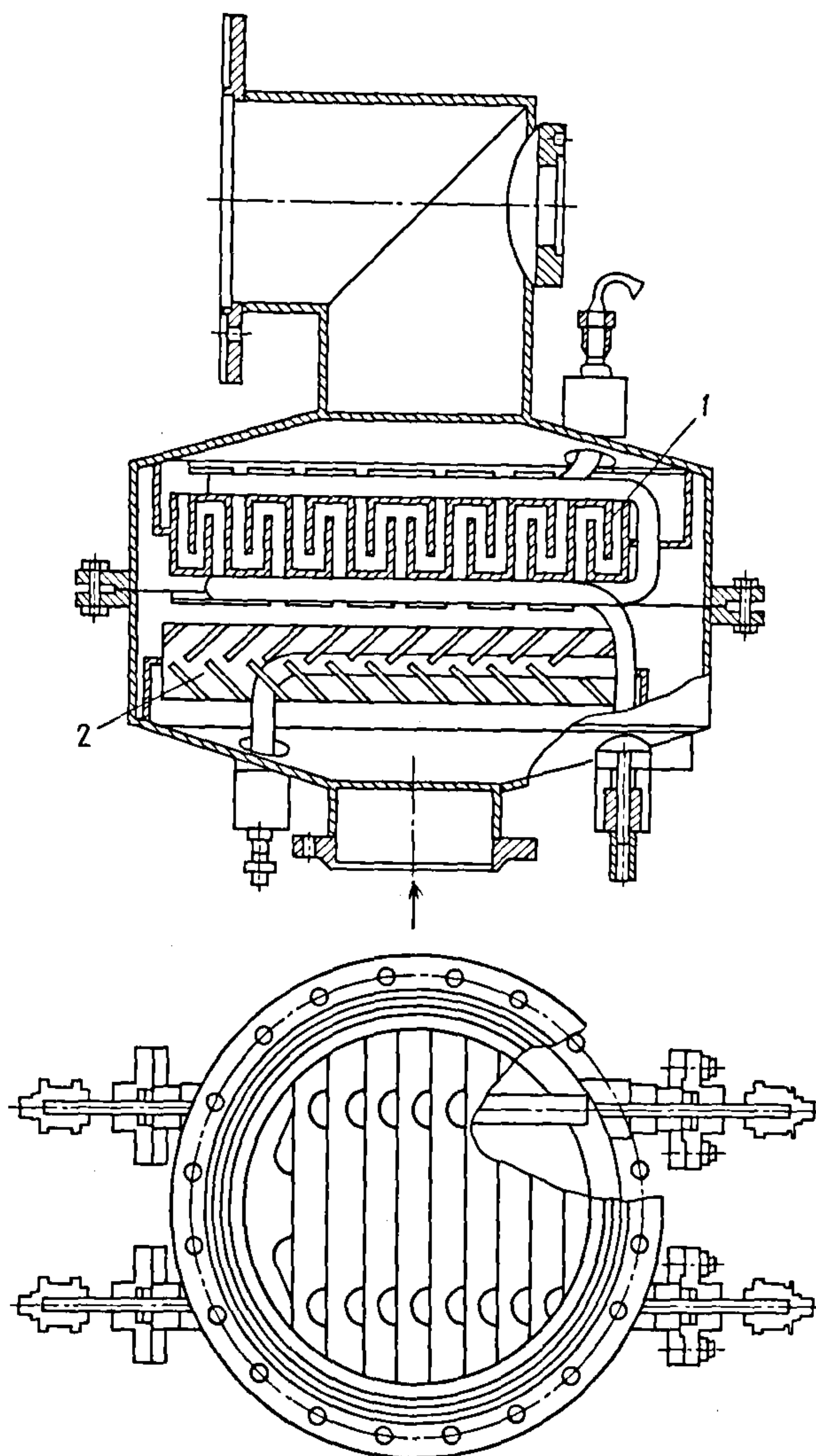


Рис. 11.10. Схема высоковакуумной двухъярусной ловушки:  
1 – защитные поверхности ловушки с охлаждением водой; 2 – то же, с охлаждением жидким азотом

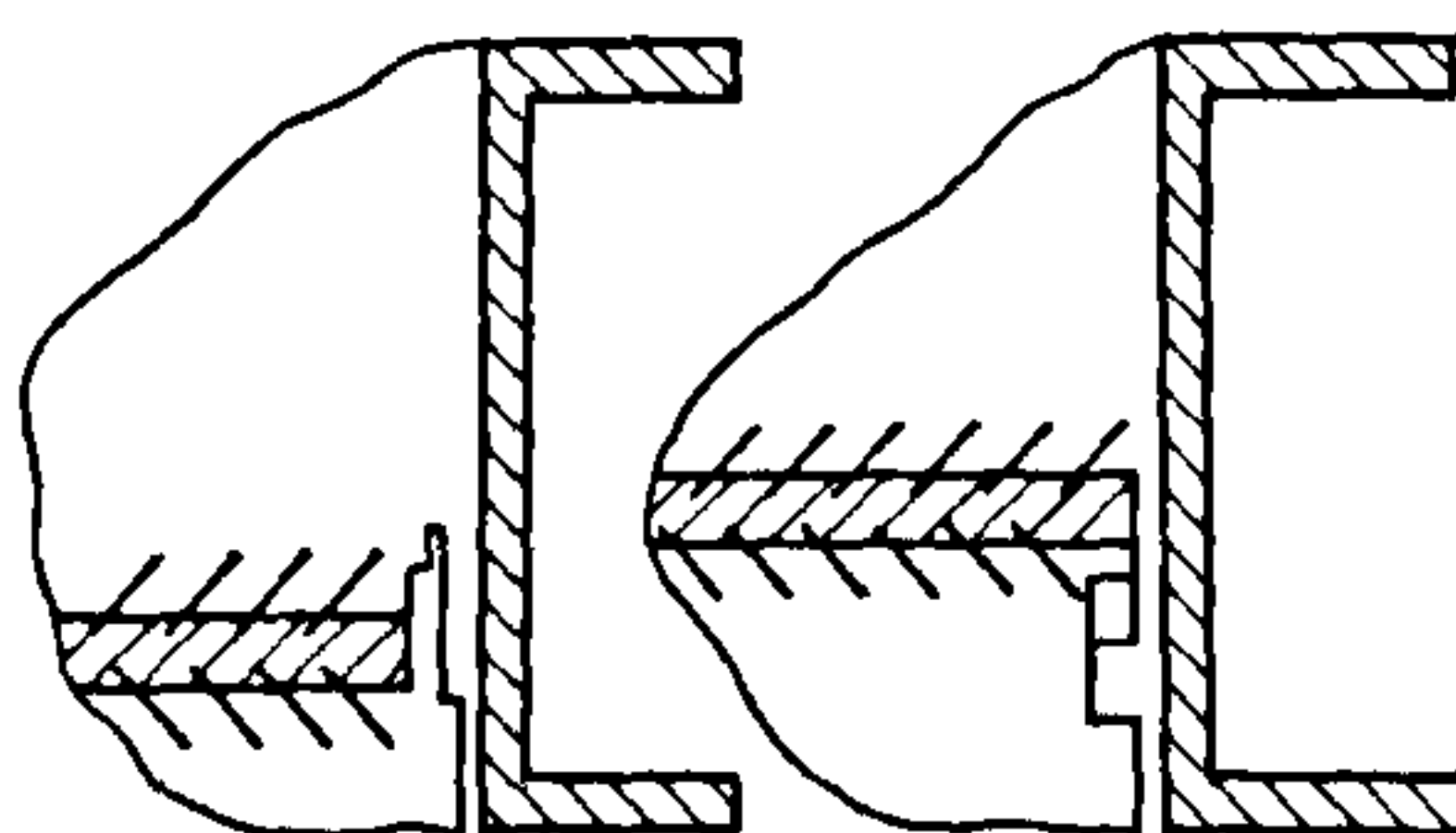


Рис. 11.11. Тепловые развязки

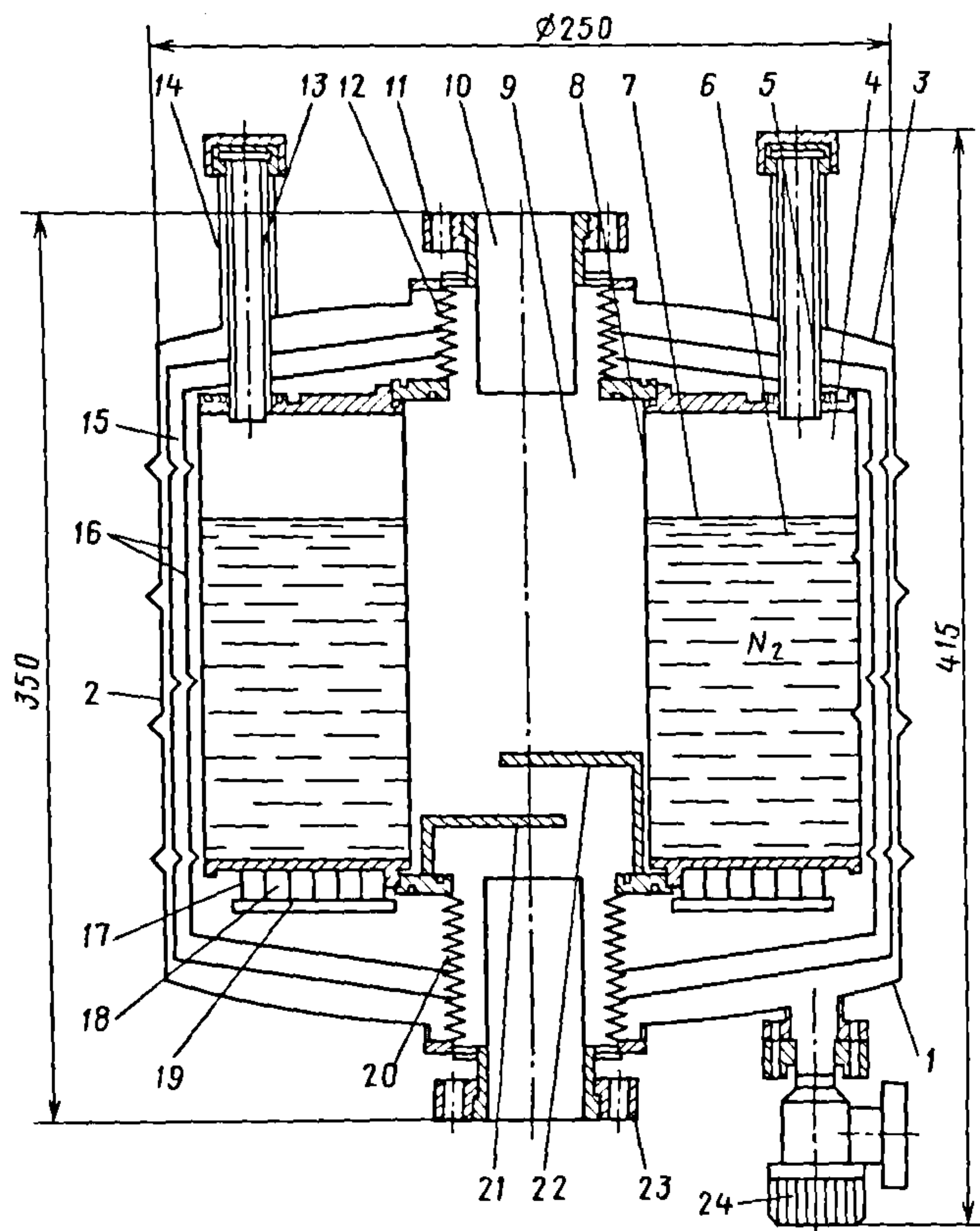


Рис. 11.12. Общий вид ловушки с собственным охранным вакуумом:

1 – днище ловушки; 2 – корпус; 3 – крышка корпуса; 4 – сосуд для жидкого азота; 5 – крышка сосуда для жидкого азота; 6 – наружная обечайка; 7 – днище; 8 – внутренняя обечайка N<sub>2</sub>-сосуда; 9 – вакуумируемый канал; 10 – входное отверстие; 11 – фланец Ду-40 «Конфлат»; 12 – тепловой мост в виде сжатого первоначально длинного сильфона; 13 – тонкостенные трубки-подвесы; 14 – патрубки; 15 – полость охранного вакуума; 16 – два «плавающих» экрана; 17 – корзина с адсорбентом; 18 – активированный уголь; 19 – пористая медь; 20 – тепловой мост, аналогичный мосту 12; 21, 22 – оптически плотно расположенные перегородки; 23 – выходной фланец, аналогичный фланцу 11; 24 – сверхвысоковакуумный клапан с металлическим уплотнением Ду-16

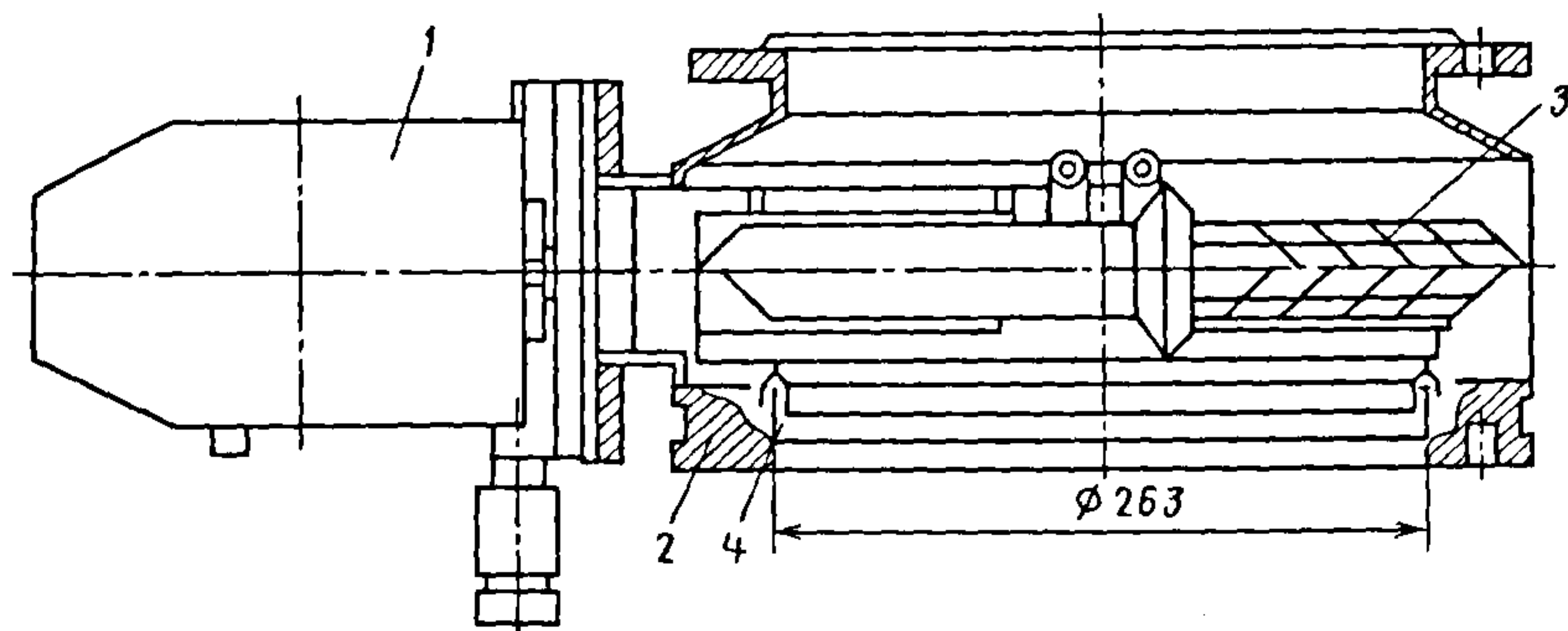


Рис. 11.13. Схема ловушки с микроохладителем:

1 – редуктор; 2 – корпус; 3 – жалюзи; 4 – антимигратор

#### 11.2.4. Сорбционные ловушки

Несмотря на то что охлаждаемые ловушки обеспечивают достаточно надежную защиту откачиваемого объема от попадания паров рабочей жидкости, их не-

сомненным недостатком является необходимость постоянной подачи охлаждающего вещества (хладагента).

Высокая адсорбционная способность некоторых пористых веществ – адсорбентов (цеолита, активированного оксида



алюминия, активированного угля) дает возможность создавать эффективные ловушки [5]. На рис. 11.14 изображена не охлаждаемая адсорбционная ловушка, в которой в качестве адсорбента используется активированный уголь. Благодаря низкой температуре кипения масел их пары хорошо сорбируются на развитых поверхностях адсорбентов.

Первые опыты по применению адсорбентов для защиты откачиваемого объема от паров масла были проведены Керрисом в 30-х годах прошлого века. В качестве поглотителя исследовались силикагель и уголь. Было опробовано действие силикагеля на форвакууме. Оказалось, что силикагель улучшает предельный вакуум, но быстро насыщается.

Сравнительно широкое применение сорбционные ловушки нашли в связи с распространением сверхвысоковакуумных систем. В 1953 г. Альперт предложил ловушку из медной фольги для паромасляных диффузионных насосов, с помощью которой можно было в течение недель поддерживать вакуум  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Па.

Обзор экспериментальных работ по медной ловушке Альперта проведен Блаутом. Им же предложена теория работы ловушки Альперта, основанная на предположении, что масло на поверхности этих ловушек разлагается под действием ионизованных молекул, поступающих от манометрической лампы.

Ловушки Альперта обладают малой проводимостью и потому нашли применение только в лабораторных установках. Гораздо больший успех выпал на долю ловушек с сорбентами с развитой поверхностью.

Широко известна ловушка Бионди с искусственным цеолитом или оксидом алюминия. Хорошая температурная стойкость ( $-600$  °С для цеолита и  $\sim 1000$  °С для окиси алюминия) допускает прогрев при очень высоких температурах. На насос с быстротой действия 300 л/с была установлена ловушка с цеолитом, за которой в течение 70 дней поддерживался вакуум лучше  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Па.

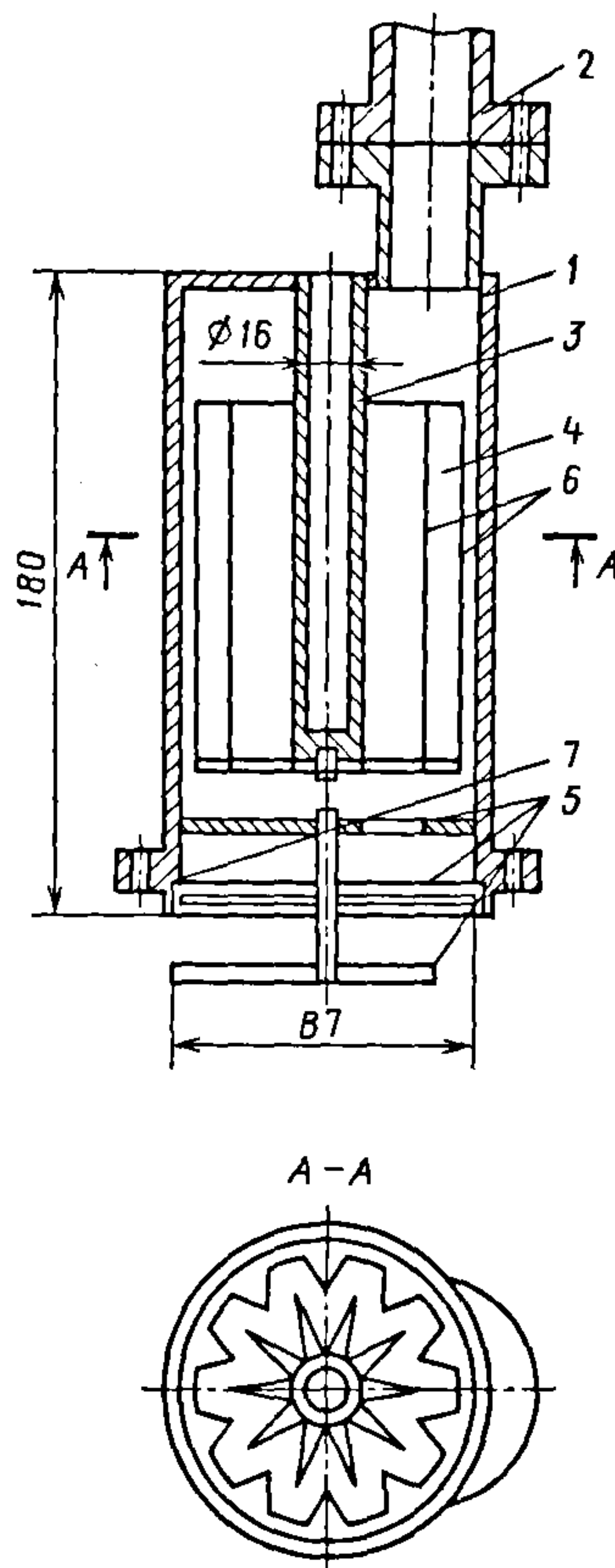
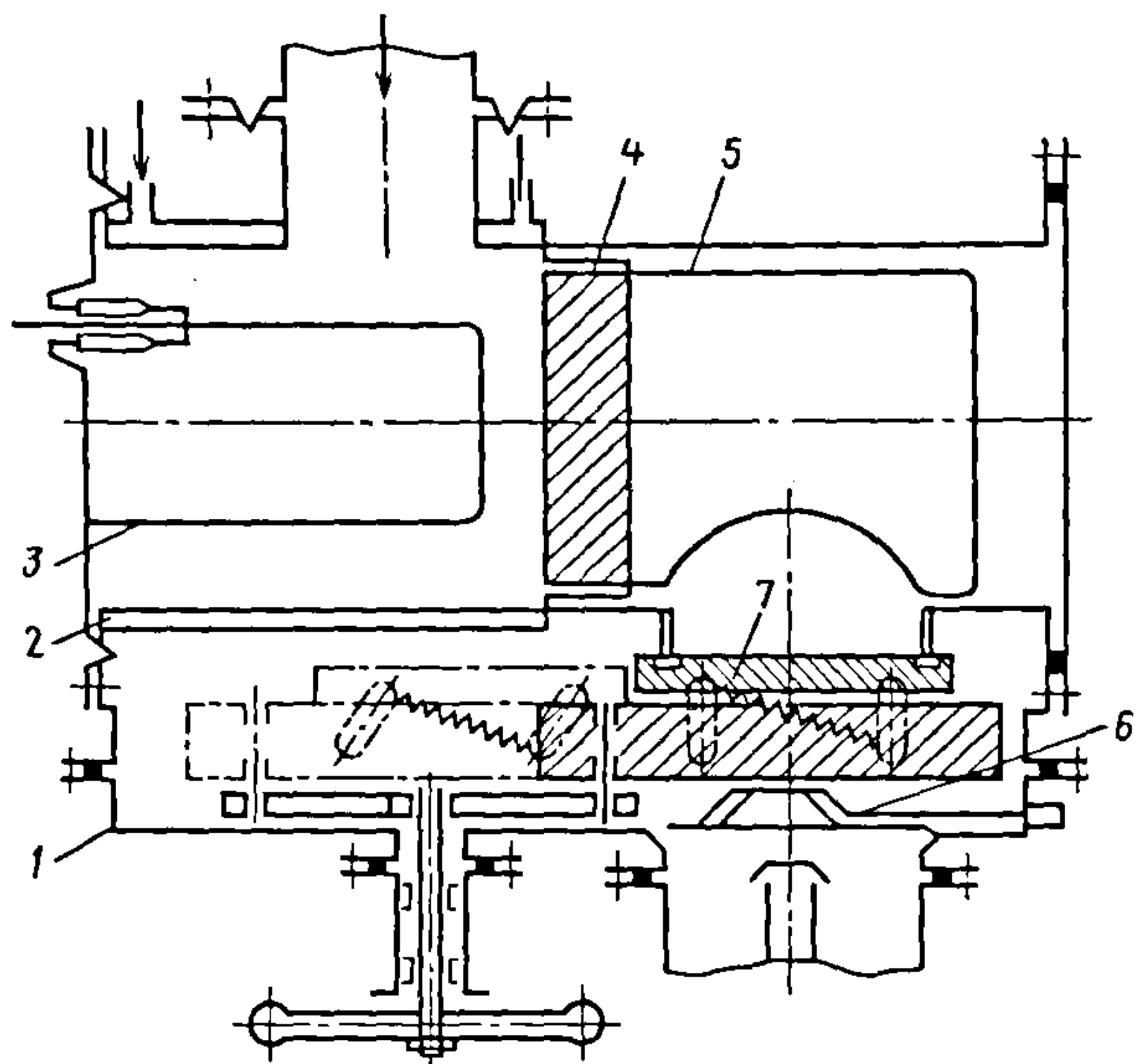


Рис. 11.14. Высоковакуумная адсорбционная ловушка:

1 – корпус; 2 – фланец; 3 – трубка для нагревателя; 4 – адсорбент; 5 – маслоотражатель; 6 – сетка; 7 – трубка

В настоящее время применение сорбционной ловушки не редкость. Сорбционная ловушка углового типа была также описана Миллероном и Левенсоном [6]. Сейчас сорбционные ловушки выпускаются ведущими западными фирмами наряду с конденсационными.

Обезгаживание сорбента обычно проводится непосредственно на установке. Однако Бехлер предложил помещать сорбент в вакуумную камеру уже обезгаженным в герметичных капсулах, а ловушку заполнять ими только после откачки и обезгаживания всей системы.



**Рис. 11.15. Термосорбционная ловушка:**

1 – вакуумный затвор; 2 – корпус термосорбционной ловушки; 3 – титановая нить; 4, 5 – водоохлаждаемые экраны; 6 – водоохлаждаемый колпачок; 7 – вход в термосорбционную ловушку

Сорбционные ловушки отличаются теми достоинствами, что не требуют охлаждения и защищают откачиваемый объем столь же эффективно, как и криогенные, при той же самой удельной проводимости. Важным преимуществом сорбционных ловушек является непрерывность работоспособности: они поглощают пары масла во время «отдыха» системы, когда криоловушки могут рассматриваться как источники загрязнения. К недостаткам сорбционных ловушек относятся возможность попадания пыли сорбента в откачиваемый объем, а также большая сорбционная емкость сорбентов по отношению к любому газу, что приводит к необходимости прогрева ловушки для обезгаживания после работы с большой газовой нагрузкой даже до насыщения ее маслом.

К сорбционным ловушкам можно причислить и так называемые термосорбционные ловушки, являющиеся, по существу, геттерным титановым насосом. Ловушка представляет собой (рис. 11.15) угловой патрубков, охлаждаемый водой, на внутреннюю поверхность которого непрерывно напыляется титан с накаливаемой титановой нити.

Ловушка отличается тем, что она не только не пропускает паров масла из насоса, но и помогает насосу откачивать остаточные газы и водород, так что формально ловушка не оказывает никакого сопротивления откачиваемому газу. Недостатками ее являются относительная сложность изготовления и эксплуатации и непрерывное выделение водорода в результате крекинга масла на поверхности титана.

#### 11.2.5. Каталитические (химические) ловушки

При регенерации ловушек в составе откачного поста возможен проскок углеводородов. В связи с этим в различных странах проводятся работы по созданию каталитических ловушек, принцип действия которых основан на каталитическом разложении на металлических поверхностях [7, 8]. Первые каталитические ловушки URB025 и URB040 с диаметрами условных проходов 25, 40 мм соответственно основаны на использовании процесса химического взаимодействия углеводородов с активным кислородом, в результате которого молекула углеводорода



преобразуется в молекулы легкооткачиваемых продуктов химической реакции ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ). Для увеличения скорости протекания этой реакции в защитный слой вводятся специальные вещества, являющиеся катализаторами, а температура защитного слоя повышается от температуры осажденного слоя до  $250^\circ\text{C}$ . Преимуществами ловушек такого типа являются непрерывность их действия и полная нечувствительность к парам воды. Ловушки не нуждаются в регенерации, а также в техническом обслуживании в течение всего периода эксплуатации (два года).

Недостаток этих ловушек заключается в необходимости постоянного нагрева защитного слоя несмотря на то, что величина потребляемой мощности незначительна и составляет для ловушек URB025 и URB040 25 и 50 Вт соответственно.

На рис. 11.16 показаны каталитические ловушки типа ЛК10; ЛК25 и ЛК40. Диаметры условных проходов этих ловушек составляют соответственно 10, 25 и 40 мм, величины потребляемой мощности 15, 25 и 50 Вт.

В каталитических ловушках молекулы углеводородов вначале адсорбируются защитным слоем, при этом протекает реакция их окисления кислородом, содержащимся в защитном слое и откачных газах:



Эта реакция стимулируется наличием в защитном слое катализатора реакции окисления и высокой температурой защитного слоя. Конструктивно каталитические ловушки состоят из корпуса, изготовленного из коррозионно-стойкой стали, с входным и выходным патрубками, снабженными присоединительными фланцами. Внутри корпуса расположены защитный слой, содержащий гранулы адсорбента-катализатора, и нагреватель, разделяющий входной и выходной патрубки. Ловушка снабжена устройством калиброванной подачи кислородсодержащих газов извне, а также электровводами.

Работают каталитические ловушки следующим образом: защитный слой ловушки при атмосферном давлении нагревается до рабочей температуры, после чего включается форвакуумный насос. По мере понижения давления в насосе от атмосферного до  $10^{-2}$  Па обратный поток молекул углеводородов из механического насоса увеличивается, достигая максимального значения.

Большая часть этих молекул (75 %) и капельная фаза попадают на отражающий экран каталитической ловушки и возвращаются обратно в насос. Остальные молекулы углеводородов проникают внутрь ловушки, адсорбируются защитным слоем и окисляются с образованием легколетучих молекул диоксида углерода и воды, которые откачиваются форвакуумным насосом. В процессе откачки кислород, запасенный в защитном слое, расходуется. При вскрытии камеры и напуске атмосферного воздуха защитный слой вновь запасается кислородом.

В случае длительной (круглосуточной) работы ловушки без напуска воздуха возможен его дозированный напуск непосредственно в процессе откачки. Величина потока напускаемого воздуха, необходимого для поддержания работы ловушки, при этом составляет  $1,8 \dots 4,0 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ , что не сказывается существенно на величине предельного остаточного давления откачной системы. Основные технические параметры ловушек ЛК10, ЛК25 и ЛК40 представлены в табл. 11.5.

#### 11.5. Основные технические параметры каталитических ловушек

Параметр	ЛК10	ЛК25	ЛК40
Диаметр условного прохода, мм	10	25	40
Проводимость при давлении 6,7 Па, л/с	1,9	7,9	13,8
Расчетное время непрерывной работы, ч	15 000		



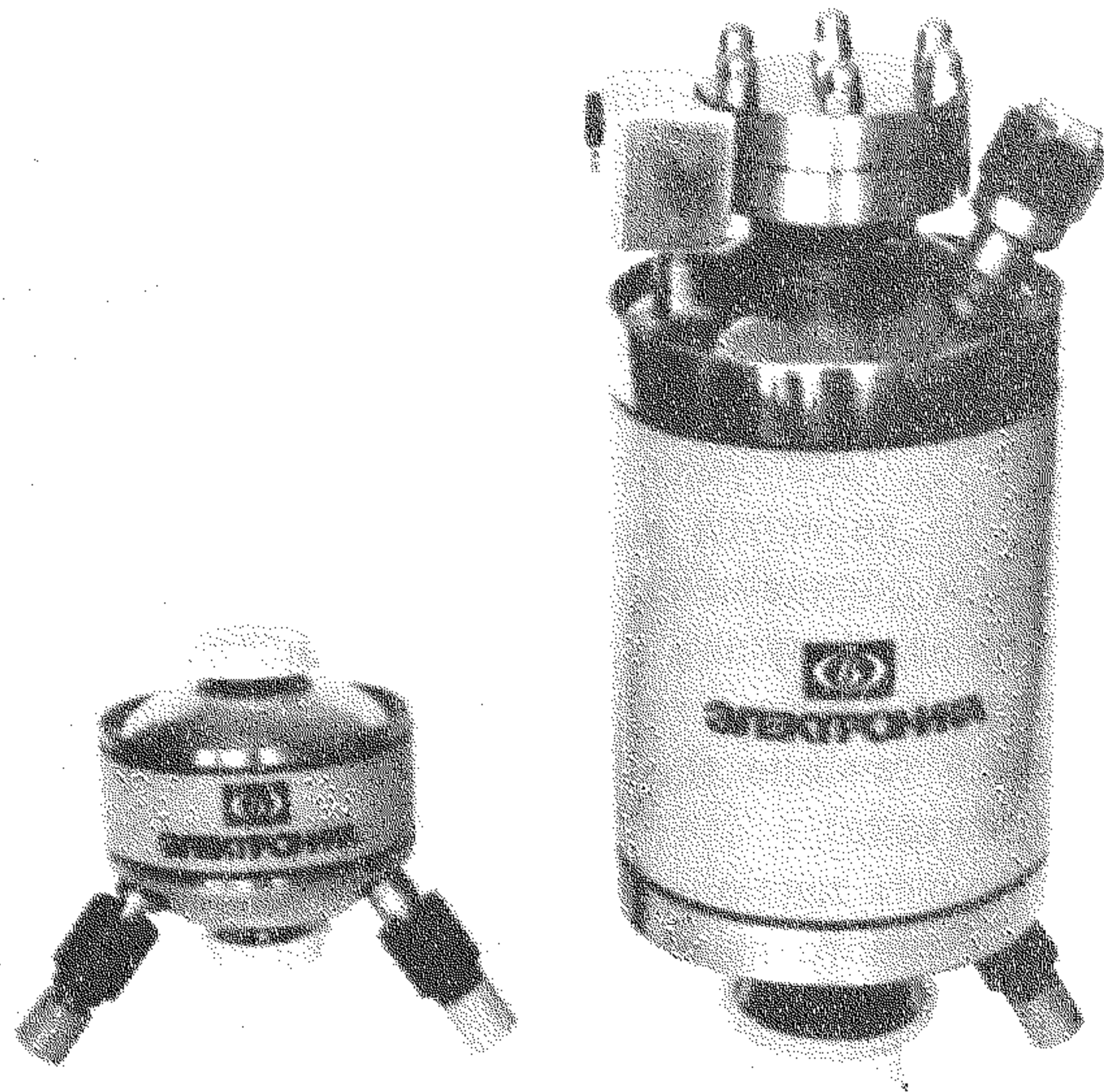


Рис. 11.16. Каталитические ловушки ЛК10, ЛК25, ЛК40

Оптимальный режим работы каталитических ловушек непрерывный. В этом случае ловушки не нуждаются в техническом обслуживании на протяжении всего срока эксплуатации.

### 11.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ВЫСОКОВАКУУМНЫХ ЛОВУШЕК

#### 11.3.1. Общие вопросы

Проводимость и защитная способность являются основополагающими величинами при проектировании и модификации высоковакуумных ловушек. Проводимость ловушки зависит от ее геометрии, а на защитную способность ловушки помимо геометрии влияют еще и температура, и степень насыщенности адсорбента, и вещество, захватываемое ловушкой. Но если геометрия адсорбционной ловушки во время работы неизменна, то геометрия низкотемпературных ловушек за счет конденсации, десублимации захватываемых веществ постоянно изменяется. Это, естественно, может приводить к постоянному изменению проводимости и защитной способности ловушки. Причем если проводимость при этом понижается, то защитная способность ловушки может по-

вышаться благодаря увеличению площади захватываемой поверхности.

Структура твердой фазы (криослоя), образующейся на холодных поверхностях ловушки, также влияет на характеристики низкотемпературных ловушек.

#### 11.3.2. Расчет высоковакуумных ловушек для диффузионных насосов

Широко используемые в промышленности паромасляные диффузионные и механические насосы являются источником паров масла. Пары рабочей жидкости насоса зачастую мешают проведению технологического процесса, поэтому для защиты откачиваемых объектов применяются маслоулавливающие устройства — ловушки. Ловушки также могут предназначаться для защиты насосов от летучих продуктов, выделяющихся в ходе технологического процесса, и от возвращения рабочего вещества обратно в насос.

Проводимость ловушки зависит только от геометрии ее конструкции. Теоретически проводимость ловушки можно определить с помощью следующих методов: угловых коэффициентов, эквивалентных поверхностей, метода пробной



частицы Монте-Карло [2]. При современном уровне развития вычислительной техники наиболее удобный и точный метод для расчета проводимости ловушек – это метод пробной частицы Монте-Карло.

Для выявления отражательной способности ловушки можно успешно применять метод пробной частицы Монте-Карло. В области низких давлений метод Монте-Карло дает относительно точное значение отражательной способности.

**Расчет водоохлаждаемой ловушки для диффузионного насоса.** Исходными данными для моделирования стационарного течения газа через вакуумный элемент, имеющий один вход и один выход, являются:

- конфигурация внутренних элементов вакуумной системы;
- распределение молекул по площади входного сечения;
- угловое распределение молекул на входе;
- то же, при отражении от поверхностей вакуумной системы;
- коэффициенты прилипания для каждой поверхности и число пробных частиц.

Моделируемыми случайными величинами являются координаты точки входа молекулы в элемент вакуумной системы и два угла, определяющие направление движения молекул от точки входа или с поверхности элемента.

Таким образом, для каждой пробной частицы моделируется траектория ее движения внутри элемента вакуумной системы, пока эта частица не покинет элемент или не будет поглощена какой-либо поверхностью.

Так как метод пробной частицы не позволяет учитывать столкновения между молекулами, то при расчете коэффициента отражательной способности ловушки эти столкновения не учитываются. Предложенная методика иллюстрируется расчетом параметров ловушки ЛП-800 (рис. 11.17).

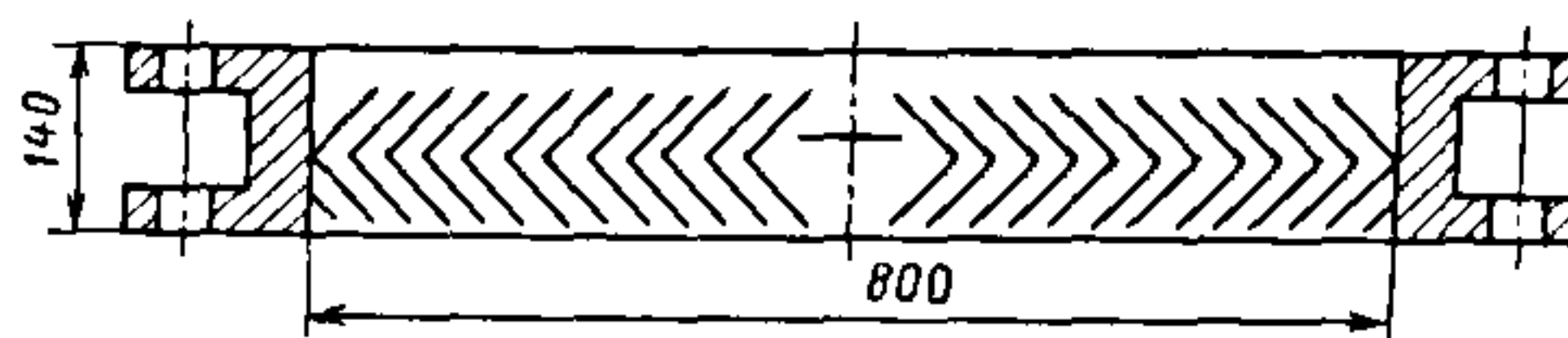


Рис. 11.17. Схема ловушки ЛП-800

При расчете коэффициента проводимости считается, что частицы равномерно распределены по площади входного сечения ловушки. Проводимость ловушки определяется по формуле

$$U = 36,4 K_{\text{пров}} F \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (11.3)$$

где  $K_{\text{пров}}$  – коэффициент проводимости (коэффициент Клаузинга) ловушки;  $F$  – площадь входного сечения ловушки;  $T$  и  $\mu$  – температура и молекулярная масса откачиваемого газа.

Для воздуха ( $\mu = 29$  г/моль) при температуре 293 К формула (11.3) принимает следующий вид:

$$U = 116 K_{\text{пров}} F. \quad (11.4)$$

Площадь входного сечения ловушки ЛП-800 равна  $0,5024 \text{ м}^2$ . Коэффициент проводимости ловушки, рассчитанный по методу пробной частицы, равен 0,17, следовательно, проводимость ловушки  $U$ , согласно формуле (11.4), равна  $9,9 \text{ м}^3/\text{с}$  (или 9900 л/с).

Быстрота действия насоса  $S$  без ловушки ЛП-800 равна 26 000 л/с. Оценочная быстрота действия насоса  $S_0$  вместе с ловушкой может быть определена из основного уравнения вакуумной техники

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S} \Rightarrow S_0 = \frac{US}{U+S} = 7170 \text{ л/с}.$$

Расчет отражательной способности ловушки ЛП-800 в зависимости от коэффициента прилипания проводился по методу пробной частицы для 400 000 пробных частиц. Известно, что молекулы рабочей жидкости диффузионного насоса распределены по площади входного сечения неравномерно (здесь входное сечение находится со стороны насоса). Распределение молекул рабочей жидкости по пло-

щади входного сечения ловушки (со стороны насоса) представлено на рис. 11.18.

Зная отражательную способность ловушки и поток рабочей жидкости, выходящий из насоса, определяют поток, который попадет из насоса в откачиваемый объем через ловушку. Из насоса DIP 30000 в откачиваемый объем попадает поток рабочей жидкости  $Q_n$ , равный  $1 \cdot 10^{-3}$  мг/(ч·см<sup>2</sup>). Поток рабочей жидкости, прошедший из насоса в откачиваемый объем через ловушку, определяется как произведение отражательной способности ловушки  $\Pi_0$  на поток, вышедший из насоса  $Q_n$ .

На рис. 11.19 показана зависимость отражательной способности ловушки ЛП-800 от коэффициента прилипания.

В табл. 11.6 приведены значения отражательной способности ловушки ЛП-800 и потока паров рабочей жидкости, прошедшего в откачиваемый объем, для различных коэффициентов прилипания на охлаждаемых поверхностях ловушки.

Под коэффициентом прилипания понимается вероятность того, что частица

рабочей жидкости насоса останется на поверхности при соприкосновении с ней. Несмотря на отсутствие точных данных о коэффициенте прилипания различных газов на различных поверхностях, известно, что коэффициент прилипания тем ближе к 1, чем ниже температура поверхности.

### 11.6. Зависимость отражательной способности и потока паров рабочей жидкости от коэффициента прилипания

Коэффициент прилипания	Отражательная способность	Поток паров рабочей жидкости, мг/(ч·см <sup>2</sup> )
0,95	0,00043	$4,3 \cdot 10^{-7}$
0,9	0,0011	$1,1 \cdot 10^{-6}$
0,85	0,0018	$1,8 \cdot 10^{-6}$
0,8	0,0024	$2,4 \cdot 10^{-6}$
0,75	0,0033	$3,3 \cdot 10^{-6}$
0,7	0,0043	$4,3 \cdot 10^{-6}$
0,65	0,0062	$6,2 \cdot 10^{-6}$
0,6	0,0075	$7,5 \cdot 10^{-6}$
0,5	0,0125	$1,25 \cdot 10^{-5}$

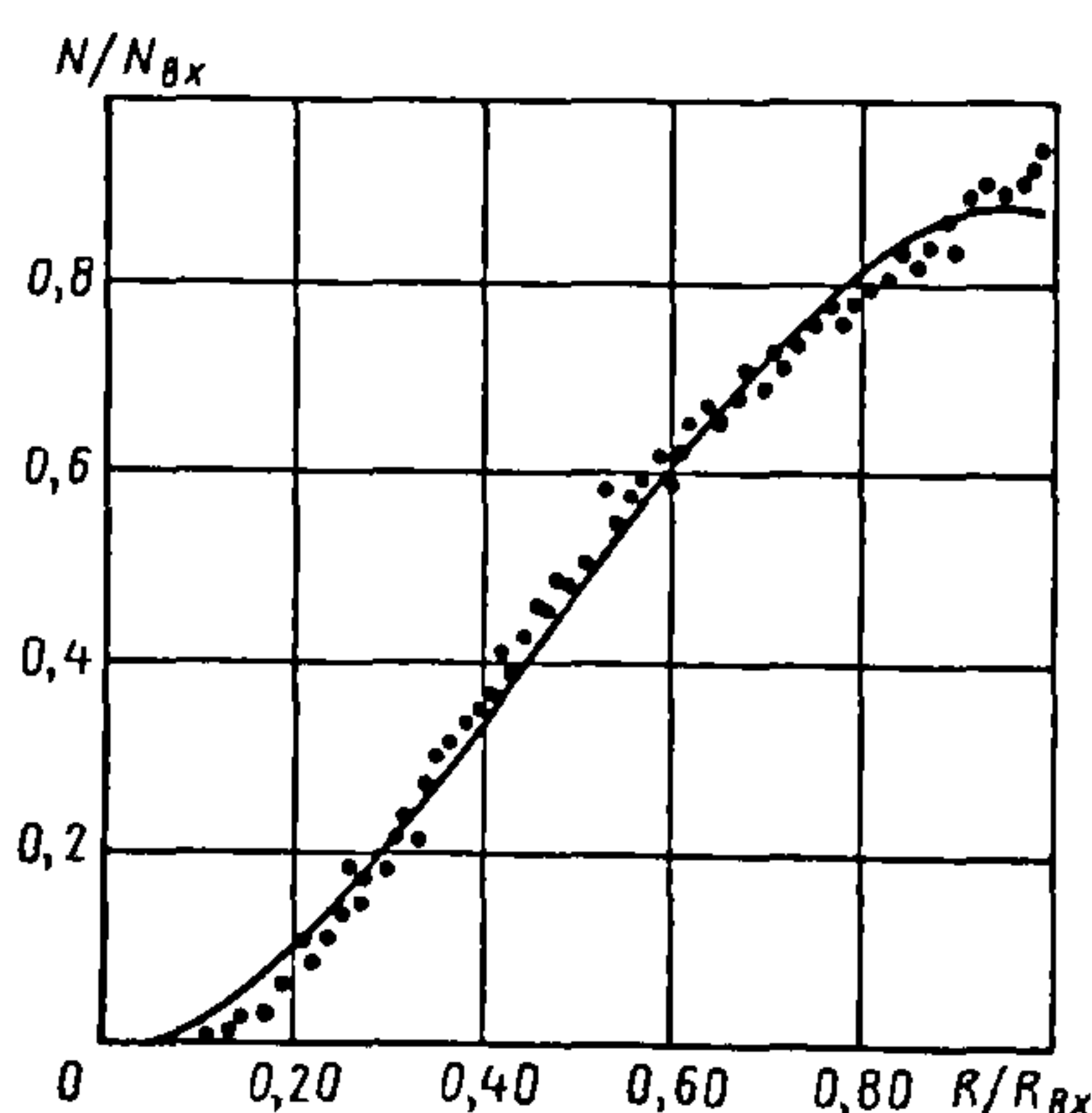


Рис. 11.18. Распределение частиц паров рабочей жидкости по радиусу на входе в ловушку:

$N / N_{вх}$  – отношение числа молекул пара, попадающих на элемент площади, к общему числу молекул пара, попадающих на вход ловушки;  $R / R_{вх}$  – отношение рассматриваемого радиуса к радиусу входа в ловушку

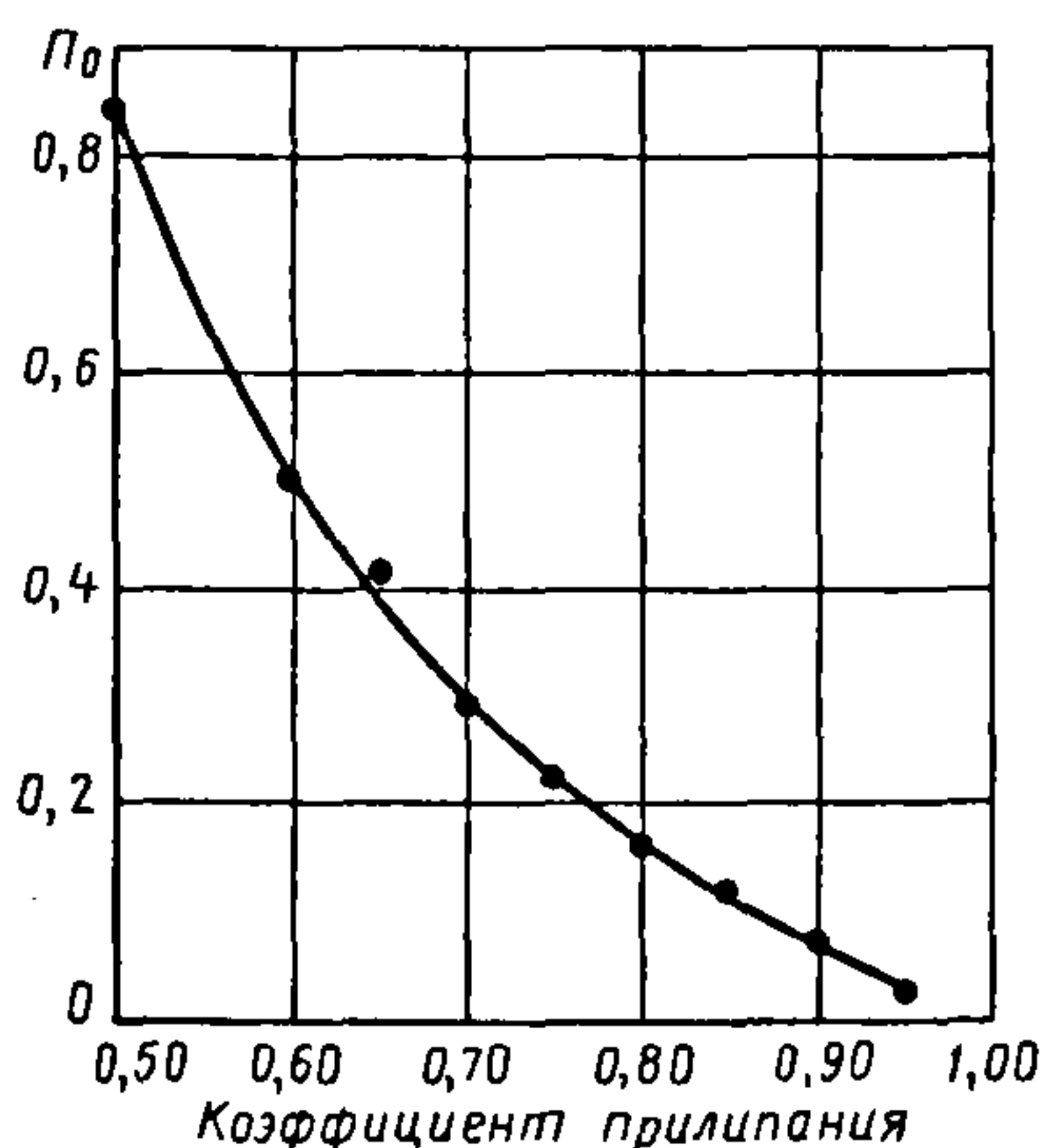


Рис. 11.19. Зависимость отражательной способности ловушки ЛП-800 от коэффициента прилипания



Как правило, температура охлаждаемой поверхности ниже температуры насыщения паров рабочей жидкости. Вакуумное масло ВМ-1 при давлении  $10^{-6}$  Па имеет температуру насыщения 293 К. Для того чтобы пары масла ВМ-1 с большой вероятностью оставались на охлаждаемых поверхностях при парциальном давлении  $> 10^{-6}$  Па, необходимо, чтобы температура поверхностей была  $< 293$  К.

## 11.4. СЕЛЕКТИВНАЯ ОТКАЧКА СМЕСЕЙ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

### 11.4.1. Изменение температуры рабочих поверхностей

Основным способом повышения эффективности охлаждаемых высоковакуумных ловушек является понижение температуры ее рабочих поверхностей, влекущее за собой уменьшение потока рабочей жидкости, попадающего в откачиваемый объем через ловушку. При этом понижение температуры ловушки, как правило, не приводит к заметному изменению проводимости ловушки.

В зависимости от рабочей жидкости диффузионного насоса незначительное понижение температуры рабочих поверхностей ловушки может уменьшить обратный поток рабочей жидкости на несколько порядков. Причем понижение температуры до такого уровня не приведет к су-

щественному увеличению теплопритоков к охлаждаемым поверхностям ловушки.

На рис. 11.20 показаны теплопритоки для температур 270 и 250 К к ловушкам типа ЛП, производимым ОАО «Вакууммаш». Из диаграммы хорошо видно, что теплопритоки к ловушке при температуре 270 и 250 К отличаются незначительно.

### 11.4.2. Изменение геометрии рабочих поверхностей

Другой способ уменьшения обратного потока – это изменение геометрии рабочих поверхностей ловушки. Данный способ совершенствования ловушек более прост и дешев по сравнению с уменьшением температуры. Однако изменение геометрии рабочих поверхностей ловушки приводит, в свою очередь, к изменению проводимости, и возникает необходимость поиска компромиссного варианта.

Моделирование геометрии элементов проточной части высоковакуумной ловушки осуществлялось по критериям максимально возможной проводимости при заданных значениях величины обратного потока паров рабочей жидкости.

В качестве базовой была принята шевронная ловушка, изображенная на рис. 11.21. Компьютерное моделирование выполнялось изменением геометрии ловушки, в том числе углов наклона колец  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  и, соответственно, их высоты  $L_1$  и  $L_2$  и шага  $s$ .

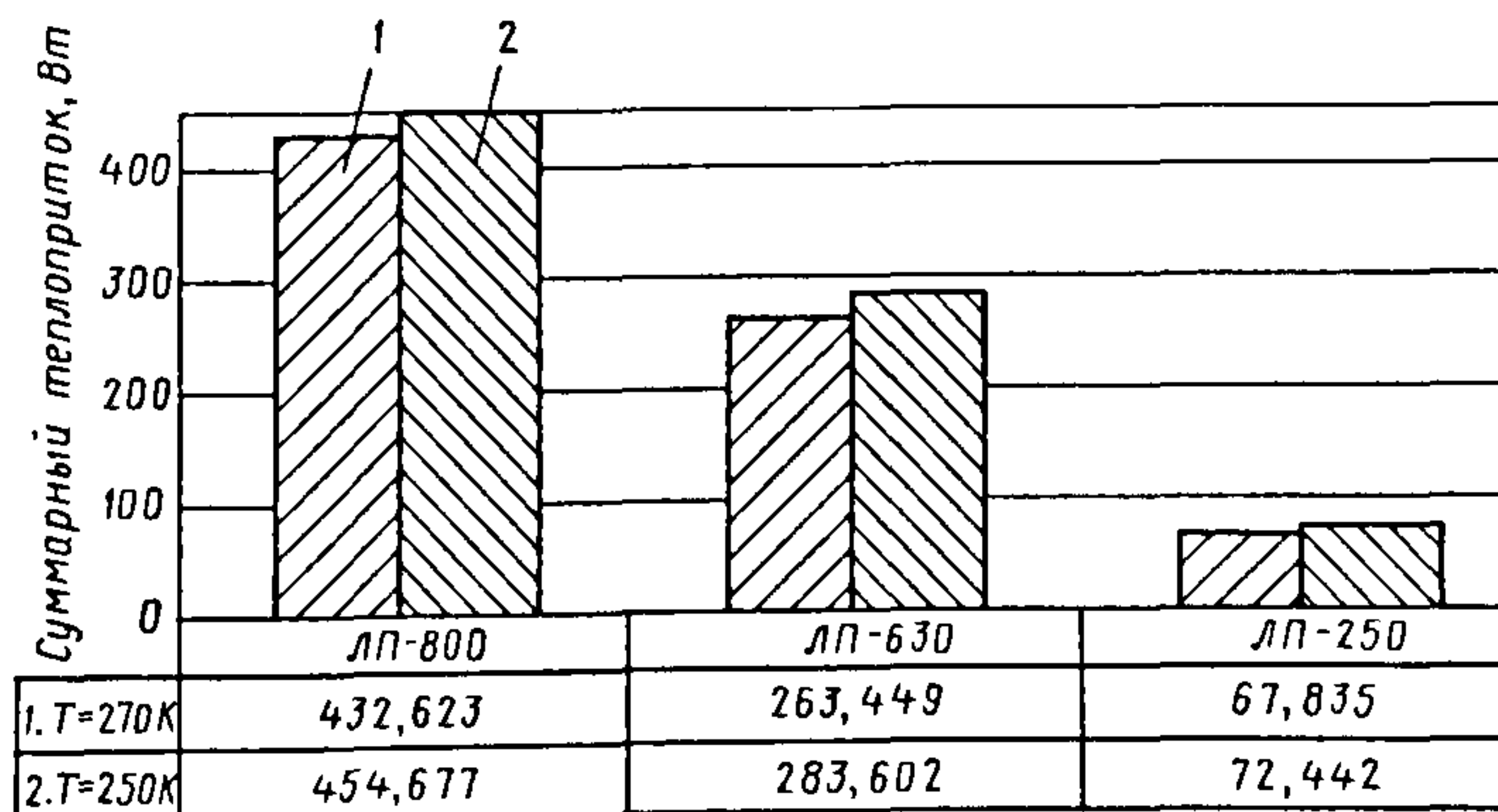


Рис. 11.20. Теплопритоки к ловушкам типа ЛП разного диаметра

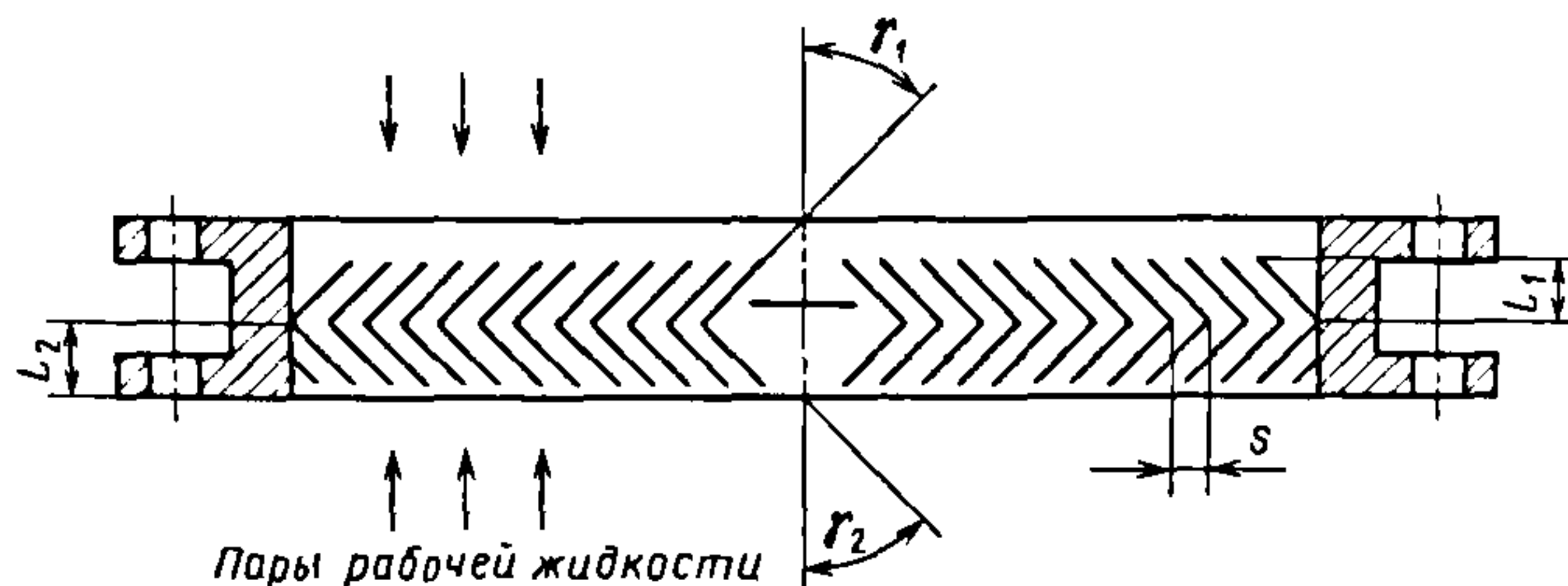


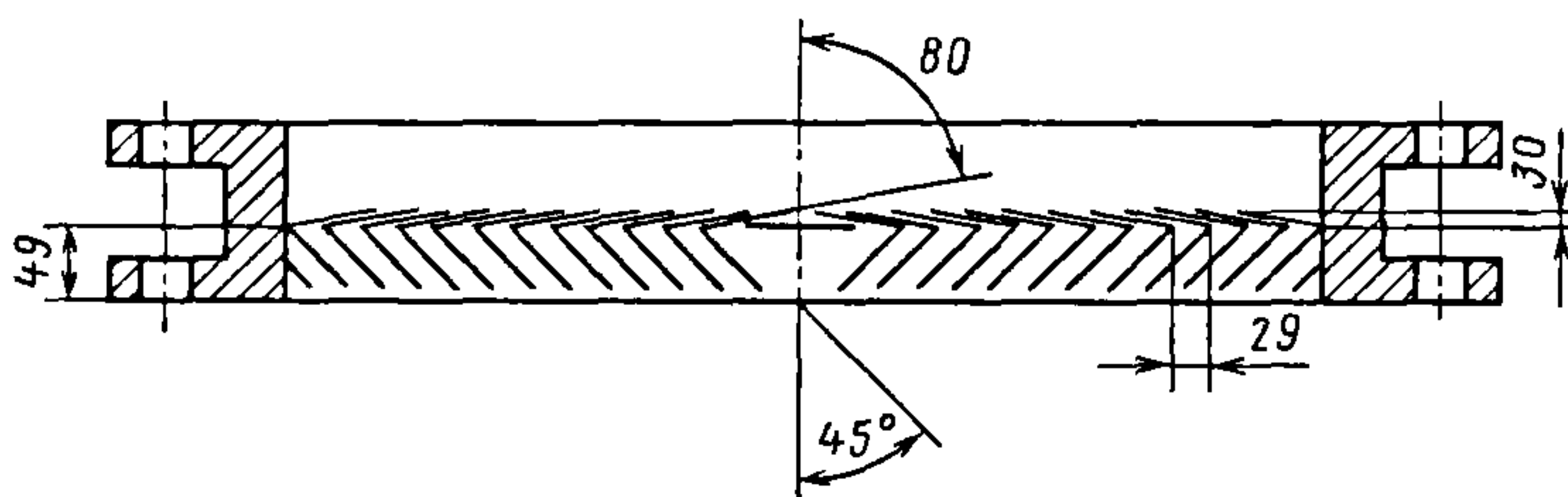
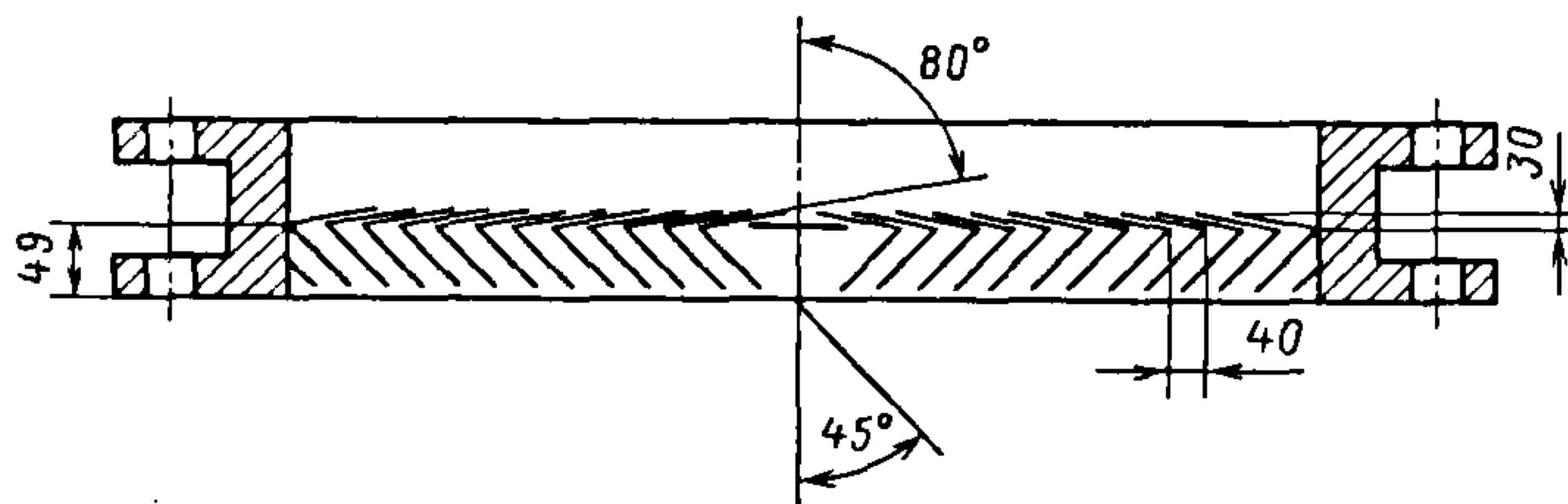
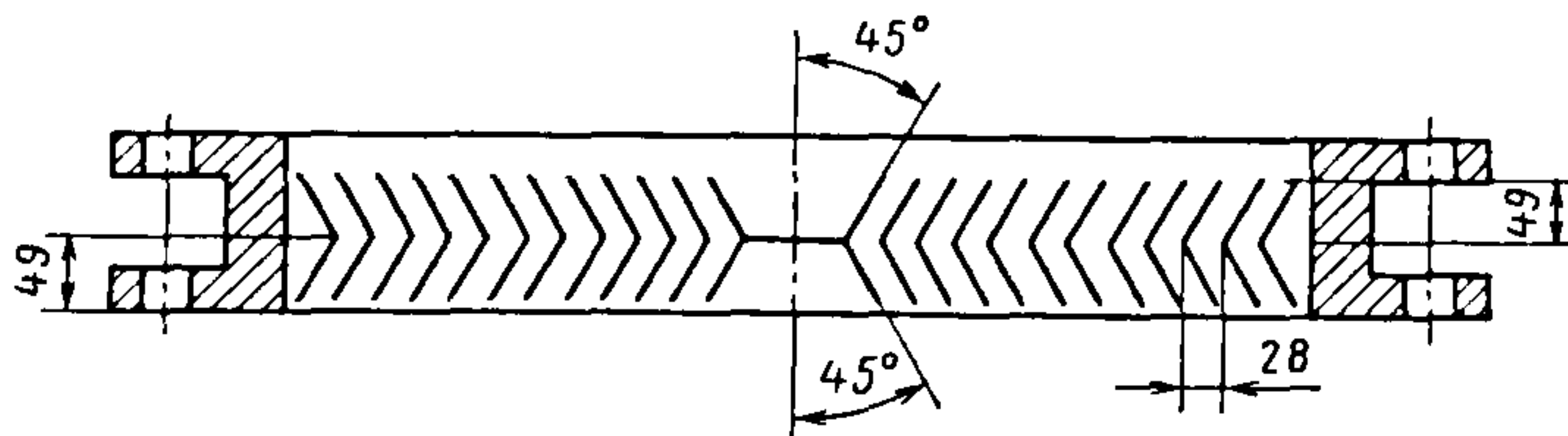
Рис. 11.21. Рабочая поверхность ловушки ЛП-800

Изначально ловушка ЛП-800 имеет углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , равные  $45^\circ$ , высоту колец  $L_1$  и  $L_2$ , равную 49 мм, и шаг между кольцами 29 мм.

Были рассчитаны различные варианты рабочих поверхностей ловушки при неизменных габаритных и присоединительных размерах. Наиболее удачные из рассчитанных конструкций представлены на рис. 11.22–11.25. Для рассмотренных вариантов ловушки приводятся расчетные значения ее проводимости, скорости дей-

ствия насоса с ловушкой и величина обратного потока, прошедшего через ловушку, при различных коэффициентах прилипания на рабочей поверхности. В табл. 11.7 и 11.8 сравниваются характеристики измененных ловушек с характеристиками базовой конструкции.

Таким образом, видно, что путем незначительного изменения геометрии ловушки можно существенно повысить ее эффективность.

Рис. 11.22. Рабочая поверхность ловушки при  $\gamma_1 = 80^\circ$  и  $L_1 = 10$  ммРис. 11.23. Рабочая поверхность ловушки при  $s = 40$  мм и  $\gamma_1 = 80^\circ$ Рис. 11.24. Рабочая поверхность ловушки при  $\gamma_1 = 45^\circ$



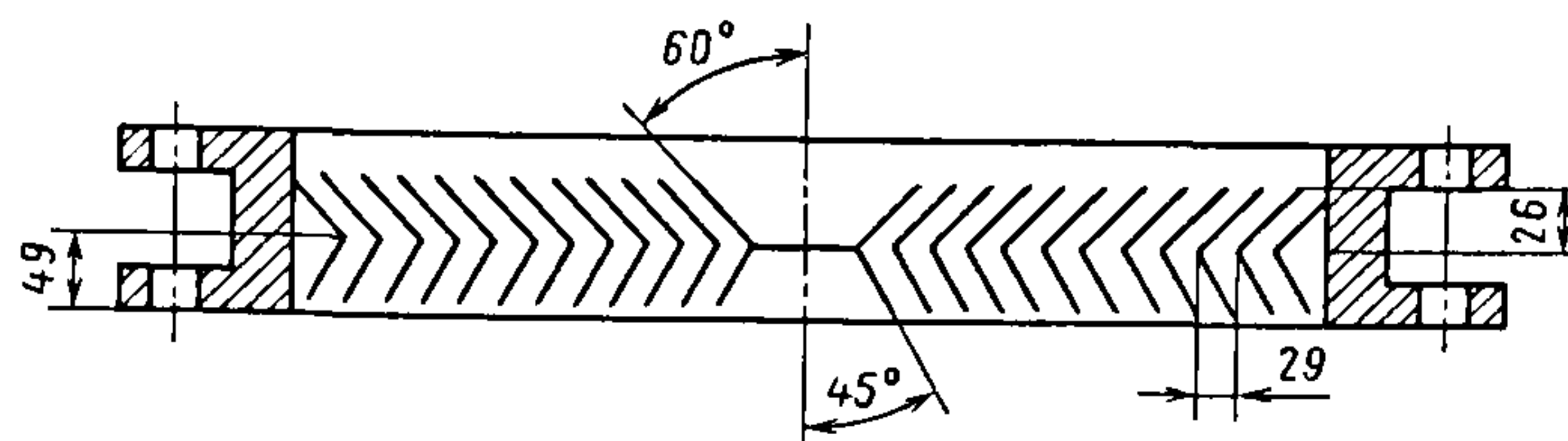


Рис. 11.25. Рабочая поверхность ловушки при  $\gamma_1 = 60^\circ$

### 11.7. Проводимость ловушки и быстрота действия насоса с ловушкой

Конструкция ловушки	Коэффициент Клаузинга	$U$ , л/с	$U$ , %	$S_0$ , л/с	$S_0$ , %
Базовая (см. рис. 11.21)	0,17	9900	100	7170	100
Измененная:					
см. рис. 11.22	0,072	4200	42	3620	50
см. рис. 11.23	0,084	4880	49	4100	57
см. рис. 11.24	0,238	13 800	140	9000	126
см. рис. 11.25	0,205	11 900	120	8160	114

### 11.8. Значения обратного потока паров рабочей жидкости $Q$ , мг/(ч·см<sup>2</sup>) и %

Конструкция ловушки	Коэффициент прилипания			
	0,9	0,8	0,7	0,6
Базовая (см. рис. 11.21)	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
	100			
Измененная				
см. рис. 11.22	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
	25	28	33	28
см. рис. 11.23	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
	25	32	35	36
см. рис. 11.24	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$
	155	125	116	110
см. рис. 11.25	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$
	55	54	60	

#### 11.4.3. Экспериментальное определение проводимости водоохлаждаемой ловушки

Был проведен эксперимент по определению проводимости ловушки. Суть эксперимента заключалась в нахождении быстроты действия насоса с ловушкой  $S_{н+л}$  и без нее  $S_n$ . Затем из основного уравнения вакуумной техники находили экспериментальное значение проводимости ловушки  $U_3$ :

$$U_3 = \frac{S_n S_{н+л}}{S_n - S_{н+л}}.$$

Измерение быстроты действия в отечественных и зарубежных стандартах на методы испытаний основано на установлении постоянного давления в области входного сечения насоса при создании определенного потока газа в стандартизованную камеру.

**Описание установки.** На рис. 11.26 показана принципиальная схема стенда, на котором проводилось экспериментальное определение проводимости ловушки. Данный стенд включает в себя следующие сборочные единицы:

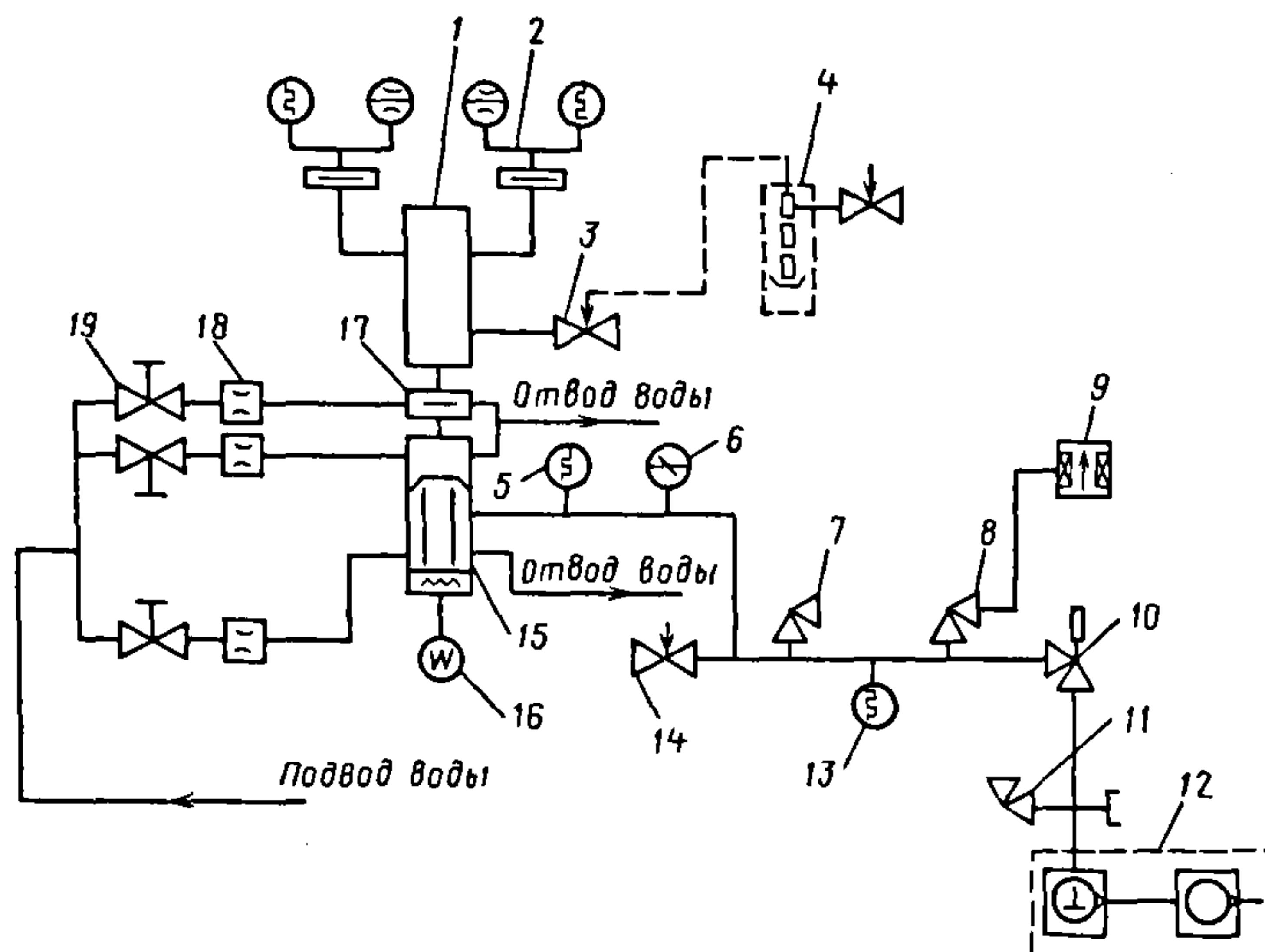


Рис. 11.26. Принципиальная схема стенда

- подставку;
- измерительный колпак;
- вакуумный агрегат АВР-50;
- вакуумную коммуникацию;
- водоохлаждаемую ловушку;
- систему охлаждения;
- систему управления и контроля.

Подставка служит для закрепления на стенде испытуемого насоса 15.

Измерительный колпак 1 служит для измерения быстроты действия испытуемого насоса 15 типа НВДМ-400 и имеет вакуумные входы для присоединения нагнетателя 3 и блоков преобразователей.

Вакуумный агрегат типа АВР-50 12 обеспечивает предварительную откачку вакуумной коммуникации стенда и испытуемого насоса и поддерживает необходимое давление на выходе из насоса.

Вакуумная коммуникация стенда состоит из гибких металлорукавов, а также включает в себя вакуумные клапаны КВЭ-63 10, КВР-25 7, 8 и 11 и клапаны нагнетатели КН-25-Б 3 и 14.

Водоохлаждаемая ловушка Ду-400 17 предназначена для защиты испытательной камеры от паров масла диффузионного насоса и возврата части масла обратно в насос.

Система охлаждения стенда служит для охлаждения измерительного колпака, измерительного фланца, испытуемого насоса и ловушки. Состоит система охлаждения из коллектора и дюритовых шлангов. Расход воды измеряется ротаметрами 18. Прекращение подачи воды осуществляется запорными вентилями 19.

Система управления и контроля стенда включает электрическую часть со щитом управления, измерительный комплект 16, блоки манометрических преобразователей 2, преобразователи ПМТ-2 5 и 13, преобразователь ПДЦ-1-10А поз. 6, вакуумметры ВИТ-3, ВТ-3 и ВД-1, а также бюретку 4 для измерения быстроты действия насоса. Для проверки герметичности вакуумной коммуникации стенда через клапан 8 можно подключать течеискатель 9.

В качестве испытуемой, как было сказано ранее, взята ловушка Ду-400 производства Казанского ОАО «Вакууммаш» (рис. 11.27).

**Определение быстроты действия насоса.** Первоначально включали вакуумный агрегат АВР-50 для предварительного разрежения системы. При достижении давления 1,33 Па выполняли пуск диффузионного насоса НВДМ-400 и подачу ох-



лаждающей воды в насос и ловушку (при ее установке).

Насос НВДМ-400 имеет пять тепловых электрических нагревателей мощностью 5 кВт каждый. Рабочей жидкостью диффузионного насоса является опытное вазелиновое масло ВМ-1с в количестве 1,4 л. Атмосферное давление во время эксперимента равнялось 0,1 МПа.

С момента пуска диффузионного насоса (1,33 Па) давление внутри испытательной камеры измеряли с помощью вакуумметра ВИТ-3 [преобразователя ПМТ-2 (ЮХЗ.390.000 ТУ)]. При достижении давления 1,33 Па измерение проводили преобразователем ПМИ-2 (ЮХЗ.392.000 ТУ).

Через 2 ч с момента пуска диффузионного насоса давление в испытательной камере достигало  $6 \cdot 10^{-4}$  Па, после чего измеряли необходимые величины.

Для определения быстроты действия насоса надо знать поток  $Q$ , проходящий через исследуемый канал, и давление на

входе в насос. Поток  $Q$  измеряли с помощью спиртовой бюретки и секундомера как отношение коэффициента бюретки  $K_6$  на время  $\tau$  прохождения столбика спирта между делениями бюретки. Давление  $p_{вх}$  в испытательной камере измеряли преобразователем ПМИ-2.

Таким образом, быстроту действия насоса находили по формуле

$$S = \frac{K_6}{\tau p_{вх}}. \quad (11.5)$$

Коэффициент бюретки является табличной величиной и зависит только от атмосферного давления.

**Результаты эксперимента.** Ниже приводятся таблицы с результатами эксперимента по определению быстроты действия насоса с ловушкой и без нее.

Коэффициент бюретки в табл. 11.9 брался для давления 0,1 МПа. Расход охлаждающей воды в насос равнялся 230 л/ч.

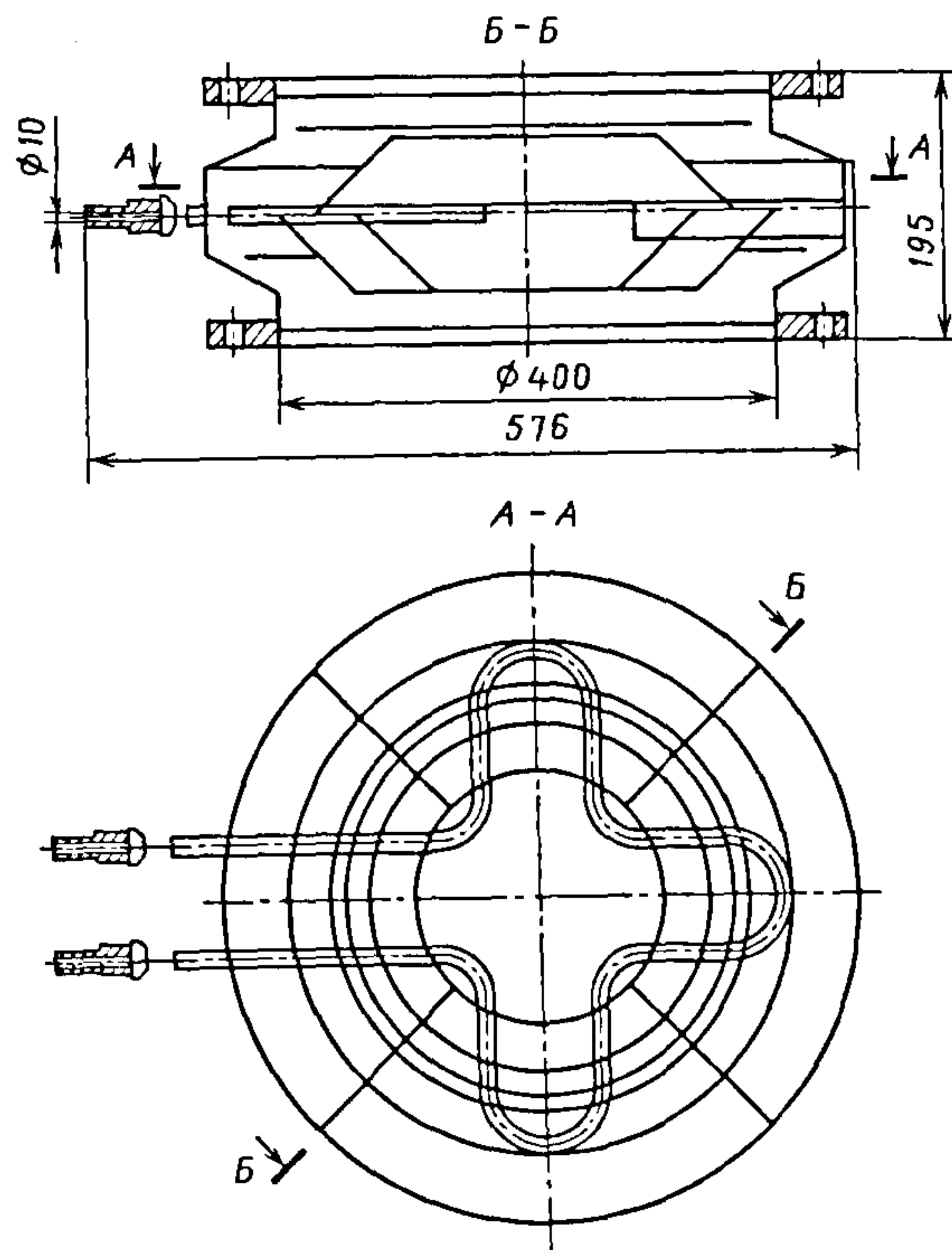


Рис. 11.27. Ловушка Ду-400

## 11.9. Насос без ловушки

$K_6$ , л·мм рт.ст	$p_{вх}$ , мм рт.ст	Опыт 1		Опыт 2	
		$\tau$ , с	$S$ , л/с	$\tau$ , с	$S$ , л/с
2,248	$4,52 \cdot 10^{-6}$	113	4397,39	113	4397,39
	$6,26 \cdot 10^{-6}$	78,7	4560,05	70	5126,80
	$7,48 \cdot 10^{-6}$	63	4769,12	53,5	5615,97
	$1,04 \cdot 10^{-5}$	37	5819,61	30	7177,52
	$2,78 \cdot 10^{-5}$	14	5767,65	12,6	6408,50
	$4,52 \cdot 10^{-5}$	9,5	5230,58	9	5521,17
	$6,26 \cdot 10^{-5}$	7	5126,80	6	5981,27
	$7,47 \cdot 10^{-5}$	5,6	5365,26	5	6009,09
	$1,22 \cdot 10^{-4}$	3	6152,16	3	6152,16
6,747	$1,22 \cdot 10^{-4}$	10	5539,41	9,8	5652,46
	$2,78 \cdot 10^{-4}$	6	4039,15	6	4039,15
	$4,52 \cdot 10^{-4}$	2,8	5326,35	2,8	5326,35
	$7,48 \cdot 10^{-4}$	1,6	5636,03	1,6	5636,03
Среднее значение $S_n$ , л/с			5400		

Коэффициент бюретки в табл. 11.10 взят при давлении 10 Па. Эксперимент по определению быстроты действия насоса с ловушкой проводился для случаев с охлаждением ловушки и без охлаждения. Расход охлаждающей воды в насос равен 230 л/ч, в ловушку 160 л/ч.

В результате эксперимента были получены графики зависимости быстроты действия насоса от давления и средние

значения быстроты действия диффузионного насоса НВДМ-400 с ловушкой Ду-400 и без нее в интервале давлений  $6 \cdot 10^{-4} \dots 9,9 \cdot 10^{-2}$  Па. Зная эти величины, из основного уравнения вакуумной техники определяли проводимость ловушки Ду-400. Проводимость ловушки получилась равной 6200 л/с. Графическое представление результатов эксперимента показано на рис. 11.28.

## 11.10. Насос с ловушкой

$K_6$ , л·мм рт.ст	$p_{вх}$ , мм рт.ст	Расход воды 0 л/ч		Расход воды 160 л/ч	
		$\tau$ , с	$S$ , л/с	$\tau$ , с	$S$ , л/с
2,2364	$4,52 \cdot 10^{-6}$	237	2085,83	232,4	2127,11
	$7,48 \cdot 10^{-6}$	126,6	2361,01	113,2	2640,50
	$1,04 \cdot 10^{-5}$	95,2	2250,15	81,3	2634,87
	$2,78 \cdot 10^{-5}$	28,5	2818,61	24,2	3319,44
	$4,52 \cdot 10^{-5}$	19	2601,80	16	3089,63
	$6,26 \cdot 10^{-5}$	14,2	2514,26	12	2975,20
	$7,47 \cdot 10^{-5}$	12	2490,87	10,1	2959,45
	$1,22 \cdot 10^{-4}$	4,8	3825,26	4,8	3825,26
6,7118	$1,22 \cdot 10^{-4}$	15	3673,67	14,5	3800,35
	$2,78 \cdot 10^{-4}$	8,5	2836,29	8,5	2836,29
	$4,52 \cdot 10^{-4}$	4,7	3156,59	4,7	3156,59
	$7,48 \cdot 10^{-4}$	3,2	2803,31	3	2990,20
Среднее значение $S_n$ , л/с			2800		3000
Среднее значение (с водой + без воды) $S_n$ , л/с			2900		



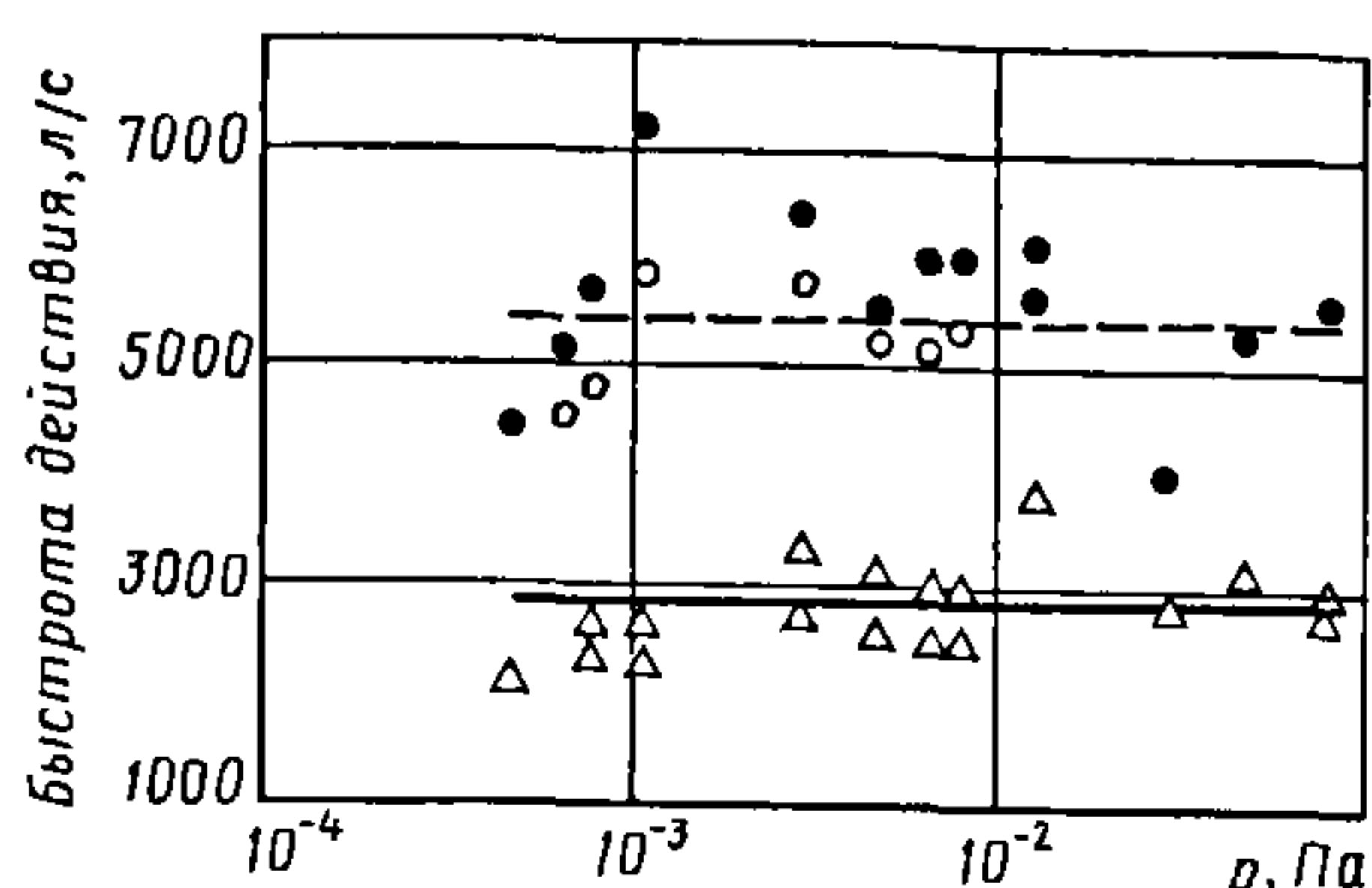


Рис. 11.28. Зависимость быстроты действия насоса НВДМ-400 с ловушкой Ду-400 и без нее:

○ и ● – насос без ловушки (опыты 1 и 2 соответственно); △ и ▲ – насос с ловушкой ( $S = 0$  и  $160$  л/с соответственно); - - и — — среднее значение без ловушки и с ловушкой соответственно

**Расчетное определение проводимости ловушки Ду-400.** Для анализа характеристик различного вакуумного оборудования используются стандартные экспериментальные методы, определяемые регламентом. Данные методики предполагают, что поток на входе в анализируемую вакуумную систему формируется специальной испытательной камерой со стандартными параметрами. Однако условия измерений не соответствуют идеальным условиям на входе в систему, используемым при расчетах, в частности присоединению к бесконечно большому объему, что может вносить погрешность в результаты этих измерений.

Для рассматриваемой ловушки Ду-400 был проведен расчетный анализ влия-

ния конфигурации одноколпаковой испытательной камеры, применяемой для экспериментальных исследований, на рабочие характеристики данной ловушки. На рис. 11.29 и 11.30 представлены результаты анализа структуры распределения относительной концентрации частиц на входе в ловушку и на выходе из нее для случаев присоединения к большому объему и одноколпаковой испытательной камере соответственно.

В ходе присоединения ловушки к испытательной камере проявляется незначительная неоднородность плотности распределения частиц на входе, обусловленная отличными от принятых в большом объеме параметров разреженного газа. Снижение концентрации вблизи центра входного сечения обусловлено особенностями расчетной модели. На выходе из ловушки характер распределения относительной концентрации для обоих случаев идентичен, поскольку в данном сечении структура молекулярного потока формируется уже конфигурацией ловушки, одинаковой в обоих случаях.

На рис. 11.31 и 11.32 показаны индикатрисы рассеяния молекулярного потока на входе в ловушку при присоединении к испытательной камере и большому объему соответственно. Видно, что в случае большого объема характер углового распределения близок к окружности, что определяется условиями диффузного закона.

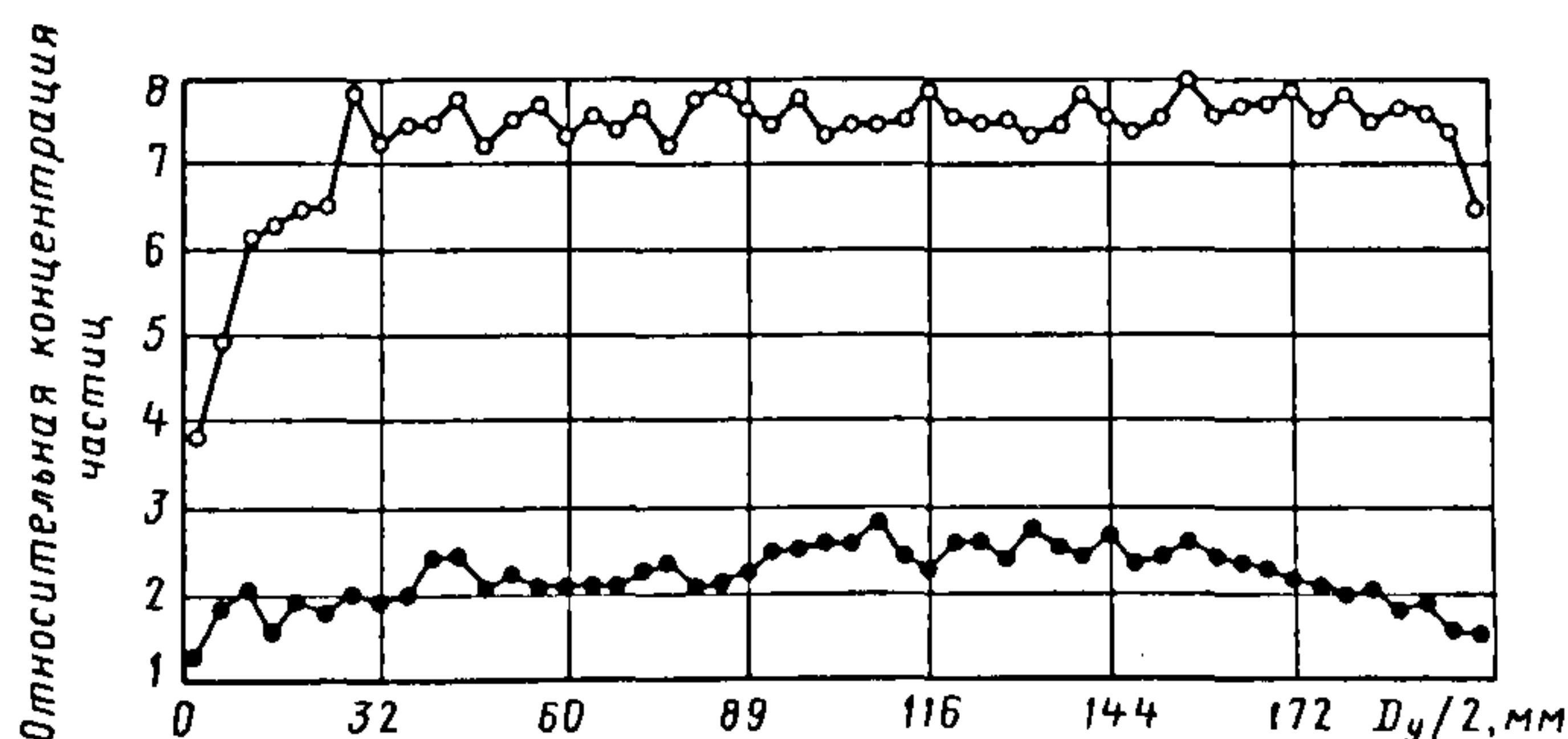


Рис. 11.29. Распределение относительной концентрации частиц при присоединении к большому объему:

○ и ● – на входе и выходе соответственно

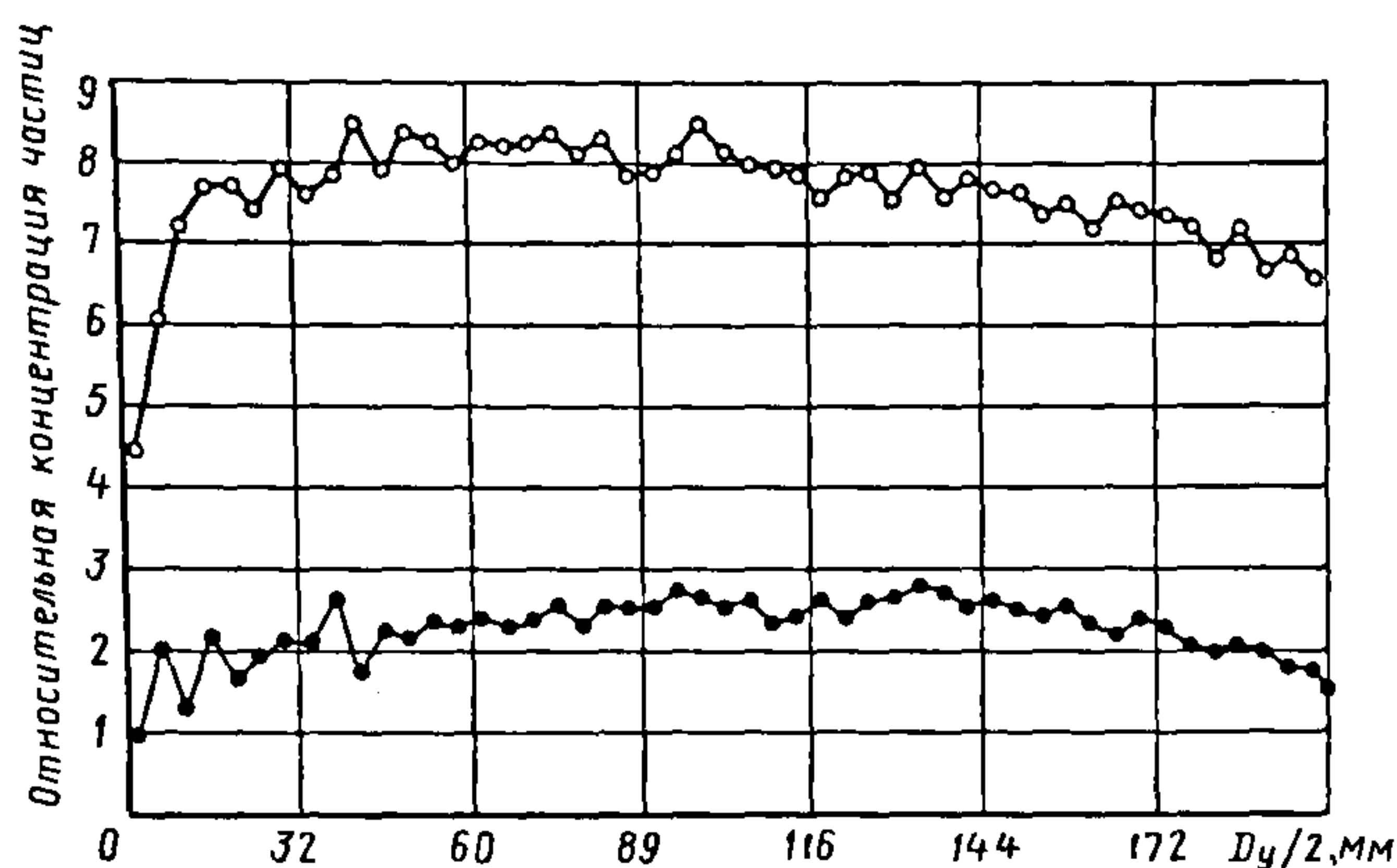


Рис. 11.30. Распределение относительной концентрации частиц при присоединении к одноколпаковой камере

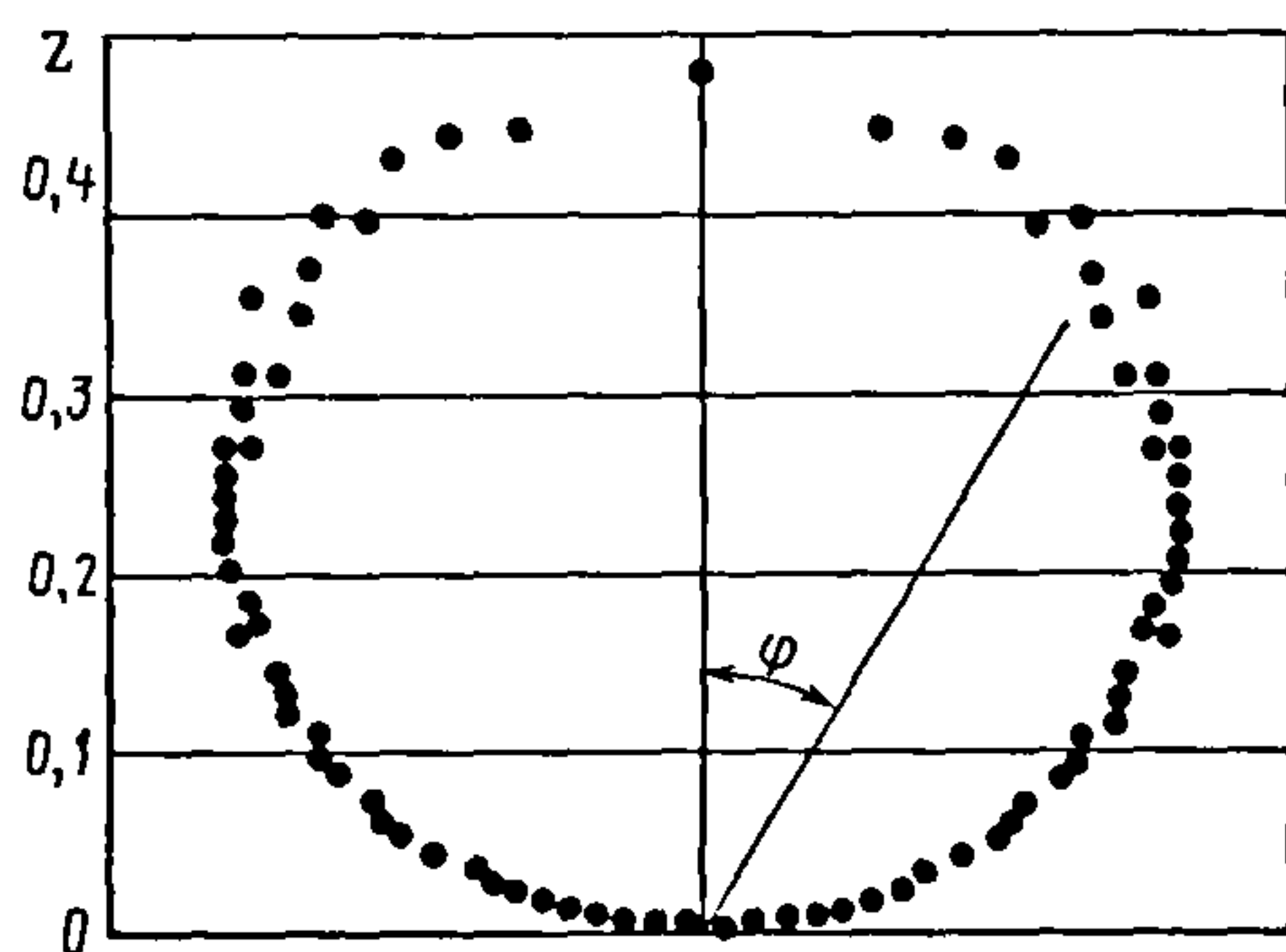


Рис. 11.31. Индикатриса рассеяния молекулярного потока на входе в ловушку из большого объема:

$\varphi$  – угол между нормалью и направлением движения частицы;  $z$  – отношение числа частиц, движущихся в направлении  $\varphi$ , к общему числу частиц

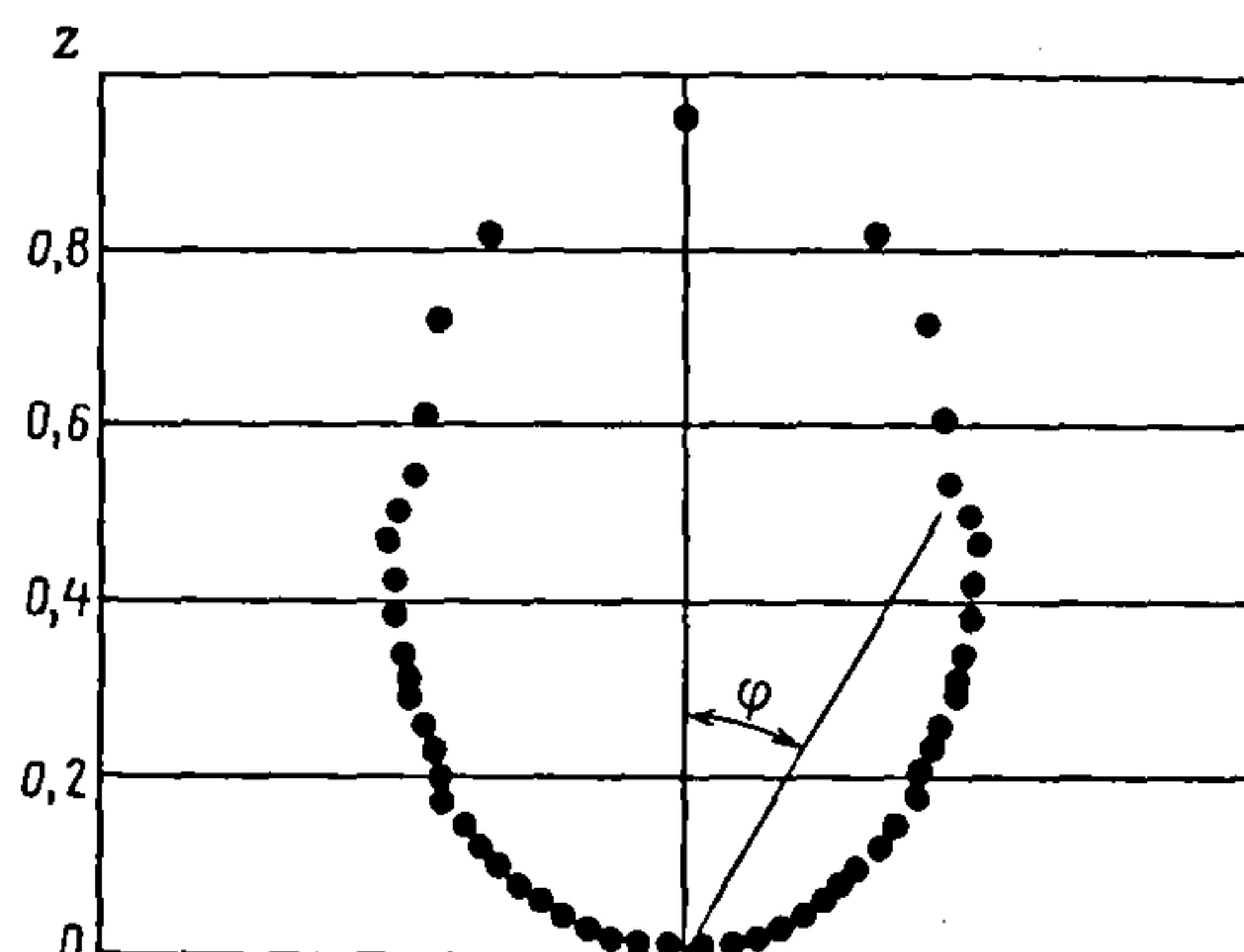


Рис. 11.32. Индикатриса рассеяния на входе в ловушку из одноколпаковой камеры

В случае присоединения к испытательной камере характер распределения изменился в сторону лепесткового закона. Это обусловлено влиянием конструкции испытательной камеры на структуру молекулярного потока. На выходе же (рис. 11.33 и 11.34) индикатрисы рассеяния определяются измененной конфигурацией ловушки характером молекулярного потока и близки в обоих случаях. Из сказанного можно сделать вывод о том, что, с одной стороны, в испытательной камере формируются характеристики газовой среды, отличные от идеальных в большом объеме, а с другой – конфигура-

ция ловушки такова, что именно она определяет структуру потока на выходе. Этот вывод подтверждается еще и тем, что результаты расчета значения проводимости ловушки лишь незначительно разнятся в случаях присоединения к испытательной камере и большому объему. Коэффициенты Клаузинга и проводимость ловушки равны 0,307 (4500 л/с) и 0,302 (4400 л/с) соответственно.

В настоящее время создано много разнообразных высоковакуумных ловушек для диффузионных насосов, позволяющих существенно уменьшить обратный поток паров рабочих жидкостей в откачиваемый объем.



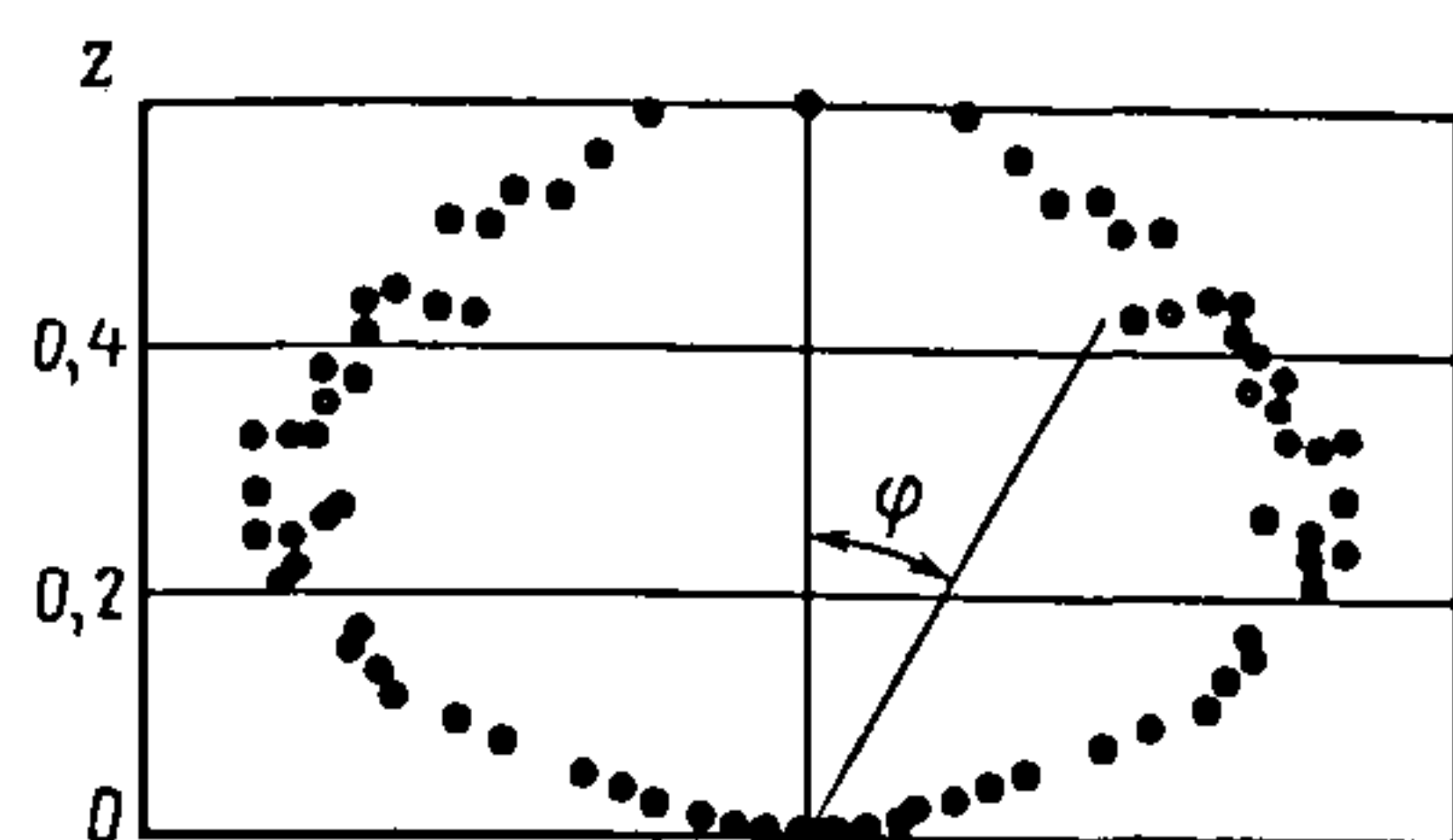


Рис. 11.33. Индикатриса рассеяния на выходе из ловушки при присоединении к большому объему

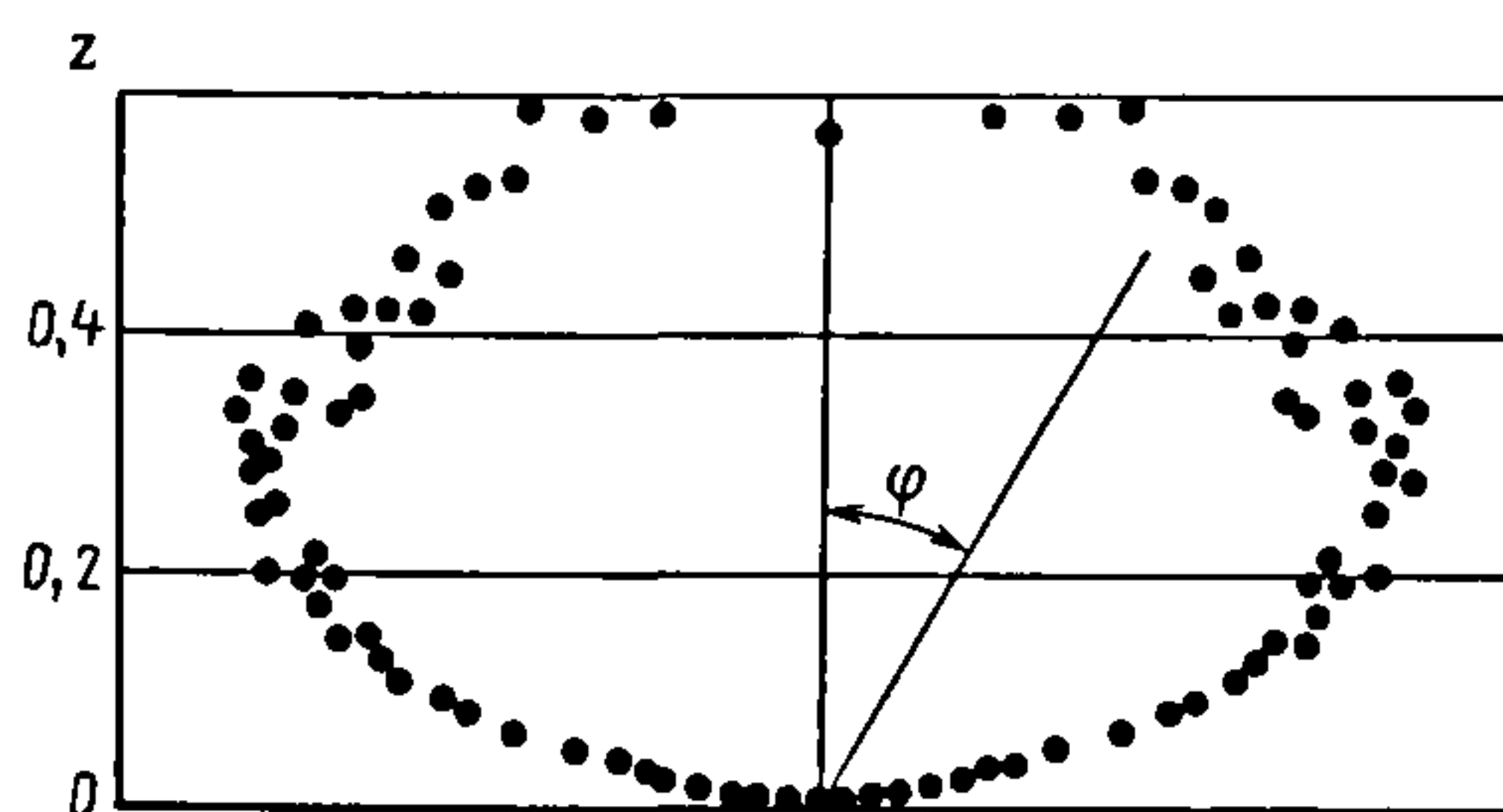


Рис. 11.34. Индикатриса рассеяния на выходе из ловушки при присоединении к одноколпаковой камере

Была подсчитана проводимость ловушки Ду-400 для случаев ее присоединения к большому объему и к испытательной камере. Расчет показал, что при этом наличие испытательной камеры на значение проводимости ловушки практически не влияет. Также было проанализировано влияния ловушки и испытательной камеры на структуру относительной концентрации и индикатрисы рассеяния частиц на входе в ловушку и выходе из нее.

Проведенный эксперимент по определению проводимости ловушки Ду-400

показал, что расчетное значение проводимости (4500 л/с) отличается от опытного (6200 л/с) на ~40 %. Однако такое различие между экспериментом и расчетом можно объяснить несколькими причинами:

- давление, измеренное вакуумметром в испытательной камере, отличается от давления перед входом в насос;
- не учитывается пере конденсация паров масла на пластинах ловушки;
- несовершенство применение основного уравнения вакуумной техники.

## Глава 12

### ГЕТТЕРНЫЕ И ГЕТТЕРНО-ИОННЫЕ НАСОСЫ

---

#### 12.1. ТИПЫ И ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Геттерные и геттерно-ионные насосы по разнообразию типов и конструктивно-физических модификаций составляют наиболее многочисленный класс вакуумных насосов поверхностного действия. Им посвящено более 900 патентов, оригинальных статей и обстоятельных обзоров, несколько книг, монография [55]. В отечественной литературе для их обозначения часто применяют термины «электро-физические насосы» (ЭФН) либо «электро-физические средства откачки» (ЭФСО).

В последние десятилетия наибольшее число изобретений и публикаций в этой области ориентировано на результаты исследований и технологических разработок нераспыляемых геттеров.

Физико-химическую основу геттерных и геттерно-ионных насосов составляет связывание молекул активных газов пленкой или слоем геттера. Атомы инертных газов поглощаются в результате ионизации, ускорения и имплантации в граничные поверхности с последующим «замуровыванием» напыляемыми геттерными частицами.

Для откачки активных и инертных газов в геттерных и геттерно-ионных насосах используют различные электрофи-

зические эффекты. К числу важнейших из них относятся:

- резистивный нагрев геттера [*рабочего тела* (РТ) насоса] для его сублимации или активации (*испарительные геттерные и геттерно-ионные насосы; насосы на основе нераспыляемых геттеров; термические атомизаторы молекул в каталитических насосах; мембранные насосы на базе металлических фольг с асимметричной проницаемостью по откачиваемому газу*);
- испарение (сублимация) РТ при бомбардировке электронными и ионными пучками, индукционном нагреве, лазерном облучении (*геттерно-ионные насосы, ионно-сублимационные насосы; орбитроны; лучевые насосы*);
- распыление РТ при ионной бомбардировке (*магнитные электроразрядные насосы<sup>1</sup>; магнетронные насосы; инверсно-магнетронные насосы*);
- испарение геттерного вещества при возбуждении электрического разряда в парах РТ или пробое разрядного промежутка (*испарительные насосы с плазменными источниками геттерных пленок<sup>2</sup>; искровые насосы*);

---

<sup>1</sup> Используют также термины «разрядные насосы», «магниторазрядные насосы».

<sup>2</sup> Используют также термины «плазменные насосы», «электродуговые насосы».



- ионизация газовых молекул, ускорение, направленный перенос и имплантация образующихся ионов в пленку геттера при поддержании электрического разряда в откачиваемом газе (геттерно-ионные насосы, магниторазрядные насосы);

- ионизация газовых молекул, ускорение, направленный перенос и имплантация образующихся ионов в твердую либо жидкую пленку геттера или мембрану с помощью электронных и фотонных пучков или высокочастотной мощности (ионные насосы, имплантационные насосы, мембранные насосы).

Как видно, для всех ЭФСО принципиально значимы следующие факторы:

- процессы, происходящие с РТ (веществом) насоса (активация, испарение, сублимация, распыление);

- физико-химические процессы с участием молекул откачиваемого газа

(адсорбция, хемосорбция, диффузионный перенос, окисление, ионизация, имплантация);

- характеристики электрических и магнитных полей, управляющих этими процессами.

Данные функциональные признаки в совокупности с конструктивными особенностями составляют основу классификации ЭФСО (табл. 12.1).

В настоящее время в промышленных масштабах выпускаются геттерные и геттерно-ионные насосы следующих типов:

- насосы на базе нераспыляемых геттеров с термической активацией, осуществляемой обычно пропусканием электрического тока по металлической подложке, на которую нанесен геттерный слой;

- испарительные насосы с сублимацией твердофазного геттера, выполняемой резистивным прямым или косвенным нагревом<sup>1</sup>;

### 12.1. Классификационные признаки ЭФСО

Преобладающие физико-химические процессы		Управляющие поля	Конструктивные и эксплуатационные особенности
в РТ насоса	происходящие с молекулами откачиваемого газа		
Термическая активация; испарение (сублимация) с образованием геттерной пленки: твердофазного РТ; жидкофазного РТ; рабочего тела с неоднородным фазовым состоянием; ионное распыление с образованием геттерной пленки; стимулируемая перестройка кристаллической решетки РТ	Сорбция: бездиссоциативная; диссоциативная; с химическим превращением; с последующей диффузией; диффузионный перенос через РТ: без химических превращений; с химическими превращениями; имплантация: в твердое РТ; в жидкое РТ; диссоциация; ионизация; направленный перенос	Отсутствуют; электростатическое; высокочастотное; магнитное; комбинированные	Исполнения: в виде автономного элемента вакуумной системы; модульное; встроенные локализованные; встроенные распределенные; работающие в магнитном поле откачиваемой установки; охлаждение: естественное; принудительное; хладагент: вода; жидкий азот

<sup>1</sup>Используют также термин «сублимационные насосы».

- геттерные средства откачки с испарением геттера из жидкой фазы, осуществляемым сфокусированным электронным пучком с электростатическим либо магнитным управлением (подобные устройства обычно представляют собой автономные испарители, встраиваемые непосредственно в откачиваемые камеры);

- плазменные насосы с испарением и частичной ионизацией атомов РТ, достигаемыми при возбуждении дугового разряда в парах геттера;

- магнитные электроразрядные насосы с ионным распылением геттера при возбуждении газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях;

- комбинированные насосы, представляющие собой конструктивно совмещенные в едином корпусе откачные блоки различных типов, например магниторазрядные и сублимационные.

Как и остальные насосы поверхностного действия, ЭФСО не нуждаются в постоянной форвакуумной откачке; они безынерционны.

Свойства различных геттеров характеризуются *теплотой сорбции*  $Q$  (М, Ме) газа М на геттере Ме; *начальным* и *текущим* значениями *коэффициента прилипания*  $\beta_0$  и  $\beta$ , т.е. коэффициентами прилипания при малой и произвольной степенях заполнения поверхности молекулами откачиваемого газа, *удельной быстротой действия*  $S_0$ ,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . При этом

$$S_0 = \beta_0 V_0, \quad (12.1)$$

где  $V_0 = 36,38(T/M)^{0.5} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  — объем газа с молекулярной массой  $M$ , а.е.м., падающего за 1 с на 1  $\text{м}^2$  поверхности в равновесных условиях при температуре  $T$ , К.

Для обобщенного описания параметров насоса будем использовать безразмерный *коэффициент захвата*

$$\Gamma = S_{0н}/V_0 F_{0н}, \quad (12.2)$$

где  $S_{0н}$  — начальная быстрота действия насоса с площадью входного сечения  $F_{0н}$ ,  $\text{м}^2$ .

ЭФСО обладают существенной избирательностью по отношению к различным газам. Это их своеобразие определяется различием механизмов поглощения активных и инертных газов и специфическими сорбционными свойствами геттерных пленок (табл. 12.2; 12.3; рис. 12.1–12.3). Из-за малости теплоты сорбции ЭФН, за исключением магниторазрядных, практически неспособны откачивать гелий, другие инертные газы, метан. Сильно варьирует также их откачивающее действие по отношению к различным активным газам (табл. 12.4 и 12.5).

## 12.2. Теплота сорбции различных газов на свеженапыленной пленке вольфрама при 293 К

Газ	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
$Q$ , кДж/моль	192	418	355	811
Газ	CO <sub>2</sub>	Ar	Kr	Xe
$Q$ , кДж/моль	460	8,4	17	21

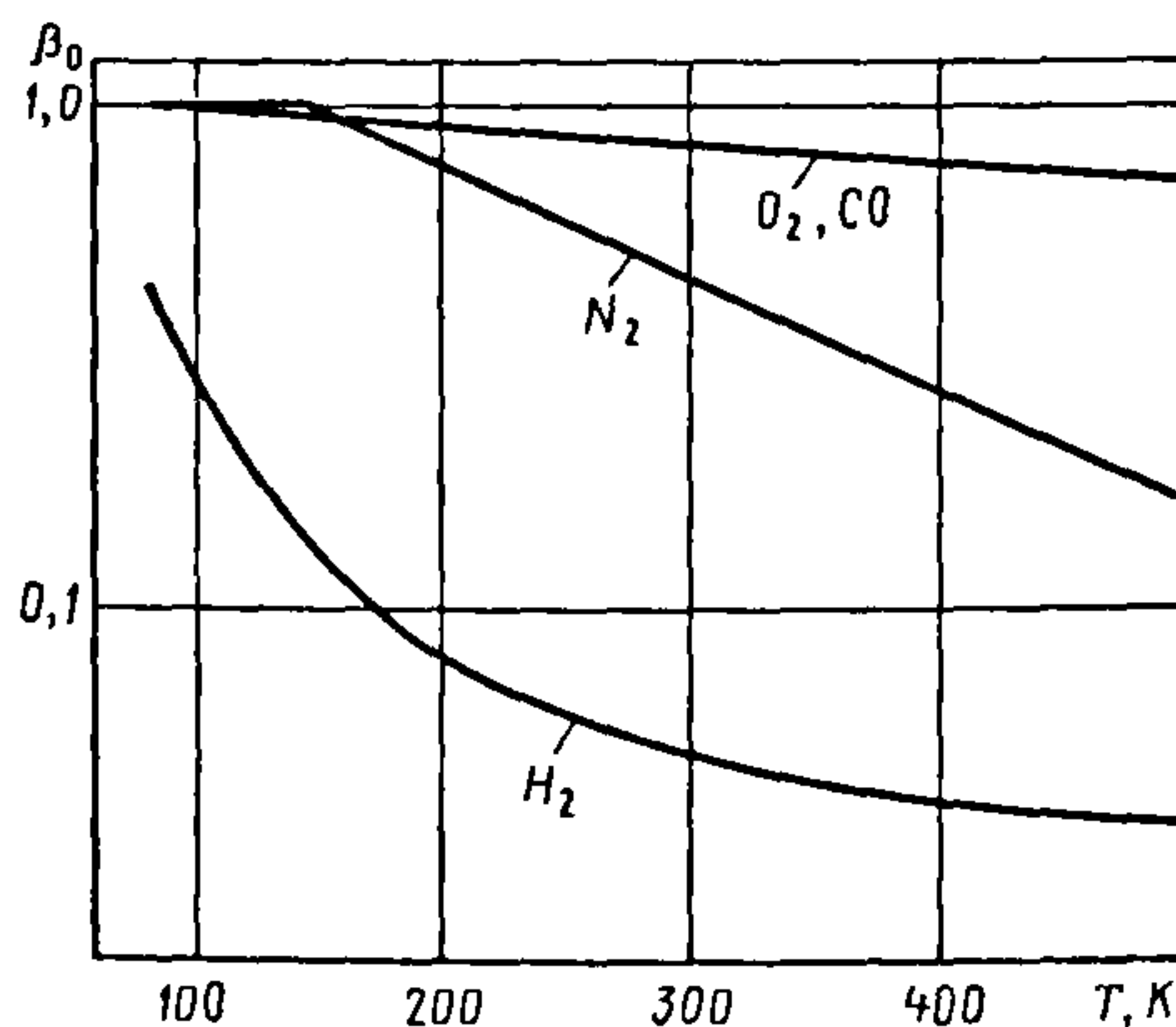


Рис. 12.1. Начальный коэффициент прилипания активных газов для титановой пленки как функция от ее температуры



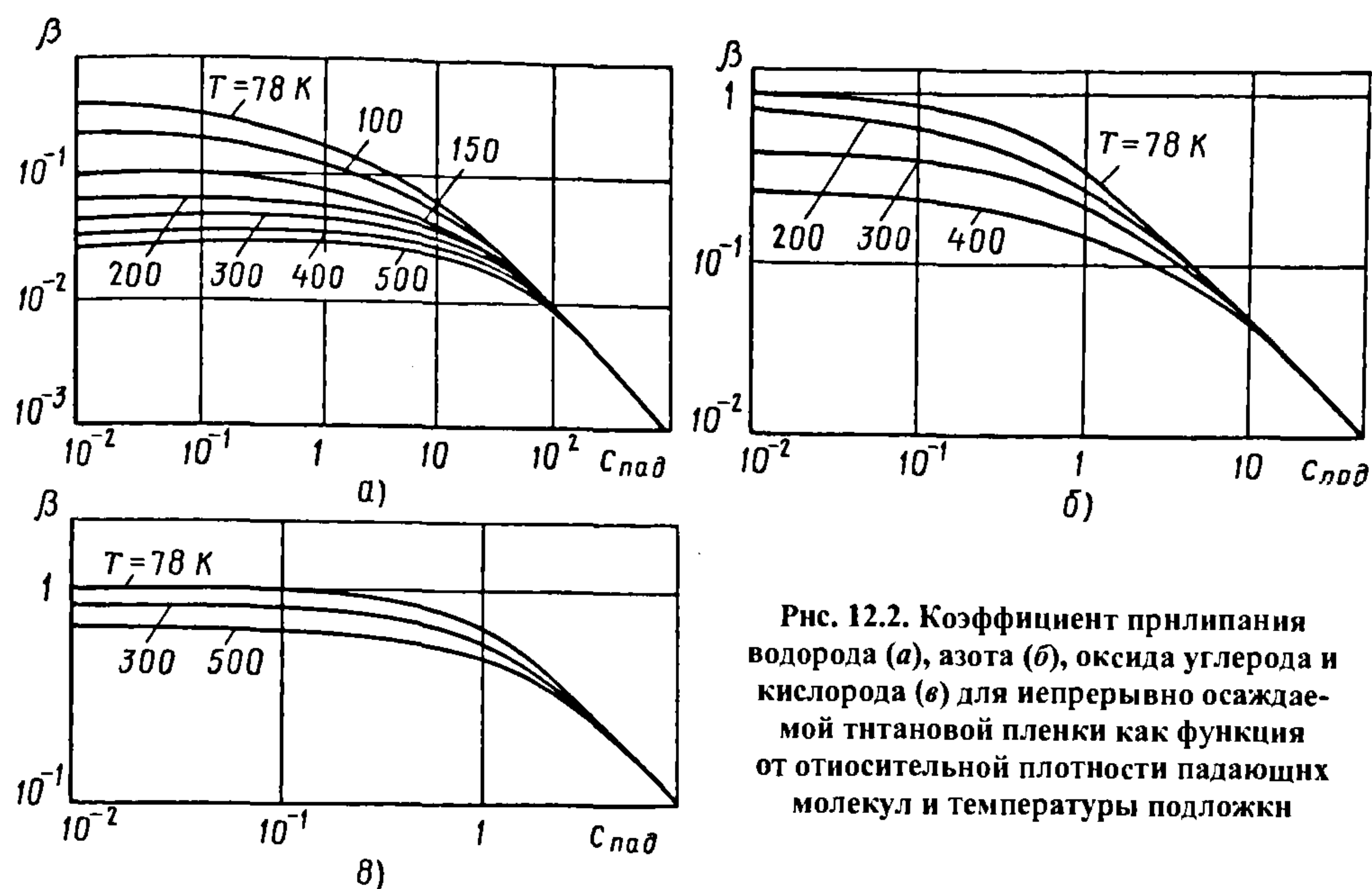


Рис. 12.2. Коэффициент прилипания водорода (а), азота (б), оксида углерода и кислорода (в) для непрерывно осаждаемой титановой пленки как функция от относительной плотности падающих молекул и температуры подложки

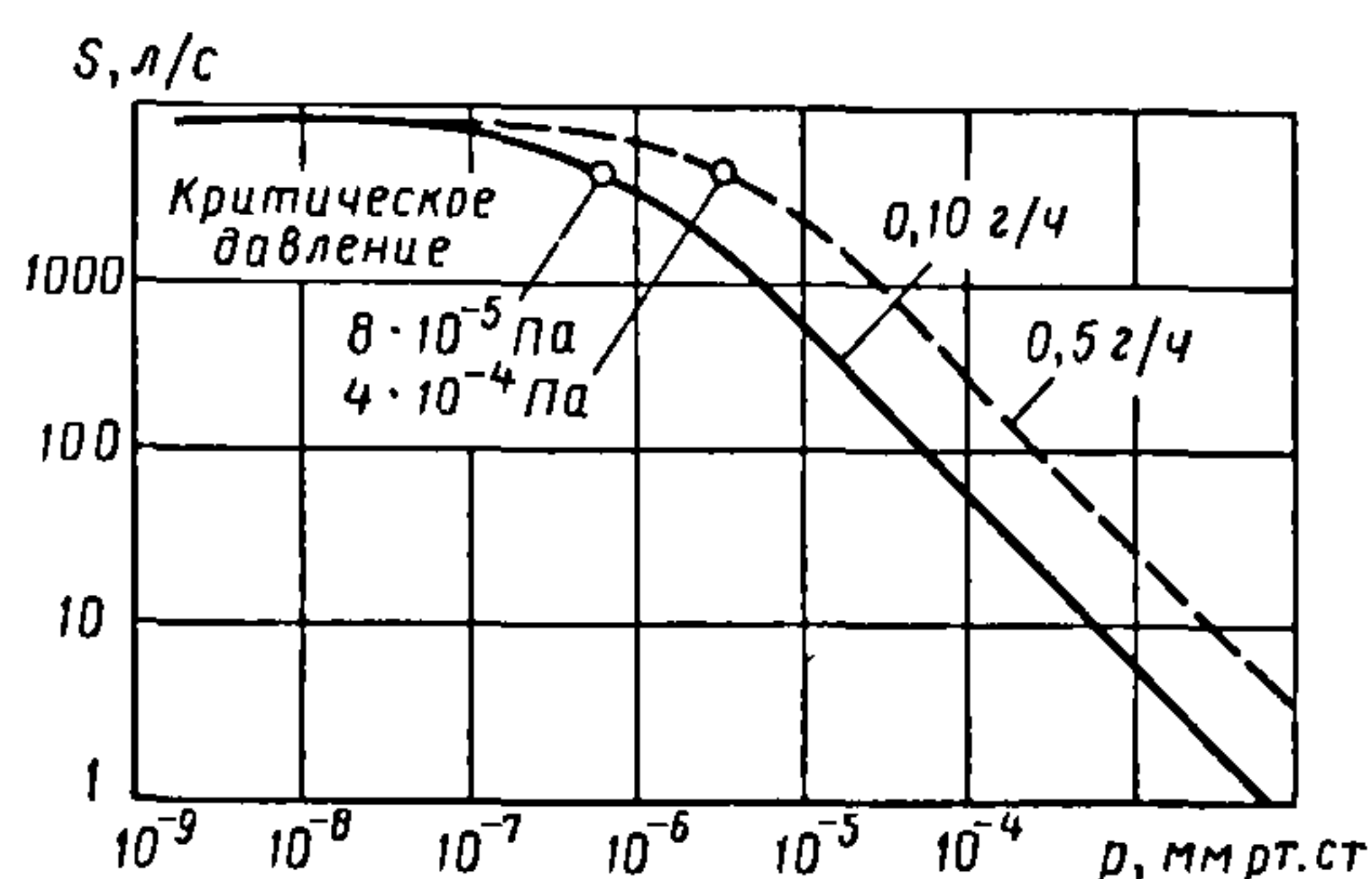


Рис. 12.3. Быстрота действия испарительного насоса по азоту при 20 °С при непрерывном осаждении титановой пленки как функция давления при различной скорости испарения геттера

### 12.3. Усредненные показатели скорости поглощения активных газов различными геттерами (температура газа 293 К)

Газ	Идеальная сорбирующая поверхность		Свеженапыленная пленка титана при температурах				Геттерная пленка из цирконий-алюминиевого сплава	
			77 К		293 К			
	$\beta_0$	$S_0$	$\beta_0$	$S_0$	$\beta_0$	$S_0$	$\beta_0$	$S_0$
H <sub>2</sub>	1,0	440,3	0,22	96,7	0,05	22,0	0,03	13,2
D <sub>2</sub>		311,4	0,14	43,5	0,02	6,2	0,02	6,2
T <sub>2</sub>		254,2	0,09	22,8	0,01	2,5	0,01	2,5
CH <sub>4</sub>		155,7	0,05	7,8	0,0001	0,16	—	—
N <sub>2</sub>		117,7	0,58	68,3	0,35	41,2	0,1	11,8
CO			0,95	111,8	0,88	103,6		
O <sub>2</sub>		110,1	0,98	107,9	0,95	104,6		—
CO <sub>2</sub>		93,9		92,0		89,2		9,4

## 12.4. Коэффициенты захвата ЭФСО различных типов (температура газа 293 К)

Газ	Типы ЭФСО				
	Модули на основе НЛГ*	Испарительные насосы с вольфрамовым геттером	Плазменные насосы	Магнито-разрядные диодные насосы	Комбинированные геттерно-ионные насосы
H <sub>2</sub>	0,13	0,2...0,23	0,2...0,25	0,05...0,1	0,17...0,23
N <sub>2</sub>	0,24	0,42...0,45	0,5...0,6	0,12...0,2	0,22...0,42

\* НЛГ – нераспыляемые ленточные геттеры.

## 12.5. Типовые характеристики промышленных образцов ЭФСО

Тип ЭФСО	Диапазон значений $S_{0H}$ (по N <sub>2</sub> ), м <sup>3</sup> /с	Давление, Па			Коэффициент захвата (по N <sub>2</sub> )	Удельная масса <sup>2</sup> , кг/(м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup> )
		предельное остаточное	максимальное рабочее	наибольшее запуск		
Магниторазрядные	5·10 <sup>-5</sup> ...10,0	~ 10 <sup>-8</sup>	~ 10 <sup>-1</sup>	~ 10	0,09...0,25	200...600
Испарительные: с резистивным испарителем из Ti-Mo-проволоки с титановым испарителем косвенного накала <sup>1</sup>	0,1...60,0	~ 10 <sup>-9</sup>	~ 10 <sup>-2</sup>	~ 10 <sup>-1</sup>	0,2...0,45	20...100
	До 25	~ 10 <sup>-9</sup>	~ 1,0	~ 3,0	—	—
Дуговые	До 80	~ 10 <sup>-7</sup>	~ 10 <sup>-1</sup>	~ 10	0,45...0,6	10...20
На основе НЛГ (модули из цирконий-алюминиевого сплава)	—	~ 10 <sup>-9</sup>	—	—	0,2...0,3	12...15

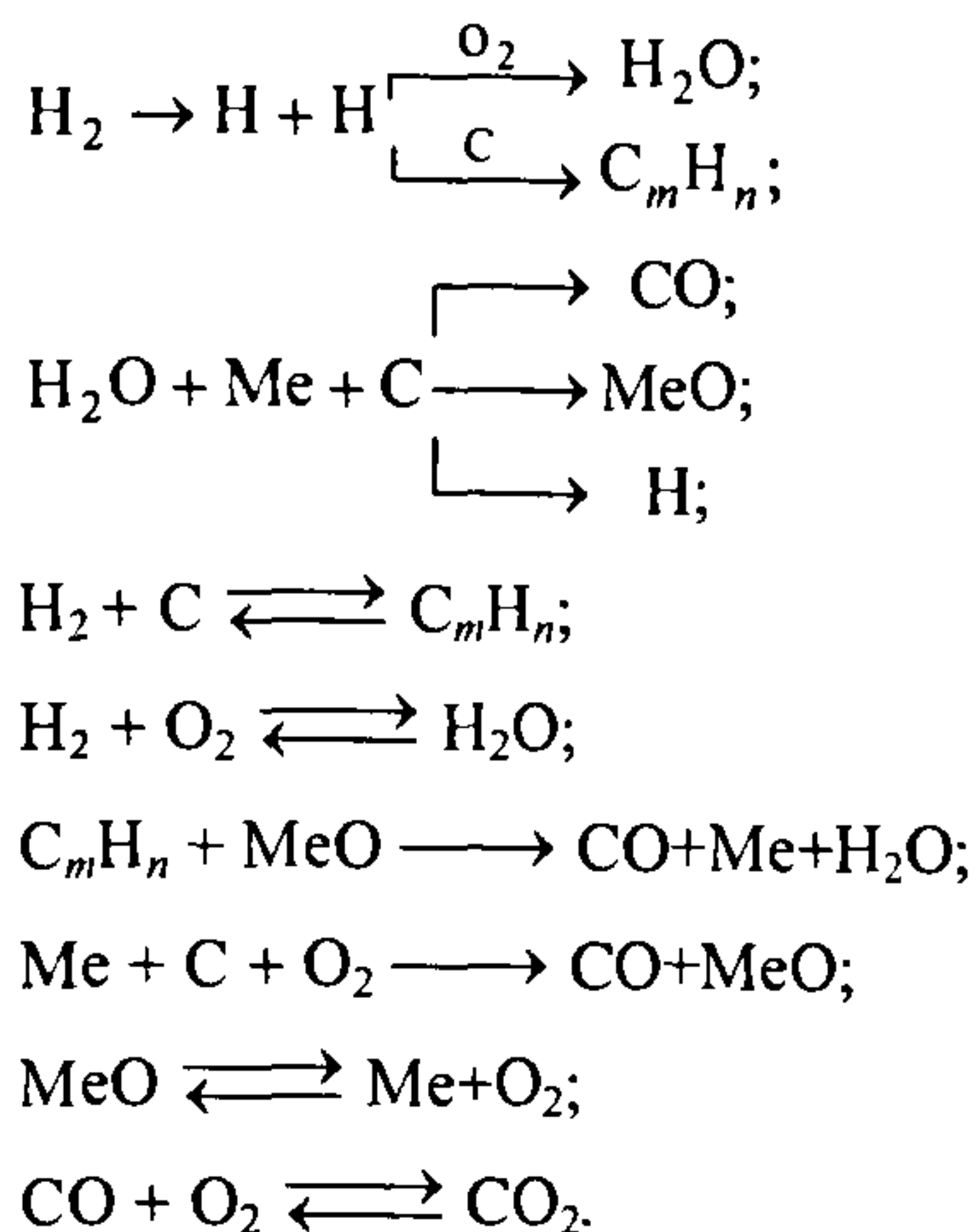
<sup>1</sup>Встраиваются непосредственно в откачиваемую камеру.<sup>2</sup>Масса насоса, отнесенная к его скорости действия.

Вышеприведенные табличные значения параметров  $\beta_0$ ,  $S_0$  и  $\Gamma$  следует рассматривать лишь как ориентировочные. Свойства геттерных пленок сильно зависят от условий их нанесения и даже незначительных примесей кислорода и оксида углерода в откачиваемом газе. Кроме того, результаты экспериментальных измерений заметно расходятся из-за различия используемых методик. Величины  $S_{0H}$  по индивидуальным газам, рассчитанные по данным табл. 12.3, могут заметно отличаться от аналогичных параметров промышленных насосов из-за влияния

газокинетической проводимости входных патрубков.

Для геттерных и геттерно-ионных насосов характерны интенсивные химические и плазмохимические реакции *газ-геттер*. Они стимулируются потоками заряженных и возбужденных частиц, электромагнитным излучением, каталитическим влиянием геттерных и нагретых поверхностей. Негативный результат этих процессов – синтез водяных паров и углеводородов. В наибольшей степени он проявляется в насосах, в процессе работы которых генерируется газоразрядная плазма. Доминируют следующие реакции:





Эти реакции оказывают прямое влияние на формирование парциального состава остаточной газовой среды. Особо существенна роль водяных паров.

Синтез водяных паров идет с наибольшей скоростью в стартовый период в интервале давлений 1...0,1 Па. Парциальное давление паров в этом интервале возрастает в 10–100 раз в сравнении с начальным уровнем. Общее количество синтезируемых водяных паров можно уменьшить, сократив продолжительность стартового периода. Для этого параллельно ЭФСО необходимо подключать вспомогательный высокопроизводительный насос. Полезен также прогрев до 350...400 К, даже кратковременный.

Для ускоренной откачки от давления  $>5 \cdot 10^{-2}$  Па при работе с частым напуском атмосферного воздуха и продолжительной откачке газов со значительным содержанием углеводородов предпочтение следует отдавать испарительным насосам. Особенно устойчиво в этих режимах работают электродуговые насосы.

В вакуумных системах, эксплуатирующихся при давлении  $< 10^{-4}$  Па без напуска атмосферы, наилучшие результаты достигаются с помощью магниторазрядных насосов; они же более эффективны и при откачке метана при давлении  $10^{-9}$ ... $10^{-5}$  Па.

При одинаковых размерах орбитроны в сравнении с магниторазрядными насосами имеют большую быстроту действия по активным газам и меньшую – по инертным.

Для откачки сверхвысоковакуумных систем без напуска инертных газов соотношение быстрот действия используемых насосов по азоту и аргону должно составлять ~100:1.

При давлении  $< 10^{-6}$  Па остаточная газовая среда в установках, откачиваемых ЭФН, состоит из водорода, метана и аргона; при давлении  $< 10^{-8}$  Па превалирует метан.

При включении испарительных насосов выделяется сравнительно большое количество газов, в особенности водорода, растворенных в геттере. Поэтому для сверхвысоковакуумных испарительных насосов следует подбирать геттеры с минимальным содержанием растворенных газов. Чтобы предотвратить запыление геттерным веществом внутрикамерного оборудования вакуумных систем, необходимо их экранировать.

Интересное и практически очень полезное свойство магниторазрядных насосов – пропорциональность их разрядного тока молекулярной концентрации откачиваемого газа. Это позволяет использовать разрядные насосы в качестве индикаторов и даже (при периодической градуировке и постоянстве парциального состава газовой среды) измерителей полного остаточного давления.

В геттерно-ионных насосах, работающих при высоком электрическом напряжении (от трех-четырех до нескольких десятков киловольт), газовые ионы приобретают значительную кинетическую энергию; глубина их внедрения в слой геттера достигает десятков и сотен нанометров. В процессе эксплуатации из-за распыления катодных электродов слой геттера, насыщенный имплантированными газовыми частицами, обнажается и начинается их реэмиссия. Поэтому эти насосы обладают «газовой памятью»: при их

включении в откачиваемой системе формируется остаточная газовая среда, отражающая их эксплуатационную предысторию.

По указанной причине применение разрядных и других высоковольтных насосов в вакуумных системах аналитического оборудования, например масс-спектрометров, нецелесообразно.

Заметная газовая память характерна и для испарительных насосов.

Все насосы с возобновляемыми геттерными пленками обладают «последействием», т.е. сохраняют сорбционную активность в течение некоторого времени после выключения испарителя. В сверхвысоком вакууме и при малых газовых нагрузках эффект последствия ощутим в течение многих десятков часов. Это необходимо учитывать при формировании и измерениях малых газовых потоков в вакуумных системах на базе ЭФСО.

В качестве геттера в ЭФН используют титан, цирконий, тантал, молибден, бинарные и многокомпонентные сплавы. Наиболее широкое распространение в промышленных насосах получил титан. Он обладает хорошими сорбционными характеристиками, значительной скоростью испарения на единицу мощности, технологичен, сравнительно дешев. Развитая металлургия позволяет получать металл высокой чистоты и разнообразного сортамента. В отече-

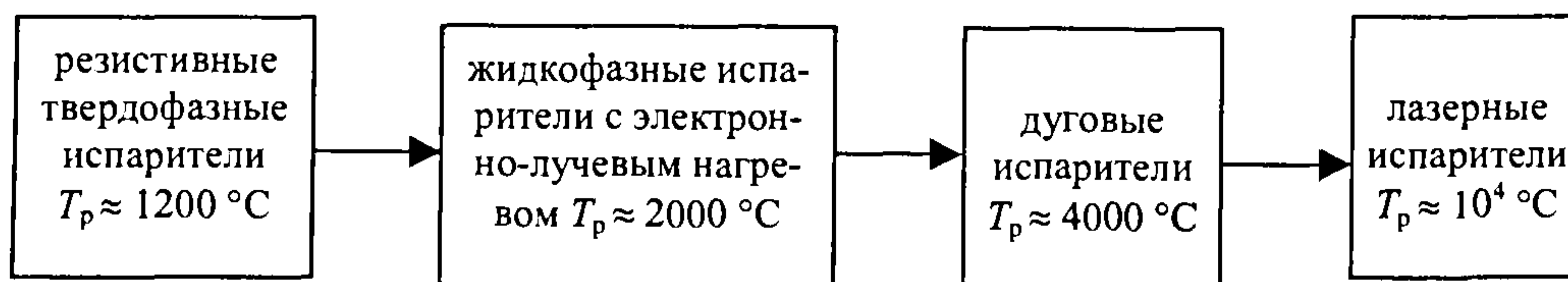
ственных промышленных насосах применяют технически чистый титан марки ВТ (табл. 12.6), йодидный титан и разработанную специально для испарителей титан-молибденовую проволоку. В специализированных насосах находят применение редкоземельные металлы.

#### 12.6. Предельное содержание примесных элементов в технически чистом титане отечественного производства

Марка	Весовая доля, %				
	Fe	C	H	N	O
ВТ-1-00	0,12	0,05	0,008	0,04	0,10
ВТ-1-0	0,18	0,07	0,010	0,04	0,12
ВТ-1-1	0,25	0,08	0,012	0,05	0,15

При разработке высокопроизводительных геттерных и геттерно-ионных насосов принципиальное значение приобретают вопросы их энергетической и структурно-геометрической оптимизации.

По критерию энергетической эффективности (скорости испарения геттера на единицу потребляемой испарителем мощности) целесообразны источники геттерных пленок с возможно более высокой рабочей температурой зоны испарения. По этому критерию их экономичность возрастает в ряду:



Рабочая температура  $T_p$  указана для титана.

По структурно-геометрическим характеристикам оптимален такой испарительный насос, в котором в любой области сорбирующих поверхностей поток напыляемых атомов геттера поддерживается минимально необходимым для поглоще-

ния газового потока. Среди насосов на базе нераспыляемых геттеров оптимален тот, где все зоны газопоглощающих поверхностей насыщаются с одинаковой скоростью. По этим критериям выбирают компоновочные схемы, размеры насосов, параметры испарителей.



Более подробно вопросы оптимизации ЭФСО будут рассмотрены далее.

Ни один тип ЭФСО не является универсально применимым либо оптимальным для любых применений. При их выборе в

каждом конкретном случае необходим детальный сопоставительный анализ эксплуатационных требований и реальных характеристик насосов. Соответствующие рекомендации сведены в табл. 12.7 и 12.8.

### 12.7. Сравнительные характеристики и рекомендуемые области применения электрофизических средств откачки

Тип ЭФСО	Достоинства	Недостатки
Насосы и модули на основе нераспыляемых пленочных геттеров	Очень широкий диапазон рабочих давлений (от атмосферы до сверхвысокого вакуума); практически неограниченная, регулируемая в процессе эксплуатации быстрота действия по активным газам; обратимый характер поглощения водорода; устойчивость к импульсным газовым нагрузкам; конструктивная простота и технологичность; возможность нанесения геттера непосредственно на стенки откачиваемой камеры; эффективность в системах с интегрированным вакуумным трактом; устойчивость к вибрации, ударам, высоким и низким температурам, внезапному напуску атмосферы, радиации, отключению электропитания; простота обслуживания; хорошие массогабаритные характеристики	Неспособность откачивать инертные газы и метан; возможность отравления с утратой сорбирующих свойств; необходимость термической активации и периодической регенерации; возможность отслоения геттера и пылеобразования
Испарительные геттерные насосы и автономные испарители	Практически неограниченная, регулируемая в процессе эксплуатации быстрота действия по активным газам; устойчивость к импульсным газовым нагрузкам; быстрый «выход в режим» после напуска атмосферы; возможность встраивания непосредственно в вакуумные камеры; устойчивость к повышенным и низким температурам, радиации, отключению электропитания; хорошие массогабаритные характеристики; низкая стоимость	Неспособность откачивать инертные газы и метан; ограниченный ресурс; чувствительность к внезапному напуску атмосферы и внешним магнитным полям; необходимость систематического удаления пленок геттера, насыщенных газом; возможность попадания частиц геттера в откачиваемую камеру
Испарительные геттерно-ионные насосы и комбинированные откачные блоки	Способность откачивать активные и инертные газы; быстрый «выход в режим» после напуска атмосферы; возможность регулирования скорости действия в процессе откачки; устойчивость к повышенным и низким температурам, радиации, отключению электропитания	Ограниченный ресурс; чувствительность к попаданию атмосферы и внешним магнитным полям; наличие высокого электрического напряжения; необходимость систематической очистки геттера и защиты откачиваемой камеры от геттерных частиц

Окончание табл. 12.7

Тип ЭФСО	Достоинства	Недостатки
Магнитные электро-разрядные насосы и электродные блоки для интегрированных вакуумных систем	Способность откачивать все газы; широкий диапазон рабочих давлений; большой ресурс; малая саморегулируемая потребляемая мощность; возможность контроля давления по разрядному току; устойчивость к вибрации, ударам, низким температурам, радиации, отключению электропитания, внезапному напуску атмосферы; высокая эффективность в системах с интегрированным вакуумным трактом; простота обслуживания	Неустойчивость при длительной откачке инертных газов в области повышенного давления и при наличии углеводородных загрязнений; продолжительный «выход в режим» после напуска атмосферы; затрудненный запуск в области сверхвысокого вакуума; наличие магнитных полей рассеяния, высокого электрического напряжения, вторично-эмиссионных явлений в электродной системе; значительная масса; высокая стоимость

## 12.8. Области применения ЭФСО

Тип ЭФСО	Рекомендуемые области применения
Насосы и модули на основе нераспыляемых пленочных геттеров	Отпаянные приборы и устройства; встроенные системы откачки; исследовательские установки с варьируемым парциальным составом остаточной газовой среды; системы формирования газовых смесей контролируемого состава; системы очистки инертных газов от активных примесей
Испарительные геттерные насосы и автономные испарители	Исследовательские установки и высоковакуумное технологическое оборудование, работающие в режиме частого напуска активных газов
Испарительные геттерно-ионные насосы и комбинированные откачные блоки	Технологическое высоковакуумное оборудование и исследовательские установки при интенсивных газовых нагрузках
Магнитные электроразрядные насосы и электродные блоки для интегрированных вакуумных систем	Высоко- и сверхвысоковакуумные исследовательские установки и прецизионное технологическое оборудование с малыми газовыми нагрузками и редким напуском атмосферы; ускорители и накопители заряженных частиц; интегрированные системы сверхвысоковакуумных физических установок и приборов



## 12.2. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ЭФН, как и насосы поверхностного действия других типов, с позиций проектанта, представляют собой трехмерную совокупность сорбирующих<sup>1</sup> («активных») и отражающих газы молекулы поверхностей, различным образом ориентированных относительно источника откачиваемого газа. Испытывая воздействие молекулярных потоков разной интенсивности, сорбирующие поверхности, в свою очередь, далеко не одинаково поглощают эти потоки.

В ходе оптимизационного проектирования должны быть найдены структурно-геометрическая схема и эксплуатационные режимы, которые в совокупности позволяли бы достичь максимально возможного для данной пары газ – сорбирующая поверхность коэффициента захвата.

Для решения этой задачи необходима система понятий и физико-технических параметров, адекватно описывающих функциональные характеристики ЭФН. При ее построении не надо вдаваться в физические детали взаимодействия молекул с сорбирующими поверхностями. Достаточно ограничиться обобщенной моделью взаимодействия, основанной на концепции *активных центров*.

Под активным центром понимают доступную для газовых молекул микрообласть сорбирующих поверхностей насоса. Попав в эту микрообласть, молекула удерживается ею, «нейтрализуя» один или несколько активных центров. Количественно поле активных центров в момент времени  $t$  характеризуют их концентрацией  $N_{a.u}(\bar{r}, t)$ , плотностью потока  $q_{a.u}(\bar{r}, t)$  и плотностью потока нейтрализуемых активных центров  $q_{a.u}^n(\bar{r}, t)$  на участке поверхности вокруг точки  $\bar{r}$ .

Представленная модель опирается на прямые физические аналоги (табл. 12.9).

**12.9. Параметры взаимодействия газовых молекул с сорбирующими поверхностями при различных механизмах поглощения газа**

Механизм поглощения газа	Параметр элементарного акта взаимодействия	Физический аналог активных центров	Факторы, регламентирующие параметры элементарных актов взаимодействия
Сорбция слоем (пленкой) геттера	Коэффициент прилипания $\beta$	Сорбционные центры	Поверхностная/объемная концентрация сорбированного газа
Сорбция непрерывно возобновляемой пленкой геттера	Коэффициент прилипания $\beta$ ; коэффициент $k^*$	Напыляемые атомы геттера	Толщина геттерной пленки; температура подложки
Имплантация	Коэффициент внедрения $\mu$	Сорбционные центры	Концентрация внедренных газовых частиц

\*Число напыляемых атомов геттера, приходящихся на одну поглощенную молекулу газа в насыщенной геттерной пленке.

<sup>1</sup>Здесь и далее в пределах подразд. 12.2 термином «сорбирующая» обозначается любая физическая поверхность, характеризующаяся отличной от нуля вероятностью захвата падающих газовых молекул независимо от механизма их поглощения.

В насосах на основе нераспыляемых геттеров и в имплантационных насосах активные центры формируются при активации РТ. В насосах с возобновляемой геттерной пленкой поток активных центров воспроизводится испарителем (распылителем). В процессе откачки активные центры нейтрализуются, теряя способность к дальнейшему связыванию газовых молекул. Поэтому после достижения «критической» концентрации захваченного газа статистическая вероятность поглощения падающих молекул (коэффициенты  $\beta$ ,  $\mu$ ) начинает снижаться (см. рис. 12.2 и 12.3). Скорость нейтрализации активных центров пропорциональна падающему молекулярному потоку.

Используя введенные представления, можно сформулировать общий и частные критерии оптимизации ЭФН. Поскольку формирование активных центров требует энергетических затрат, общим критерием является их минимизация. Отсюда вытекает частный критерий температурной оптимизации испарителей, обсуждавшийся в начале главы. Отсюда же можно вывести и группу частных критериев структурно-геометрической оптимизации (табл. 12.10).

Под употребленным в табл. 12.10 термином «полезная работа» понимают любой физический параметр, характеризующий назначение проектируемой установки и требующий достижения заданного остаточного давления. Остальные обозначения имеют следующий смысл:  $Q$  – откачиваемый газовый поток;  $Q_{\text{л}}^{\text{погл}}$  – лучистый поток, поглощаемый сорбирующими поверхностями;  $Q_{\text{л}}^{\text{изл}}$  – лучистый поток, излучаемый источником активных центров;  $F_{\text{с.п}}$  – площадь сорбирующих поверхностей.

Управляемыми факторами оптимизации являются: геометрическая структура ЭФН и вакуумного тракта в целом; скорость формирования и пространственное распределение активных центров; свойства сорбирующих поверхностей; распределение молекулярных потоков в откачиваемой вакуумной камере. Как видно из табл. 12.10, часть критериальных характеристик требует совместного рассмотрения молекулярного и лучистого переноса.

Высказанные соображения детализируем для типовых вариантов насосов: с заранее сформированными сорбирующими поверхностями и с возобновляемыми геттерными пленками.

**12.10. Критерии структурно-геометрической оптимизации ЭФН и систем на их основе**

Объект оптимизации	Управляемые факторы	Критерии оптимизации
Электрофизические насосы	Компоновочная схема; геометрические соотношения	Максимум $\Gamma$ ; $S_{0\text{н}}$ ; $Q/Q_{\text{л}}^{\text{изл}}$ ; минимум $Q_{\text{л}}^{\text{погл}}/Q$ ; $F_{\text{с.п}}$ ; подобие функций пространственного распределения потоков откачиваемого газа и потоков (концентрации) активных центров
Системы, содержащие сорбирующие поверхности и источники газа, потоков активных центров и лучистых потоков	Компоновочная схема; геометрические соотношения; взаимная ориентация источников и пространственное распределение молекулярных и лучистых потоков и потоков активных центров	Минимум $S_{0\text{н}}$ ; $F_{\text{с.п}}$ ; $Q_{\text{изл}}^{\text{п}}$ ; $Q_{\text{л}}^{\text{погл}}$ на единицу полезной работы установки



В насосах с заранее сформированными сорбирующими поверхностями степень насыщения геттерного слоя во всех зонах должна быть одинаковой. При невыполнении этого условия локальное насыщение геттера будет приводить к уменьшению коэффициента захвата в сравнении с теоретически возможным. Следовательно, отвечающим оптимизационным критериям можно считать только такой насос, сорбирующие поверхности которого в любой зоне и во всякий момент эксплуатации будут иметь одну и ту же степень насыщения. Иначе говоря, относительное изменение концентрации активных центров вследствие поглощения молекул во всех зонах сорбирующих поверхностей должно быть одинаково.

Из этого условия вытекает требование подобия пространственного распределения плотностей падающих молекулярных потоков и концентрации активных центров как одного из критериев структурно-геометрической оптимизации ЭФН (см. табл. 12.10).

В насосах с заранее сформированными сорбирующими поверхностями действует механизм саморегулирования потока нейтрализуемых активных центров:

$$q_{a.u}^n(\bar{r}, t) = -\frac{dN_{a.u}(\bar{r}, t)}{dt} = \beta(\bar{r}, t)q_{пад}(\bar{r}, t), \quad (12.3)$$

где  $q_{пад}(\bar{r}, t)$  – плотность падающего молекулярного потока вокруг точки  $\bar{r}$ .

Поэтому вышеназванное условие можно представить в виде

$$\frac{q_{a.u}^n(\bar{r}, t)}{N_{a.u}(\bar{r}, t)} = \frac{\beta(\bar{r}, t)q_{пад}(\bar{r}, t)}{N_{a.u}(\bar{r}, t)} = \varepsilon(t), \quad (12.4)$$

где  $\varepsilon(t)$  – функция времени, одинаковая для всех зон сорбирующих поверхностей.

Ограничиваясь для простоты только начальным состоянием сорбирующих поверхностей, условие (12.4) можно переписать в форме

$$\frac{\beta(\bar{r})q_{пад}(\bar{r})}{N_{a.u}(\bar{r})} = \Lambda_0\Lambda(\bar{r}) = c. \quad (12.5)$$

$$\text{Здесь } \Lambda_0 = \beta_0 q_{пад 0} / N_{a.u 0};$$

$$\Lambda(\bar{r}) = \lambda_\beta(\bar{r})\lambda_{пад}(\bar{r}) / \lambda_{a.u 0};$$

$$\text{где } \lambda_\beta(\bar{r}) = \beta(\bar{r}) / \beta_0;$$

$$\lambda_{a.u}(\bar{r}) = N_{a.u}(\bar{r}) / N_{a.u 0};$$

$c$  – константа.

Нулевой индекс здесь присвоен значениям функций, относящимся к некоторой произвольно выбранной малой области сорбирующих поверхностей – нулевой зоне. Это может быть, например, узкий поясok вблизи входного сечения насоса.

В реальном насосе соотношение (12.5) может не выполняться, что свидетельствует о малости коэффициента захвата в сравнении с его предельно возможным значением. Следовательно, в каждой зоне сорбирующих поверхностей величина

$$\beta(\bar{r})q_{пад}(\bar{r}) / N_{a.u}(\bar{r}) = \Lambda_0\Lambda(\bar{r}) \quad (12.6)$$

может принимать любое численное значение. Степень выполнимости соотношения (12.5) логично рассматривать как меру функционального совершенства насоса.

В насосах с непрерывным возобновлением геттерной пленки активными центрами являются напыляемые атомы геттера. Отвечающим оптимизационным критериям в этом случае можно считать только такой насос, в котором в любой зоне сорбирующих поверхностей поток активных центров поддерживается минимально необходимым для поглощения падающего газового потока. Количественно это условие записывается в виде

$$\frac{k(\bar{r})q_{пад}(\bar{r})}{q_{a.u}(\bar{r})} = 1. \quad (12.7)$$

Для реального насоса соотношение (12.7) может не выполняться. При  $k(\bar{r})q_{пад}(\bar{r}) > q_{a.u}(\bar{r})$  насос будет иметь коэффициент захвата, меньший предельно возможного для данных конструктивной схемы, рода газа, вида геттера и температуры. При обратном соотношении коэффициент захвата максимален, однако по-

ток активных центров и, следовательно, энергозатраты избыточны в сравнении с необходимыми.

Таким образом, в каждой зоне сорбирующих поверхностей реального насоса величина

$$k(\bar{r})q_{\text{пад}}(\bar{r})/q_{\text{а.ц}}(\bar{r}) = \Lambda_0 \Lambda(\bar{r}) \quad (12.8)$$

может принимать любое численное значение, причем степень ее близости к 1 логично рассматривать как меру функционального совершенства насоса.

В формуле (12.8)

$$\Lambda_0 = k_0 q_{\text{пад}0} / q_{\text{а.ц}0};$$

$$\Lambda(\bar{r}) = \lambda_k(\bar{r}) \lambda_{\text{пад}}(\bar{r}) / \lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r});$$

где  $\lambda_k(\bar{r}) = k(\bar{r}) / k_0$ ;

$$\lambda_{\text{пад}}(\bar{r}) = q_{\text{пад}}(\bar{r}) / q_{\text{пад}0};$$

$$\lambda_{\text{а.ц}}(\bar{r}) = q_{\text{а.ц}}(\bar{r}) / q_{\text{а.ц}0};$$

нулевой индекс присвоен значениям функций, относящимся к нулевой зоне. Из условия (12.7) для этой зоны непосредственно вытекают требования к интенсивности источника активных центров:

$$q_{\text{а.ц}0} = k_0 q_{\text{пад}0}. \quad (12.9)$$

С использованием представленных соотношений могут быть вычислены *локальные* (для выбранной зоны сорбирующих поверхностей) и *интегральные критерии подобия* реального насоса оптимальному.

Изложенные принципы развиты и обобщены в теории оптимизационного проектирования ЭФН [60]. Она позволяет:

- строить детальную математическую модель ЭФН, адекватную физическим механизмам высоковакуумной откачки и сопутствующим теплофизическим процессам;

- на стадии проектирования определять эксплуатационные характеристики насосов;

- по объективным количественным критериям сопоставлять насосы, выполненные по различным конструктивно-физическим схемам;

- формулировать количественные требования к компоновочным схемам насосов, физическим параметрам и геометрическим соотношениям испарителей, геттерных панелей, теплозащитных экранов, других функциональных элементов ЭФН;

- осуществлять комплексную структурно-параметрическую оптимизацию проектируемых вакуумных систем на основе ЭФСО.

### 12.3. СРЕДСТВА ОТКАЧКИ НА ОСНОВЕ НЕРАСПЫЛЯЕМЫХ ГЕТТЕРОВ

Губчатый титан, его сплавы, другие нераспыляемые геттеры в форме гранул, втулок, таблеток, дисков с пористой структурой традиционно используются для высоковакуумной откачки генераторных ламп, электрофизических приборов, источников света [36]. Технологические изыскания по их совершенствованию привели к созданию в середине 60-х годов прошлого века нераспыляемых геттеров нового типа – пористых композиций на основе металлов IV группы: циркония, титана, ванадия, бинарных и многокомпонентных сплавов.

Геттер в виде мелкодисперсного порошка наносят тонким слоем на металлические ленты<sup>1</sup>, диэлектрические подложки или непосредственно на стенки откачиваемого изделия. Эти геттеры надежны; имеют широкий интервал рабочих температур; устойчивы к воздействию электрических и магнитных полей, вибрации, ударным механическим нагрузкам. Их сорбционная емкость и скорость поглощения активных газов намного превышают аналогичные характеристики чистых циркония и титана.

Геттерный слой формируют прессованием, спеканием в вакууме, накаткой,

<sup>1</sup> Средства откачки в таком исполнении называют обычно *нераспыляемыми ленточными геттерами* (НЛГ).



плазменными методами. Его глубина обычно  $\leq 100$  мкм. В качестве подложек применяют обычно ленты толщиной 0,1...0,4 мм из константана, коррозионно-стойкой стали, других сплавов. Одновременно лента служит токопроводом для резистивного нагрева геттера в режимах активации и регенерации. Средний размер зерен в геттерном слое  $\sim 10$  мкм; его поверхностная плотность 0,3...0,4 кг/м<sup>2</sup>; пористость 25...40 %; удельная площадь физической поверхности до  $10^3$  м<sup>2</sup>/кг.

Первичную и последующие активации осуществляют пропусканием по подложке электрического тока либо лучистым нагревом геттера; одновременно вспомогательным вакуумным насосом откачивают выделяющиеся газы. В термодесорбционном спектре геттера ST707 (цирконий-ванадий-железо), к примеру, присутствуют размытые пики, соответствующие выделению водяных паров (320...500 К; максимум при 383 К), оксида углерода (360...1050 К; максимум при 473 К) и водорода. Десорбция водорода происходит в интервале 400...1050 К и характеризуется двумя пиками с максимумами при 503 и 813 К; их примерное соотношение 1:8. Максимальные высоты пиков водяных паров, оксида углерода и водорода соотносятся как 1:2,6:4,2.

Для геттеров характерно обратимое поглощение изотопов водорода с образованием твердых растворов. Этот процесс идет в широком диапазоне температур, включая комнатную. Удельная быстрота сорбции противя в оптимальных условиях близка к  $10$  м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>); она остается почти неизменной в интервале давлений  $10^{-5}$ ... $10^{-1}$  Па. Предельное остаточное давление в прогретых камерах, откачиваемых НЛГ при 300 К, близко к  $2,7 \cdot 10^{-9}$  Па; основные остаточные газы – водород, метан, водяные пары, оксид углерода.

При увеличении температуры геттера в масс-спектре резко возрастает доля водорода и метана. После насыщения геттерного слоя поглощенный водород мо-

жет быть десорбирован прогревом до температуры, несколько превышающей рабочую.

Поглощение водорода сопровождается отрицательным побочным эффектом – охрупчиванием геттерного слоя. Это приводит к заметному ухудшению термомеханических свойств НЛГ и ограничивает допустимую концентрацию растворенного водорода.

Тяжелые активные газы – водяные пары, азот, оксид углерода, кислород – поглощаются практически необратимо, образуя устойчивые химические соединения; равновесное давление этих газов пренебрежимо мало. Скорость их сорбции относительно противя составляет 0,35...0,55 (оксид углерода), 0,15...0,20 (азот), 0,6...0,7 (кислород).

Поглощение водяных паров заметно уже при комнатной температуре и носит диссоциативный характер, причем сорбируемый кислород блокирует дальнейшее поглощение водорода. Необратимое насыщение геттера кислородом происходит за 20...30 циклов откачки водяных паров. Удельная скорость их сорбции при 300 и 600 К составляет соответственно  $(1,5...2) \cdot 10^{-2}$  и  $0,4...0,5$  м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>). Примерно такой же характер носит поглощение оксида углерода.

Инертные газы геттером не сорбируются. Углеводороды поглощаются лишь при высоких температурах и с очень малой скоростью; даже при 1000 К она составляет  $< 1$  % скорости сорбции оксида углерода.

В геттерах некоторых модификаций содержится сравнительно большое количество аргона (до  $1$  м<sup>3</sup>·Па/кг), что связано с его использованием в технологическом процессе изготовления геттера. Скорость выделения атомов аргона из реактивированного геттера – от  $5 \cdot 10^{11}$  (сплав цирконий-никель) до  $2 \cdot 10^{13}$  (с·м<sup>2</sup>)<sup>-1</sup> (титан). Водородная среда стимулирует десорбцию аргона.

Важные достоинства НЛГ – гибкость конструктивно-компоновочных решений, компактность, простота формирования сорбирующих модульных структур – ловушек, эффективно захватывающих газовые молекулы. Благодаря этому достигаются повышенные сорбционная емкость и быстрота действия по активным газам, в особенности по водороду, намного превышающие их значения для нераспыляемых геттеров традиционного исполнения. Удельная быстрота действия оптимизированных геттерных модулей достигает  $10^2 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , а их сорбционная емкость  $10^4 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{кг}$  (протий, 300 К).

Наиболее широкое практическое применение получили НЛГ на основе сплавов циркония. Крупнейшим изготовителем НЛГ является фирма SAES Getters (Италия), покрывающая ~75 % мировых потребностей. Ею выпускаются промышленные геттеры ST 101 (отечественный аналог *циаль*), ST 707, ST 185 и др. (табл. 12.11).

Близкие по свойствам ленточные геттеры выпускаются и в России. Разработаны также геттеры на основе титана и композиционные геттеры *цирконий-углерод*, имеющие экстремально высокую пористость; геттеры с легирующими микродобавками, увеличивающими сорбционную емкость и коэффициент прилипания, гранулированные геттеры на основе щелочных металлов (табл. 12.12).

Поглощение водорода цирконий-алюминиевыми геттерами описывается законом Сивертса. Равновесное давление над поверхностью геттерного слоя  $p_0$ , лимитирующее предельно достижимое остаточное давление в откачиваемой камере,

$$p_0 = kG_0^2 \exp(A - B/T), \quad (12.10)$$

где  $k$  – размерностный коэффициент;  $G_0$  – усредненная по объему геттерного слоя концентрация поглощенного газа;  $A$ ,  $B$  – константы сорбции.

### 12.11. Важнейшие характеристики промышленных геттеров

Характеристика		Марка НЛГ	
		ST 101	ST 707
Состав		Zr-Al	Zr-V-Fe
Рекомендуемый интервал температуры активации, °C		600...900	300...500
Рекомендуемая температура откачки смеси активных газов при давлении $10^{-3}$ Па		400	280
То же, при давлении $< 10^{-8}$ Па		–	20
Начальная удельная быстрота действия при 20 °C, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	H <sub>2</sub>	0,1/10*	6,0/6,0*
	N <sub>2</sub>	0,35	0,15
	CO	0,01/3,0*	0,5/0,6*
Удельная сорбционная емкость по водороду при различных температурах и равновесном давлении $10^{-3}$ Па, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{кг}$		8 (700 °C); 300 (300 °C)	5 (600 °C); 200 (300 °C)

\*Величина, указанная в числителе, соответствует температуре активации 500 °C, а в знаменателе – температуре 700 °C.

### 12.12. Эксплуатационные характеристики гранулированных геттеров на основе щелочных металлов

Базовый геттер	Интерметаллический компаунд	Режим активации		Рабочая температура, °C
		Температура, °C	Продолжительность, мин	
Литий	Li <sub>3</sub> Ga <sub>2</sub>	50...100	5...10	20
Натрий	NaSn	250...300		
Барий	Ba <sub>0,4</sub> Sn <sub>0,6</sub>			
Кальций	CaIn	160...200		



В частности, для протия зависимость (12.14) имеет вид:

для геттера ST101

$$\lg p_0 = 2 \lg G_0 + 6,53 - 7000/T; \quad (12.11a)$$

для геттера ST707

$$\lg p_0 = 2 \lg G_0 + 6,93 - 6116/T. \quad (12.11b)$$

В соотношениях (12.15)  $p_0$  выражено в Па;  $G_0$  – в  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{кг}$ . Теплота сорбции равна 51 (ST101) и 120 (ST707), кДж/моль.

Коэффициент прилипания  $\beta$  для изотопов водорода сложным образом зависит от состава, структуры и температуры геттерного слоя, атомной массы и концентрации поглощенного газа (рис. 12.4).

В интервале значений  $T$  и  $G_0$ , соответствующих близости давления откачиваемого газа и его равновесного давления для данной температуры, коэффициент прилипания резко падает (кривая 1 на рис. 12.4). В предельном случае минимально достижимое давление в откачиваемой камере и равновесное давление  $p_0$  совпадают и  $\beta_0 = 0$ .

При откачке свободного от примесей водорода в высоковакуумной области температуру геттера целесообразно поддерживать в интервале 500...700 К (про-

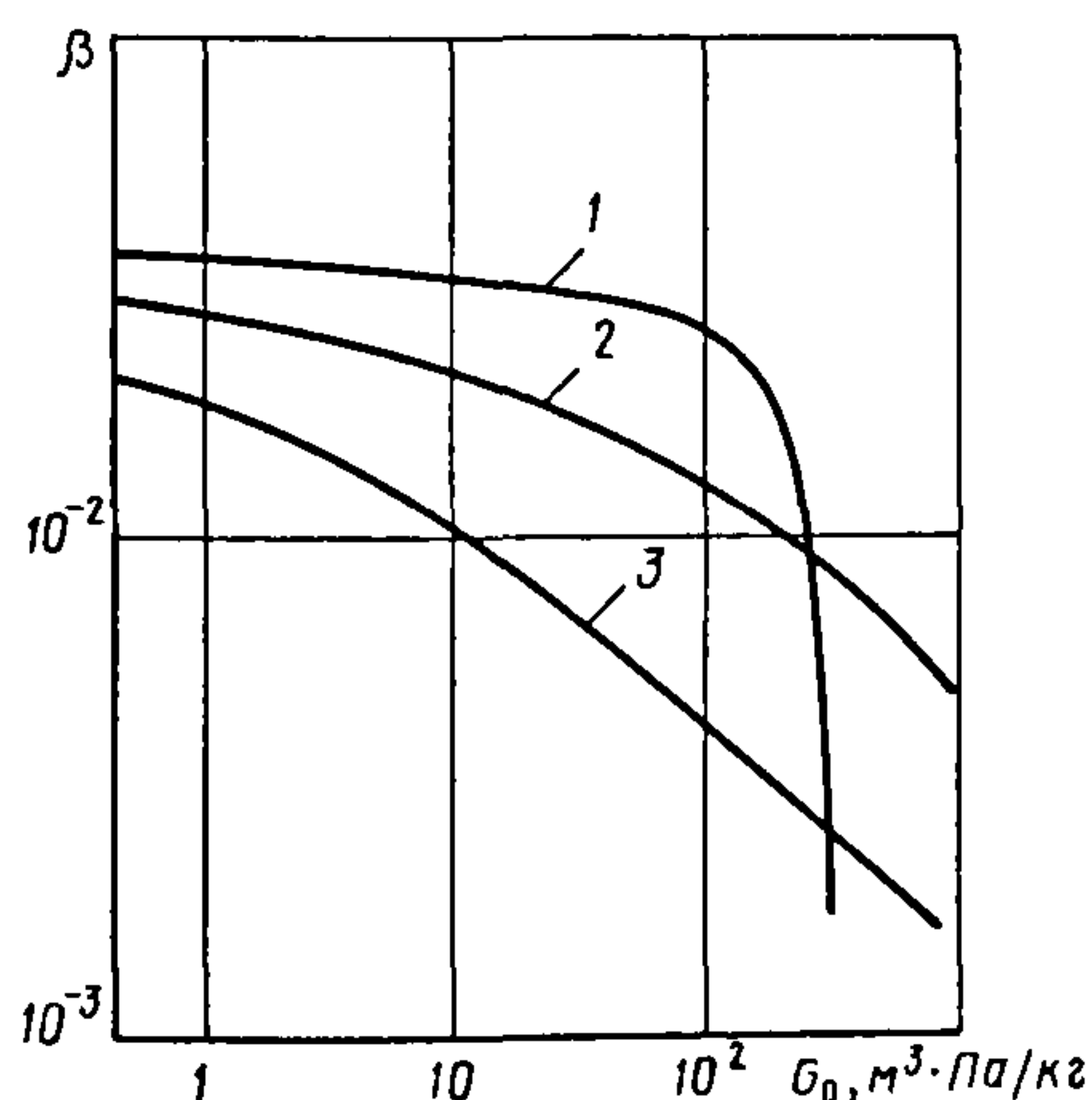


Рис. 12.4. Коэффициент прилипания для системы протий–геттер ST101 в зависимости от концентраций поглощенного газа при температуре, °С, 400, 200 и 20 (соответственно кривые 1, 2 и 3)

тий, дейтерий) и ~ 500 К (третий). При рабочем давлении  $<10^{-6}$  Па температура геттера должна быть снижена до комнатной.

Существенно иной характер носит поглощение тяжелых активных газов. Начальный коэффициент прилипания по ним несколько больше, чем для водорода (ср. кривые на рис. 12.4 и 12.5). Однако из-за практического отсутствия диффузии даже при повышенных температурах с увеличением концентрации поглощенного газа коэффициенты прилипания резко падают. Сорбционная емкость геттерного слоя для тяжелых газов намного меньше, чем для водорода.

Тяжелые газы и при малой концентрации оказывают сильное отрицательное влияние на сорбцию водорода. Оно особенно заметно для бинарных сплавов цирконий–алюминий при пониженных температурах. Геттеры на основе тройного сплава Zr-V-Fe менее чувствительны к примесным газам. Водород на сорбцию тяжелых газов не влияет вовсе. По этим причинам в зависимости от эксплуатационных условий для различных геттеров должны выбираться оптимальные температурные режимы (табл. 12.13).

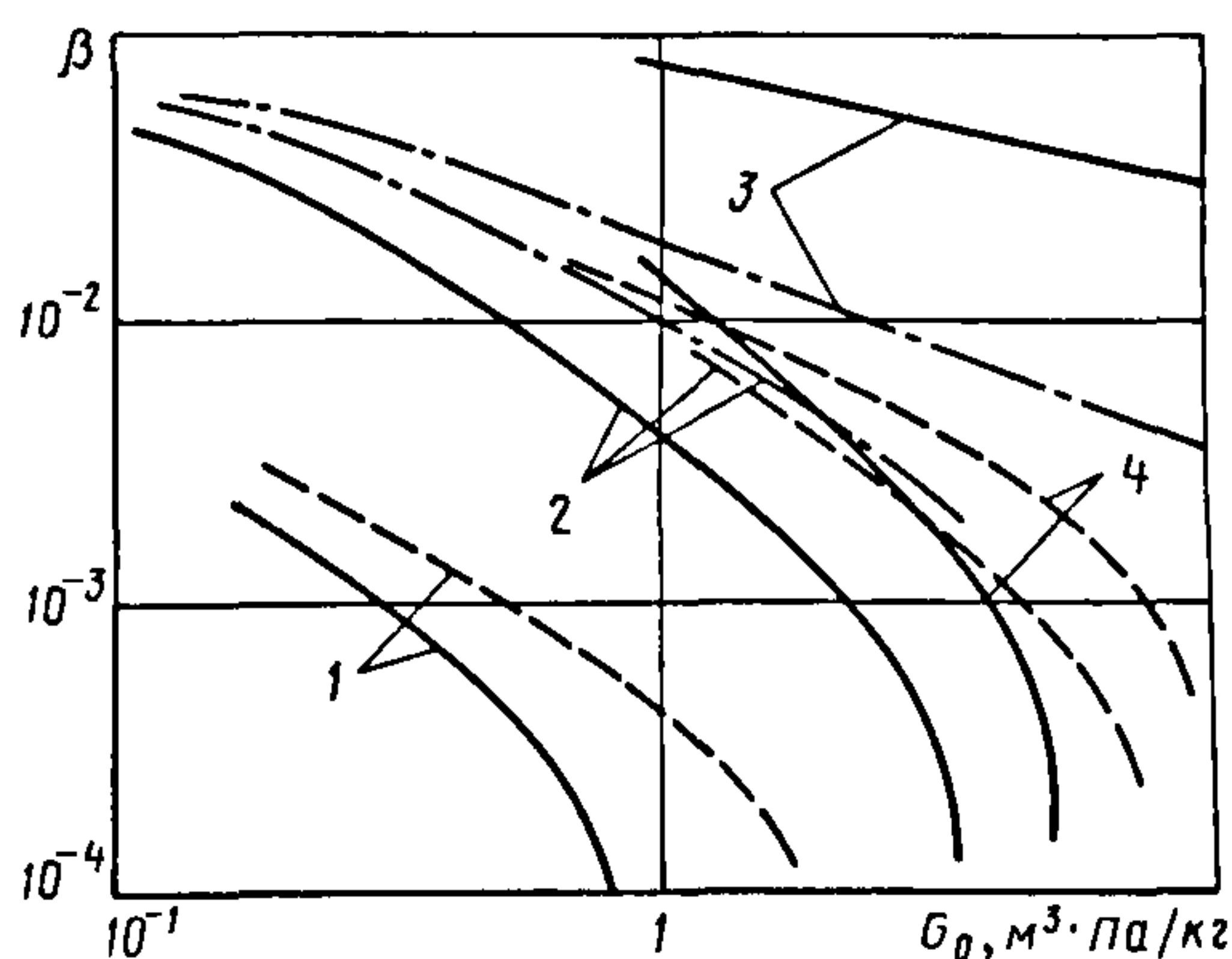


Рис. 12.5. Коэффициент прилипания азота (кривая 1), оксида (кривые 2, 3) и диоксида (кривая 4) углерода для геттеров ST101 (сплошные линии), ST707 (пунктир) и ST171 (штрихпунктир) в зависимости от концентрации поглощенного газа при температуре, °С, 27 (кривые 1, 2 и 4) и 400 (кривая 3)

## 12.13. Рекомендуемые рабочие температуры НЛГ на основе циркония, К

Условия эксплуатации	Марка геттера	
	ST101	ST707
Откачка смесей активных газов ( $N_2$ , $CO$ , $CO_2$ , $O_2$ ) в интервале давлений $10^{-3} \dots 10^{-1}$ Па	970	720
Откачка смесей активных газов при давлении $<10^{-3}$ Па	670	550
Откачка больших потоков водорода, содержащего незначительные примеси тяжелых газов		
Сверхвысоковакуумная откачка газовых смесей при давлении $10^{-7}$ Па и ниже	—	290
Откачка водорода при давлении до $10^{-1}$ Па при очень малой относительной концентрации примесных газов ( $<10^{-6}$ )	—	

Важным фактором, определяющим эксплуатационные характеристики средств откачки на основе нераспыляемых геттеров, является режим первичной и последующих активаций (регенерации). Цикл регенерации должен проводиться при заметном уменьшении коэффициента прилипания из-за насыщения геттера и после каждой его экспозиции в атмосфере.

Кроме того, в случае откачки преимущественно водорода периодическая регенерация необходима даже при сохранении геттером начальных вакуумных параметров во избежание отслаивания, растрескивания и шелушения геттерного слоя из-за водородного охрупчивания и термомеханических напряжений.

Предельно допустимая концентрация газа в слое геттера по критерию водородного охрупчивания не должна превышать  $(2,5 \dots 2,7)10^3 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{кг}$  (эмпирические оценки). Концентрация водорода к началу регенерационного цикла, обеспечивающая длительную работоспособность геттера, должна быть примерно вдвое меньше.

При активационном и регенерационных циклах доминируют диффузионный перенос и десорбция водорода. Поскольку скорость этих процессов определяется температурой, основными параметрами регенерационного цикла являются его продолжительность  $t_0$  и максимальная температура геттера  $T_{\max}$  (рис. 12.6).

Для избежания самоотравления геттера быстрота действия вспомогательного

насоса и скорость подъема температуры в процессе регенерации должны подбираться таким образом, чтобы давление над геттером не превышало  $10^{-2}$  Па. При выборе температурно-временного режима регенерации необходимо учитывать также термоциклическую усталость геттерного сплава. Максимальное число регенерационных циклов  $N$ , которое без растрескивания и шелушения способен выдержать геттерный слой, зависит от их суммарной продолжительности  $t$  и максимальной температуры (рис. 12.7).

Нераспыляемые геттеры устойчивы к воздействию корпускулярного и электромагнитного излучений. Это делает их особенно привлекательными при создании встроенных средств откачки газоразрядных приборов, термоядерных установок, ускорителей заряженных частиц.

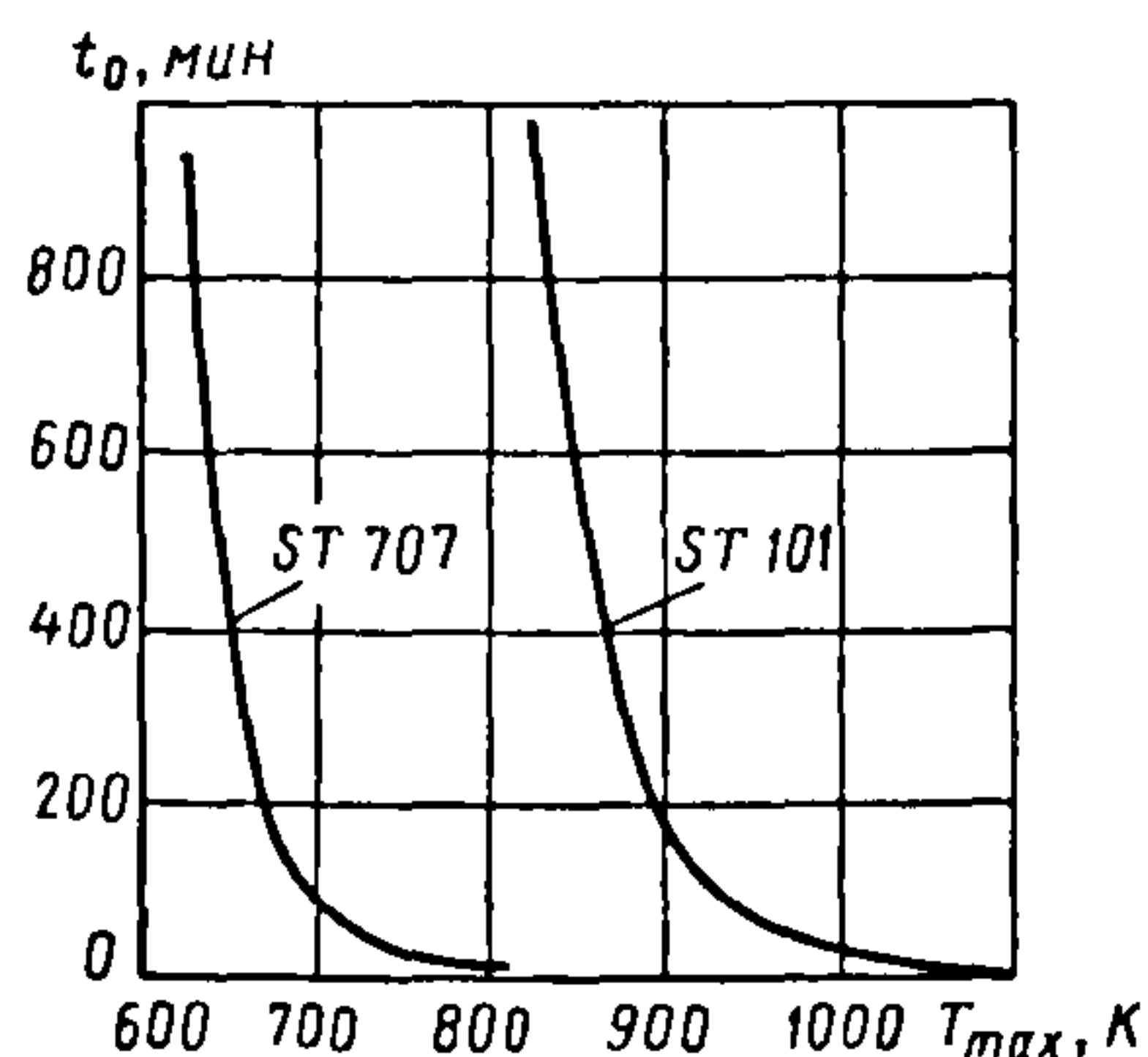


Рис. 12.6. Продолжительность цикла активации как функция от максимальной температуры геттера



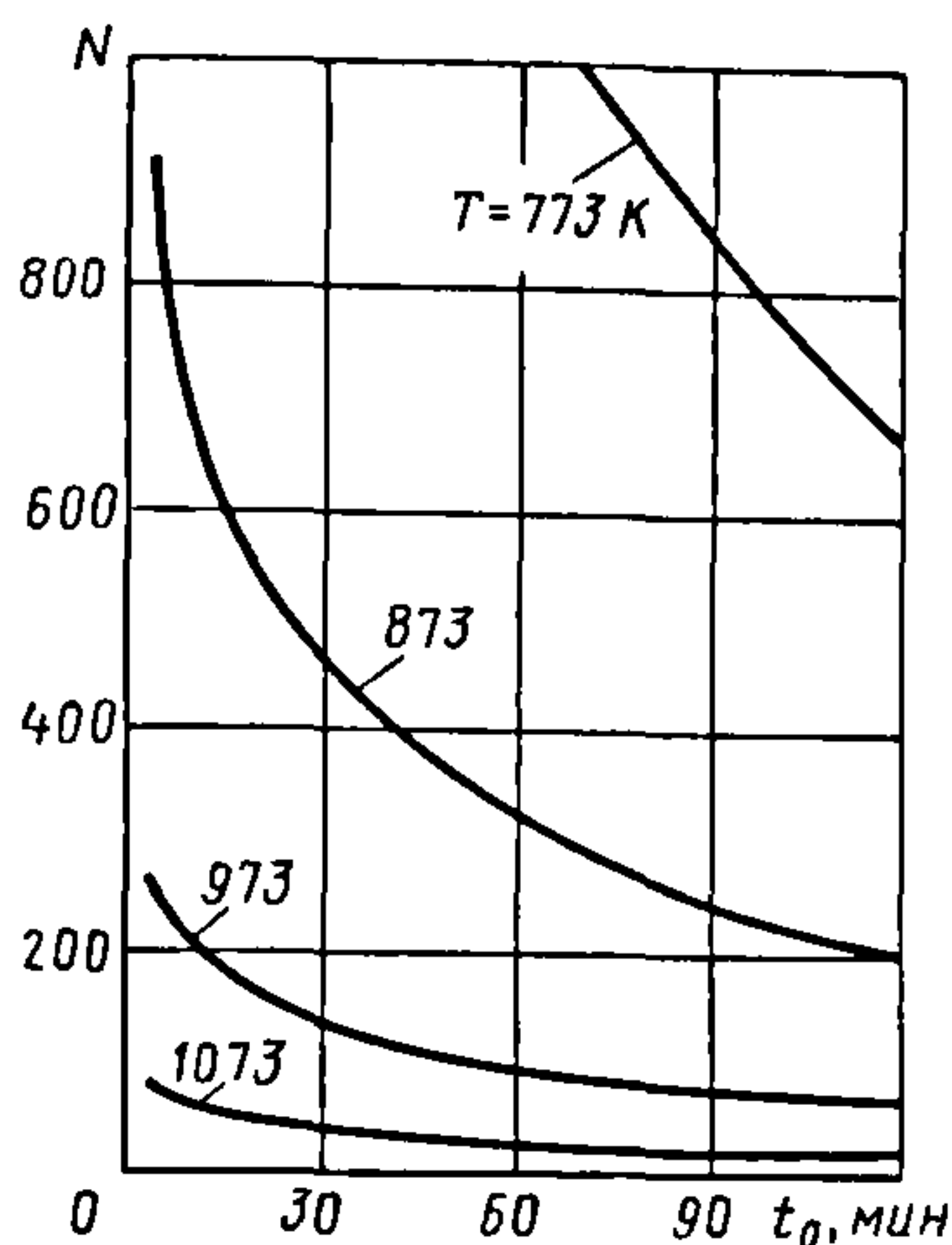


Рис. 12.7. Предельное число регенерационных циклов  $N$  по критерию термоциклической усталости для геттеров на основе циркония в зависимости от температуры и продолжительности цикла

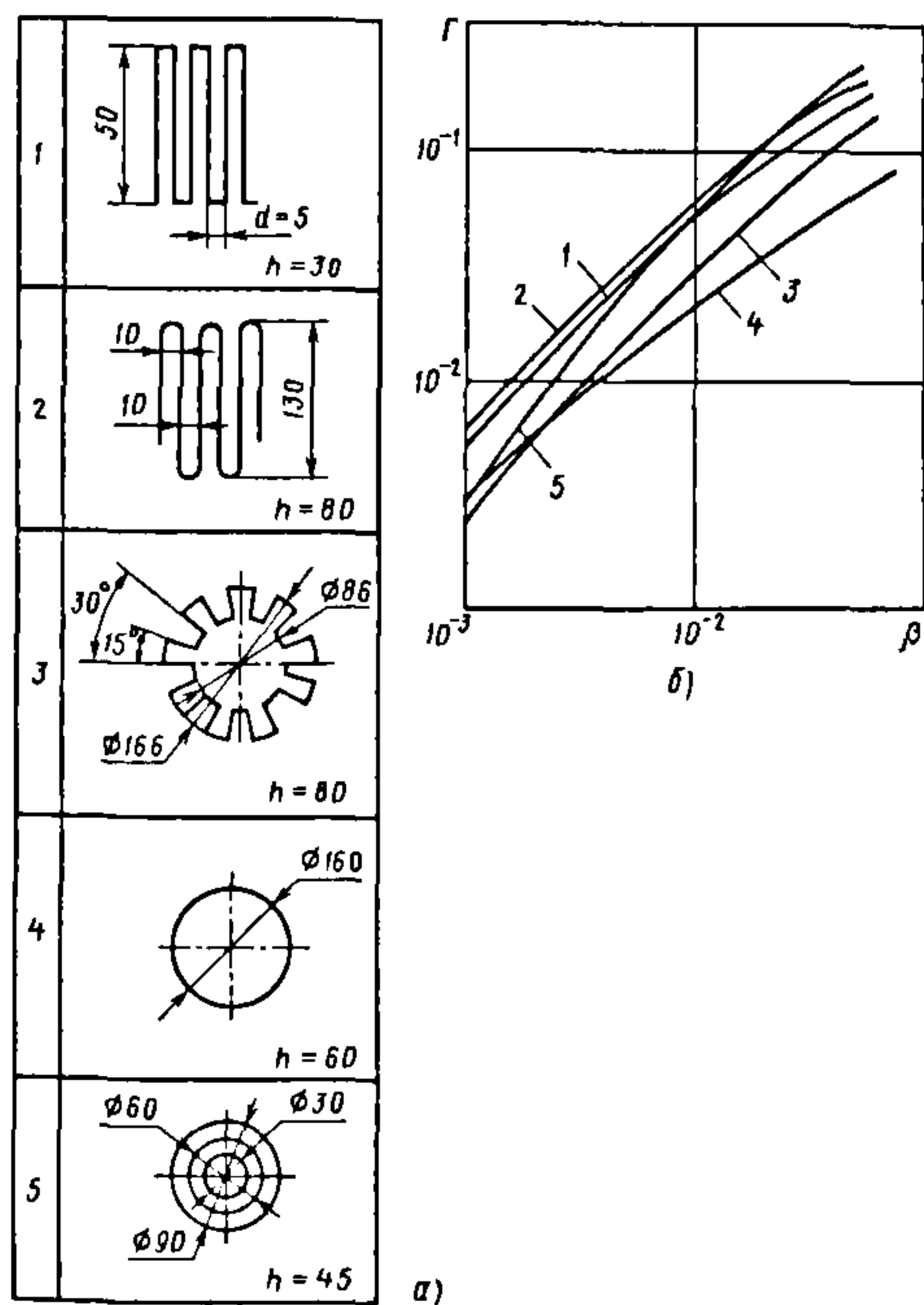


Рис. 12.8. Схемы сорбирующих структур-ловушек на основе нераспыляемых геттеров (а) и их коэффициенты захвата в функции от коэффициента прилипания (б): номера кривых соответствуют нумерации схем;  $h$  – ширина ленточной подложки

При неоспоримых эксплуатационных достоинствах НЛГ, к сожалению, имеют очень малые коэффициенты прилипания. Даже непосредственно после активации, т.е. в наиболее благоприятных условиях, максимальные значения  $\beta$  по водороду едва превышают 0,01.

Поэтому приемлемые значения коэффициентов захвата откачных средств на основе НЛГ могут быть достигнуты лишь формированием из ленточных геттеров молекулярных ловушек – коаксиальных цилиндров, спиралей, звездочек, П-образных конфигураций и т.п. (рис. 12.8, а). Влетая в такие структуры, газовые молекулы до обратного вылета претерпевают несколько соударений с сорбирующими стенками. Благодаря этому вероятность их поглощения геттером и, следовательно, коэффициенты захвата существенно возрастают (рис. 12.8, б).

Как видно из рис. 12.9, путем геометрической оптимизации подобных структур можно добиться примерно десятикратного увеличения быстроты действия на единицу площади. С учетом этих соображений на основе НЛГ разработаны и выпускаются промышленными сериями автономные насосы различных модификаций и модули, встраиваемые непосредственно в откачиваемые камеры.

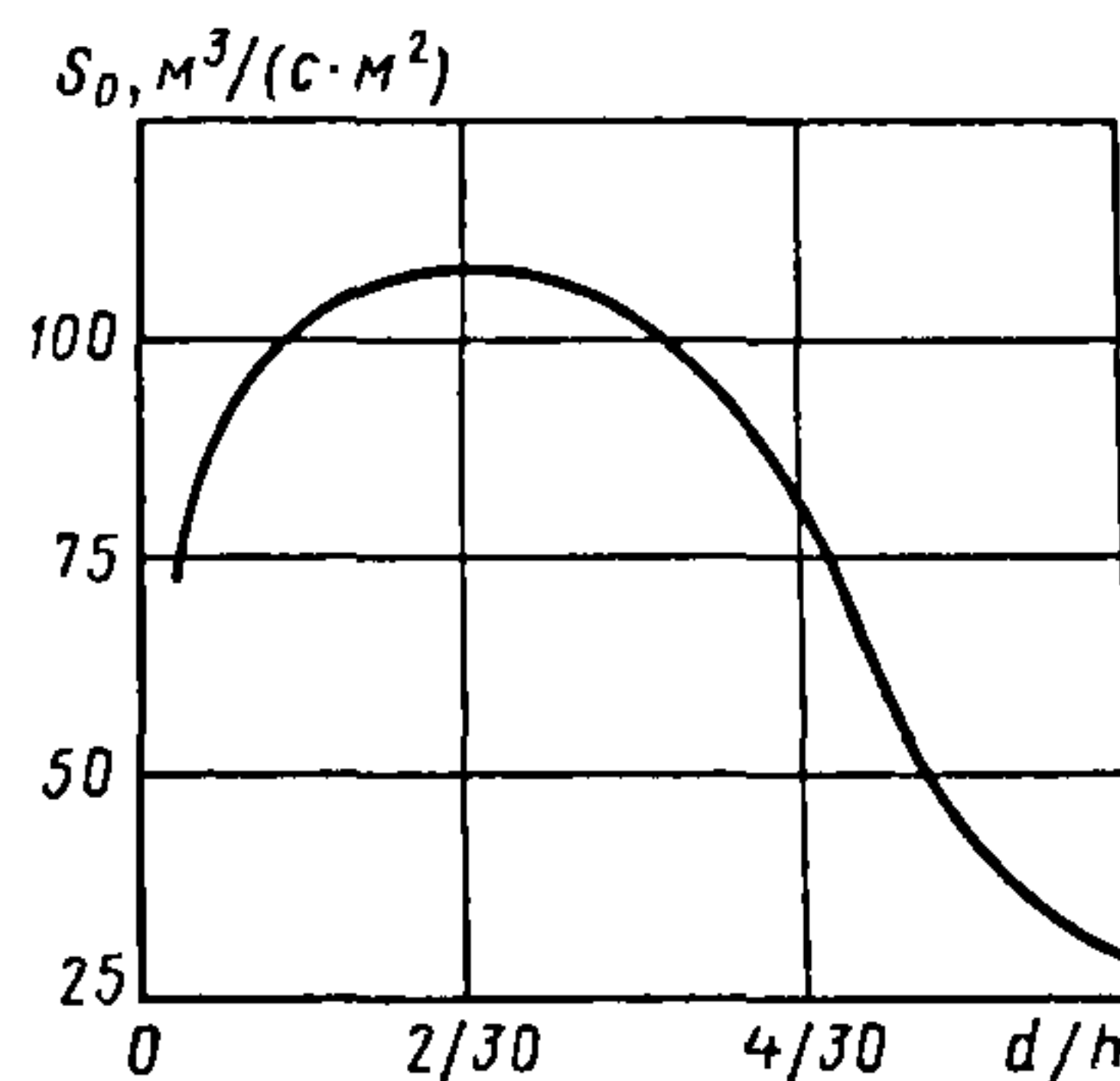


Рис. 12.9. Быстрота действия по противу геттерного модуля (поз. 1 на рис. 12.8, а) на единицу проективной площади как функция от геометрических соотношений

Основной элемент насосов – унифицированные цилиндрические патроны с ленточным геттером. Патроны набраны в блок и смонтированы на опорном фланце, по оси которого установлен сквозной резистивный нагреватель. Размеры патронов и их число в блоке определяют производительность насоса. Блок может размещаться в корпусе насоса или непосредственно в откачиваемой камере. Минимальная быстрота действия серийных насосов по водороду при рабочей температуре 293 К равна  $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ ; максимальная –  $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для откачки электровакуумных приборов и других реципиентов малого объема выпускаются миниатюрные геттерные насосы на основе сплавов циркония. Их быстрота действия до  $10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ; диапазон рабочих давлений  $10^{-7} \dots 10^3 \text{ Па}$ . С этой же целью разработаны насосы на основе высокопористого губчатого титана. Их основной функциональный элемент – геттерный штабик с запеченным алундированным резистивным нагревателем. Максимальное давление в насосах при откачке водорода  $10^{-1} \text{ Па}$ ; предельное остаточное давление при комнатной температуре  $10^{-7} \text{ Па}$ . Сорбционная емкость по азоту  $0,02 \dots 0,1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$  в зависимости от модификации насоса; сорбционная емкость по водороду на два-три порядка выше.

Для интегрированных вакуумных систем установок управляемого термо-

ядерного синтеза фирмой SAES Getters разработаны унифицированные промышленные модули на основе НЛГ П-образной формы из сплавов ST101 и ST 707 (рис. 12.10; табл. 12.14). Для придания механической жесткости каждое плечо модуля фиксируется на оси дистанционными втулками из алюмооксидной керамики. Геттерный слой с каждой стороны подложки имеет толщину 70 мкм, а сама константановая лента – 0,2 мм. Модули геометрически оптимизированы.

Сорбционная емкость по водороду,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}$ , лимитирована охрупчиванием: для одинарных модулей она близка к 140 (ST 101 WP 1250) и 150 (ST 707 WP 1250). Из отдельных модулей можно набирать геттерные панели с быстротой действия  $\sim 10 \text{ м}^3/\text{с}$  для откачки крупных установок. Панели представляют собой группу модулей, установленных между двумя ламелями на коробчатой раме; последняя одновременно выполняет функции теплового экрана.

Модульный принцип воплощен и в отечественных насосах на основе нераспыляемых геттеров (табл. 12.15). В насосе патронного типа применен титан-ванадиевый геттер с температурой активации  $350^\circ\text{C}$ , а в роторном насосе – геттер из высокопористого титана с температурой активации  $650^\circ\text{C}$ . Интервал рабочих давлений насосов  $10^{-7} \dots 10^{-3} \text{ Па}$ .

#### 12.14. Основные характеристики геттерных модулей на основе циркониевых сплавов

Марка модуля	Режим активации		Быстрота действия при различных рабочих температурах, $\text{м}^3/\text{с}$			
			$\text{H}_2$		$\text{CO}$	
	$T_{\text{макс}}, \text{K}$	$t_0, \text{мин}$	293 К	$\frac{673 \text{ K}^*}{553 \text{ K}}$	293 К	$\frac{673 \text{ K}}{553 \text{ K}}$
ST 101 WP 1250 ST 101 WP 1250/2	973	45	0,85	1,10	0,30	0,56
ST 707 WP 1250 ST 707 WP 1250/2	723	45	1,05	1,25	0,40	0,63

\*В числителе указана рабочая температура для модулей серии ST 101WP, а в знаменателе – для модулей серии ST 707WP.



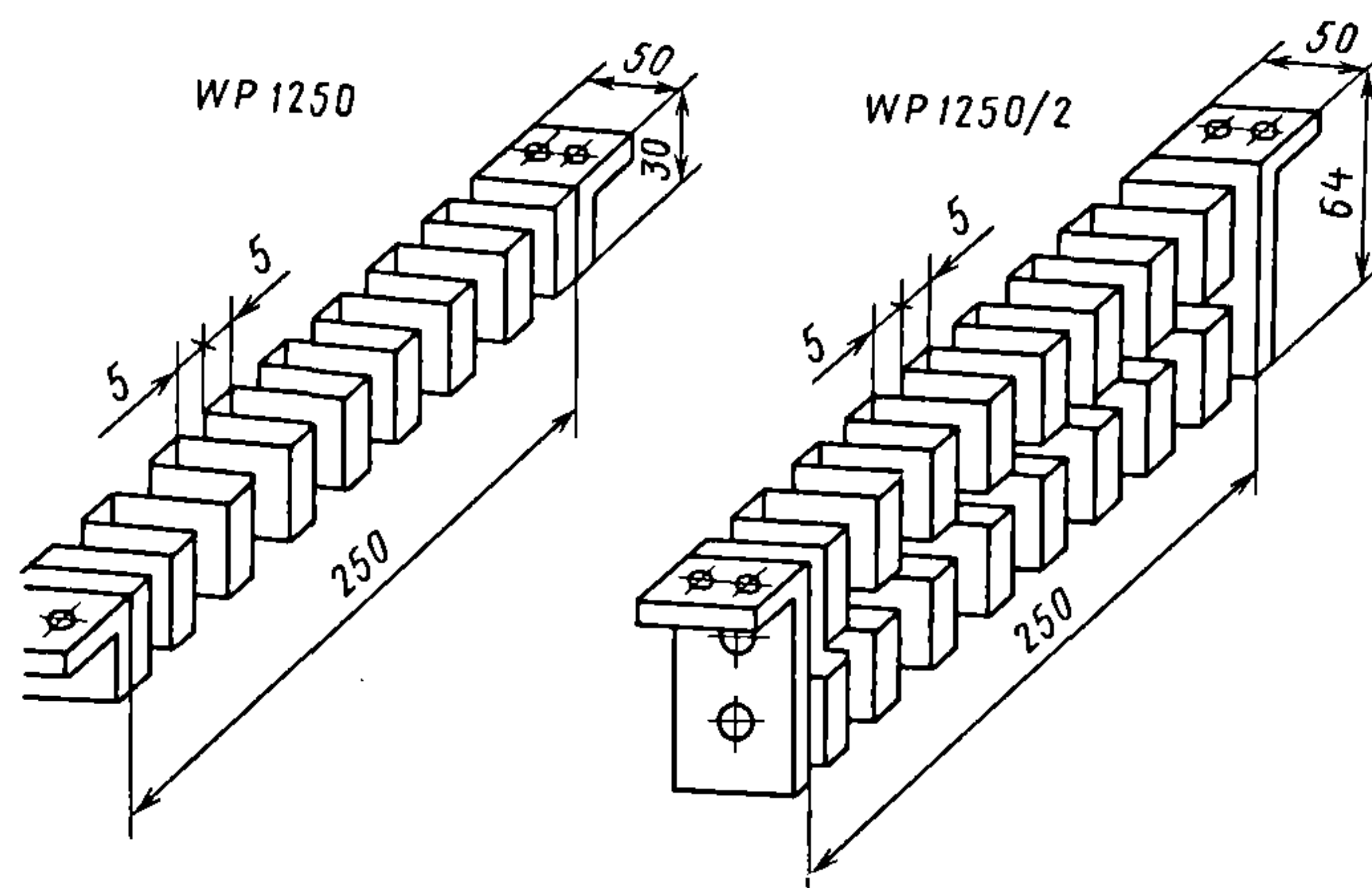


Рис. 12.10. Геттерные модули фирмы SAES Getters

### 12.15. Основные характеристики геттерных насосов на основе титановых сплавов

Тип насоса	Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с		Сорбционная емкость по противу, м <sup>3</sup> ·Па	Мощность, потребляемая при активации, кВт	Размеры, мм		Масса геттера, кг
	200 °С	20 °С			Внутренний диаметр	Высота	
Патронный	3,0	2,5	1500	1,1	90	450	0,8
Роторный	4,0	2,0	400	0,3	240	250	0,15

Применение нераспыляемых геттеров радикально упрощает и удешевляет интегрированный вакуумный тракт накопителей заряженных частиц. Остаточное давление  $<10^{-10}$  Па в малоапертурных протяженных камерах накопителей получают, напыляя геттерный сплав непосредственно на стенки вакуумной камеры.

Ранее вакуумирование осуществлялось с помощью распределенных встроенных магниторазрядных либо ленточных геттерных насосов. Новая технология вакуумирования реализована в уникальном ускорительно-накопительном комплексе ЛНС (ЦЕРН) – крупнейшем современном коллайдере тяжелых частиц, сооружение которого должно быть завершено в 2008 г.

В ходе рабочих циклов и при экспозиции геттерных модулей в воздухе в них необратимо сорбируются тяжелые активные газы. Поэтому быстрота действия и

сорбционная емкость модулей после регенерации меньше значений, характеризующих модули после первичной активации. Темп ухудшения вакуумных характеристик зависит от скорости накопления тяжелых газов и, стало быть, от состава откачиваемых газовых смесей.

Сорбционное «истощение» наступает к моменту поглощения геттерным слоем некоторого совокупного количества тяжелых газов (критического)  $G_{0\text{кр}} = \sum \xi_i G_{0i}$ , причем влияние  $i$ -го парциального компонента оценивается весовым коэффициентом  $\xi_i \leq 1$ .

Согласно эмпирическим оценкам критерий сорбционного истощения для геттерного сплава ST 101 имеет вид

$$G_{0\text{CO}} + G_{0\text{CO}_2} + G_{0\text{N}_2} + 0,26G_{0\text{H}_2\text{O}} + 0,1G_{0\text{H}_2\text{O}} \leq 290 \text{ м}^3\cdot\text{Па/кг}. \quad (12.12)$$

Накопление такого количества тяжелых газов необратимо уменьшает быстроту действия модуля примерно вдвое в сравнении с ее начальным значением.

Температура геттера, длительное время находящегося на воздухе, не должна превышать 320 К. При более высокой температуре возможны окисление и растрескивание геттерного слоя. Температура возгорания гидридов, образующихся при поглощении протия, составляет 773 (ST 101) и 623 К (ST 707). Попадание воздуха в вакуумную систему, содержащую включенный геттерный модуль, приводит к прожогам ленты, если ее температура выше 723 (ST 101) и 473 К (ST 707).

Вакуумные характеристики модулей после экспозиции на воздухе могут быть частично восстановлены путем более продолжительной регенерации при повышенной температуре (например, 2 ч при 1000...1020 К вместо стандартных 45 мин при 973 К).

Специфические вакуумные характеристики и эксплуатационные достоинства делают нераспыляемые геттеры перспективным средством высоко- и сверхвысоковакуумной откачки. Они применяются в электровакуумной технике, электронике, научном приборостроении, электрофизическом аппаратостроении, светотехнике.

Активно ведутся физико-технологические изыскания по созданию геттер-

ных сплавов с улучшенными вакуумными свойствами и большим ресурсом. Разрабатываются оптимизированные по составу и технологии нанесения сплавы и композиции, ориентированные на конкретные области применения и эксплуатационные условия.

К примеру, заметное улучшение характеристик специализированных геттеров для длительной откачки изотопов водорода дает нанесение на геттерный слой тонкой пленки палладия. Большой эффект обеспечивает применение нераспыляемых геттеров в блоке с турбомолекулярными и магниторазрядными насосами.

#### 12.4. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕТТЕРНЫЕ И ГЕТТЕРНО-ИОННЫЕ НАСОСЫ

Из числа известных модификаций испарительных насосов (ИН) в промышленных масштабах выпускается лишь небольшая часть. В зависимости от газовой нагрузки и необходимой степени разрежения требуемая скорость испарения геттера меняется в широких пределах. Как видно из табл. 12.16, в резистивных и электронно-лучевых испарителях ее можно варьировать от максимальной до нуля, уменьшая подводимую мощность и, соответственно, температуру поверхности испарения.

12.16. Сравнительные характеристики промышленных испарителей

Тип испарителя	Скорость испарения, мг/(с·см <sup>2</sup> )	Максимальное давление, Па	Энергетическая эффективность, мг/(с·Вт)	Коэффициент использования геттера*
Резистивный:				
прямонакальный	0...10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-3</sup>	До 0,4
косвенного накала		До 5		До 0,7
Электронно-лучевой	0...10	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-2</sup>	До 0,9
Дуговой	(3...20) мг/с	До 10	1...10	

\* Отношение массы испаренного геттера к моменту выхода испарителя из строя к его начальной массе.



Однако режим пониженной мощности энергетически невыгоден. В большинстве случаев значительно эффективнее периодическое напыление геттерных пленок в наиболее выгодном для испарителя температурном режиме. Продолжительность напыления зависит от площади и температуры поверхности осаждения геттера, скорости испарения, рода откачиваемого газа. При адсорбционном захвате газовых молекул длительность включения испарителя намного меньше, чем в условиях диффузионного переноса сорбата в глубь геттерной пленки. Продолжительность паузы между циклами испарения лимитируется насыщением пленки.

Периодический режим испарения в большинстве случаев целесообразен при рабочих давлениях  $< 10^{-4}$  Па. В сверхвысоковакуумных установках, работающих без напуска газа, например, в электронных накопителях и коллайдерах, типичен режим однократного напыления продолжительностью в несколько минут в течение 20...30 сут. эксплуатации.

Важнейший функциональный элемент ИН-испаритель. Он определяет максимальную производительность насоса, его ресурс, предельно допустимое давление запуска. Наиболее распространены резистивные испарители различных модификаций.

В отечественных насосах типа ГИН и НИБ прямонакальный испаритель выполнен из биметаллической проволоки: на вольфрамовый kern диаметром  $d$  йодидным способом осажден слой титана толщиной  $0,5d$ . Рабочий ток до 200 А; мощность, необходимая для испарения титана с предельной скоростью,  $18 \text{ Вт/см}^2$ .

Зарубежные фирмы выпускают унифицированные проволочные испарители из титан-молибденового сплава, содержащего ~ 85 % титана. Испарители представляют собой спиральки, установленные на стандартных фланцах с токоподводами. Масса распыляемого титана составляет 1,5...3 г; рабочий ток 30...60 А при напряжении 3...8 В.

Резистивные прямонакальные испарители предельно просты по конструкции и схеме электропитания, но имеют низкий коэффициент использования геттерного материала и малый ресурс. Несколько лучшими эксплуатационными характеристиками обладают резистивные испарители косвенного нагрева. В этих испарителях цилиндрическая или сферическая оболочка из геттерного материала нагревается потоком лучистой энергии с поверхности проволочного нагревателя в ее полости.

Типичный представитель таких устройств – испаритель Ti-Ball™ (фирма Varian). Он представляет собой полую сферу из титана диаметром 32 мм, посредством четырех проволочных держателей и резьбовой втулки установленную на стандартном фланце; внутри втулки проходят токоподводы к нагревателю. Начальная масса титановой сферы 50 г, из которых 35 г – масса испаряемого титана. Скорость испарения может регулироваться в пределах  $3 \cdot 10^{-3} \dots 0,15 \text{ мг/с}$  (рис. 12.11).

Максимальное рабочее давление, Па (мг/с), зависит от скорости испарения  $g$  и для стандартной газовой среды составляет 0,3 (0,15), 3 (0,06) и 7 (0,03). В среде аргона испаритель может эксплуатироваться при давлении до 10 Па. Испарители косвенного

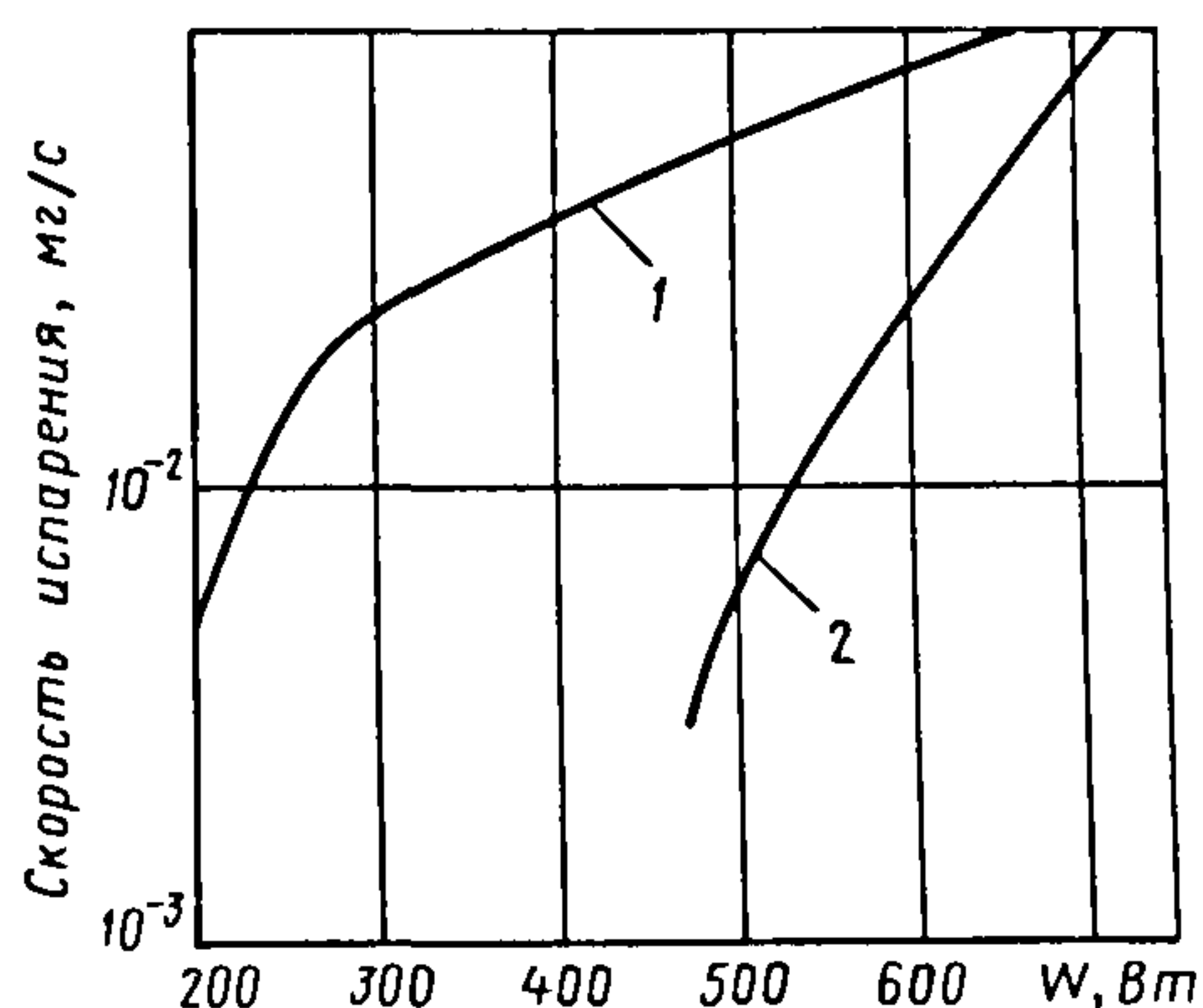


Рис. 12.11. Скорость испарения титана в испарителе Ti-Ball™ как функция подводимой мощности  $W$  для циклического (кривая 1) и непрерывного (кривая 2) нагрева



накала, как правило, взаимозаменяемы с прямонакальными испарителями и komponуются с магниторазрядными насосами фирм-изготовителей.

Лучшими энергетическими характеристиками и наибольшим коэффициентом использования геттерного материала отличаются электронно-лучевые и дуговые испарители.

Типична следующая компоновочная схема электронно-лучевого испарителя. Анодный стержень из титана нагревают сфокусированным пучком электронов, эмитируемым неподвижным термоэлектронным катодом. По мере испарения расплавленного торца стержень перемещают с помощью винтового механизма так, что взаимное положение анода и катода остается неизменным. Это обеспечивает эффективную фокусировку электронного пучка и поддержание необходимой температуры в зоне испарения при относительно малых затратах мощности (2 кВт при скорости испарения 0,3 мг/с); полезный запас титана составляет  $\sim 10^2$  г. Обычно электронно-лучевые испарители используются в ИН с быстротой действия  $\sim 10^3$  с.

Высокоэффективны плазменные источники геттерных пленок. Их физическую основу составляет дуговой разряд (вакуумная дуга) между катодом, выполненным из геттерного материала, и анодным электродом; разряд горит в парах геттера независимо от давления остаточных газов. Непосредственным источником паров являются так называемые катодные пятна, возникающие на поверхности интенсивно охлаждаемого катода, а также летящие микрокапли, «разбрызгиваемые» катодными пятнами.

Катодные пятна имеют сложную неустойчивую структуру. Они состоят из отдельных спонтанно возникающих и гаснущих элементарных ячеек с относительно коротким временем жизни, зависящим от теплофизических свойств материала катода; плотность разрядного тока в ячейках порядка  $10^{10}$  А/м<sup>2</sup>, а их температура — несколько тысяч градусов.

На катоде происходит непрерывное обновление зон существования элементарных ячеек. В результате этого пятна беспорядочно перемещаются по поверхности катода, а его температура в среднем остается намного ниже температуры плавления.

При разрядном токе, превышающем некоторую критическую величину, вакуумная дуга устойчива и может гореть неопределенно долгое время. Эта величина зависит от материала катода, межэлектродного расстояния и параметров внешней электрической цепи. При межэлектродном расстоянии масштаба сотен миллиметров критический ток составляет 130...150 А (титан), 180...200 А (молибден); он растет с увеличением температуры кипения и снижением теплопроводности материала. Скорость испарения не зависит от давления газа в разрядном промежутке, формы и размеров катода; она определяется лишь теплофизическими характеристиками, температурой катода и разрядным током. В среднем она близка к  $10^{-4}$  г на кулон эмитированного заряда. Для титана скорость испарения, г/с, составляет

$$g = 2,25 \cdot 10^{-3} \exp(6 \cdot 10^{-3} I), \quad (12.13)$$

где  $I$  — разрядный ток, А.

Однако при значительном увеличении разрядного тока интенсифицируется капельное разбрызгивание геттера и ресурс испарителя резко падает.

Устойчивость дугового разряда существенно возрастает при наложении внешнего магнитного поля. При этом критический ток уменьшается до 70 А (титан).

Для поддержания дугового разряда необходим источник тока с падающей вольт-амперной характеристикой. Для титанового катода напряжение холостого хода составляет 60...70 В; падение потенциала на разрядном промежутке — около 20 В. При увеличении давления до 10 Па падение потенциала возрастает до 45 В.

Для инициирования зажигания дуги в межэлектродное пространство должно быть инжектировано некоторое число



заряженных частиц (*форплазма*). С этой целью обычно используют: 1) резистивный нагрев малой области катода или 2) электрический взрыв проводящей пленки вблизи его поверхности.

В первом случае металлический поджигающий электрод вводят в кратковременное соприкосновение с катодом, пропуская через зону контакта электрический ток. В результате быстрого нагрева происходят испарение этой зоны и частичная ионизация металлических паров, достаточные для инициирования дуги.

Во втором случае на нерабочей поверхности катода устанавливают керамическую вставку с армированными торцами, а на ее поверхности создают начальный проводящий слой, например графитизацией. При подаче высоковольтного импульса происходит электрический взрыв этого слоя, что и возбуждает дугу. В дальнейшем проводящий слой на вставке самовосстанавливается благодаря ее запылению катодным веществом.

Таким образом, ИН с плазменным источником геттерных пленок представляет собой двухэлектродную систему с охлаждаемым катодом из геттерного материала и источником форплазмы, окруженную поверхностью осаждения геттерных пленок. В большинстве конструкций такой поверхностью и одновременно анодным электродом служит заземленный корпус насоса. Около 70 % тепловой мощности разряда выделяется на анодном электроде. При давлении  $< 5 \dots 8$  Па эта мощность распределена по всей поверхности анода. При более высоком давлении линии тока локализуются в зонах, электрически ближайших к катоду, что может привести к их проплавлению. Поэтому запуск дуговых насосов с корпусом-анодом допустим только с давления  $< 10$  Па.

В практике применения дуговых насосов необходимо учитывать сильное влияние на поведение катодных пятен внешних магнитных полей, включая поля токоподводящих проводов.

В сравнении с ИН и других типов плазменные средства откачки отличаются

повышенными производительностью, ресурсом и давлением запуска, эксплуатационной гибкостью и надежностью, нечувствительностью к аварийному попаданию атмосферы. Катодным рабочим поверхностям можно придавать различную пространственную форму. Все это делает их совместимыми с откачиваемыми объектами произвольной конфигурации.

Широко распространены насосы и интегрированные вакуумные системы, а также напылительные установки с квазиточечными, протяженными и плоскими катодами. Их недостатки — избыточный расход геттера, броски давления при включении испарителя, наличие кластеров и капельной фазы — могут быть в значительной степени устранены магнитной стабилизацией разряда, переходом к импульсному и импульсно-периодическому режимам испарения, применением геттерных катодных материалов с уменьшенным содержанием газовых примесей, магнитной сепарацией генерируемых мультифазных потоков геттерного вещества.

Важнейшие характеристики двух опытно-промышленных модификаций ИН сведены в табл. 12.17 и 12.18.

Насосы серии НИБ на базе резистивных прямонакальных испарителей предназначены для сверхвысоковакуумной откачки активных газов (табл. 12.17). В цилиндрическом корпусе, состоящем из двух профилированных тонкостенных обечаек из коррозионно-стойкой стали, соединенных точечной сваркой, установлены блок биметаллических (Ti-Mo) нитей-испарителей и поворотный жалюзийный экран для защиты реципиента от паров геттера. Нити закреплены на общем фланце и имеют независимое электропитание. Насосы могут охлаждаться водой или жидким азотом; предельное остаточное давление составляет соответственно  $10^{-6}$  и  $10^{-8}$  Па.

Высокотемпературную тренировку корпусов насосов НИБ-1, НИБ-2 и НИБ-10 осуществляют подачей на испаритель пониженной мощности; корпуса насосов

## 12.17. Основные характеристики испарительных геттерных насосов серии НИБ

Характеристика	Модель насоса				
	НИБ-1	НИБ-2	НИБ-10	НИБ-20	НИБ-50
Быстрота действия при охлаждении, м³/с:					
водой:					
по азоту	1	3	10	30	60
по водороду	2	6	20	50	100
жидким азотом:					
по азоту	2	4	15	40	70
по водороду	4	10	40	100	200
Диаметр входного отверстия, мм	160	260	500	800	1200
Час автономных испарителей в блоке	2		4	7	
Начальная масса титана в блоке, г	5	10	100	170	
Скорость испарения для одного испарителя, мг/с	0,1		0,5		
Ресурс при откачке азота при давлении 4·10 <sup>-5</sup> Па, ч	750	500	1500	850	500
Диаметр Ti-Mo проволоки испарителя, мм	1,5±0,05		3,0±0,05		
Мощность, подводимая к одной нити в процессе испарения, кВт	0,3±±0,01	0,6±±0,03	1,7±0,1		
Запас жидкого азота в насосе, л	2,0	11,0	20	75	130
Масса насоса, кг	15	55	120	400	720

## 12.18. Основные характеристики испарительных геттерных насосов серии НДМ

Характеристика	Модель насоса					
	НДМ-2	НДМ-5	НДМ-10	НДМ-20	НДМ-50	НДМ-150
Быстрота действия при охлаждении, м <sup>3</sup> /с:						
водой:						
по азоту	4	10	15	25	60	150
по водороду	5	13	18	30	75	200
жидким азотом:						
по азоту	5	15	20	30	80	200
по водороду	12	35	50	70	200	500
Диаметр входного отверстия, мм	250	400	500	630	1000	1600
Начальная масса титана, кг	0,3		1,4	4,0	4,8	8,0
Ресурс испарителя при откачке азота при давлении $4 \cdot 10^{-5}$ Па, ч	2500	1000	1500	2500	1800	1250
Длительность цикла испарения в режиме периодического напыления, с	5	10	20	30	80	150
Масса насоса, кг	60	150	200	330	650	2000



НИБ-20 и НИБ-50 с этой целью снабжены встроенными проволочными нагревателями мощностью 9 и 15 кВт.

По сходной компоновочной схеме выполнены и насосы серии НДМ на базе плазменного испарителя (см. табл. 12.18). Он установлен на съемном фланце на днище насоса. Стартовый плазменный сгусток генерируется при высоковольтном пробое самовосстанавливающегося проводящего слоя на поверхности керамической вставки. Титановый катод и его водоохлаждаемое основание из меди окружены экраном с «плавающим» потенциалом, локализирующим поверхность испарения.

Предельное остаточное давление насосов близко к  $5 \dots 10^{-6}$  (водяное охлаждение) и  $2 \dots 10^{-8}$  Па (охлаждение жидким азотом). При среднем давлении в откачиваемой камере  $10^{-5}$  Па пауза между последовательными включениями испарителя составляет несколько часов.

Насосы, основанные на термическом, плазменном или лучевом осаждении геттера на сорбционных панелях, непригодны для откачки газовых сред, содержащих примесные инертные газы и легкие углеводороды. В таких ситуациях ИН следует

использовать совместно с насосами, способными откачивать инертные газы, например с турбомолекулярными либо магниторазрядными.

Более универсальны испарительные геттерно-ионные насосы, в которых одновременно с испарением геттера происходят ионизация инертных газов и их имплантационная откачка. Для реализации этих процессов обычно используют термоэлектронные пучки в диодных или более сложных системах.

В широко распространенных отечественных насосах серии ГИН с этой целью применен ионизатор, состоящий из прямонакального вольфрамового катода и анодной сетки из молибденовой проволоки. На сетку подают положительный потенциал 1,2 кВ. Коллектором образующихся ионов служат стенки насоса, запыляемые геттерной пленкой. Анодную сетку используют также в качестве прямонакального нагревателя для обезгаживания насоса.

Насосы выполнены на базе проволочных титан-молибденовых испарителей. Они предназначены для высоко- и сверхвысоковакуумной откачки воздуха и других смесей с небольшим содержанием

**12.19. Основные характеристики испарительных геттерно-ионных насосов серии ГИН**

Характеристика	Модель насоса			
	ГИН-005Р	ГИН-05-1М	ГИН-2	ГИН-5
Быстрота действия, $\text{м}^3/\text{с}$ :				
по азоту	—	0,6	2,4	5,0
по водороду	$2 \cdot 10^{-2}$	1,5	6,0	20,0
по воздуху	$5 \cdot 10^{-3}$	0,45	1,8	4,5
Диаметр входного отверстия, мм	—	160	260	500
Количество шпилек	1	2	3	6
Ресурс при откачке азота при давлении $4 \cdot 10^{-5}$ Па, ч	600	1500	3000	
Диаметр Ti-Mo проволоки, мм	2		3	
Потребляемая мощность, кВт	0,13	0,85	3,5	3,5
Расход хладагента, $\text{м}^3/\text{ч}$	—	0,3	0,6	0,6
Масса насоса, кг		36	100	216

инертных газов (табл. 12.19). На торцовом фланце цилиндрического водоохлаждаемого корпуса смонтирована электродная система, включающая в себя в зависимости от производительности насоса от двух до шести прямонакальных испарителей и описанный выше ионизатор.

Испарители представляют собой V-образную биметаллическую шпильку диаметром 2...3 мм; они срабатывают поочередно. Корпус снабжен патрубком для предварительной откачки или подсоединения вспомогательного высоковакуумного насоса, интенсифицирующего откачку инертных газов. Насосы средней производительности выполнены разборными для оперативной смены шпилек и очистки стенок; малый насос ГИН-005Р имеет неразборную конструкцию. Предельное остаточное давление насосов  $10^{-7}$  Па; давление запуска  $\leq 10^{-1}$  Па.

Для тренировки и финишной откачки электровакуумных приборов повышенной надежности разработаны экономичные миниатюрные геттерно-ионные насосы с быстротой действия  $10^{-4} \dots 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. В качестве геттера в них используют редкоземельные металлы гадолиний и эрбий. Их сублимацию осуществляют электронным пучком. Такие насосы применяют также для поддержания вакуума в отпаянных приборах.

Значительно большей производительностью по инертным газам обладают электростатические геттерно-ионные насосы – орбитроны (рис. 12.12). В орбитронах существенно увеличены длина пробега электронов и, следовательно, вероятность ударной ионизации газовых молекул. Эффект достигается радиальной и осевой асимметризацией управляющего электростатического поля. Электроны эмитируются одним или несколькими прямонакальными катодами в торцовой части корпуса, ориентированными под небольшим углом относительно направления на анод. Для предотвращения «перехвата» электронов корпусом на катод подают положительное смещение 50...250 В.

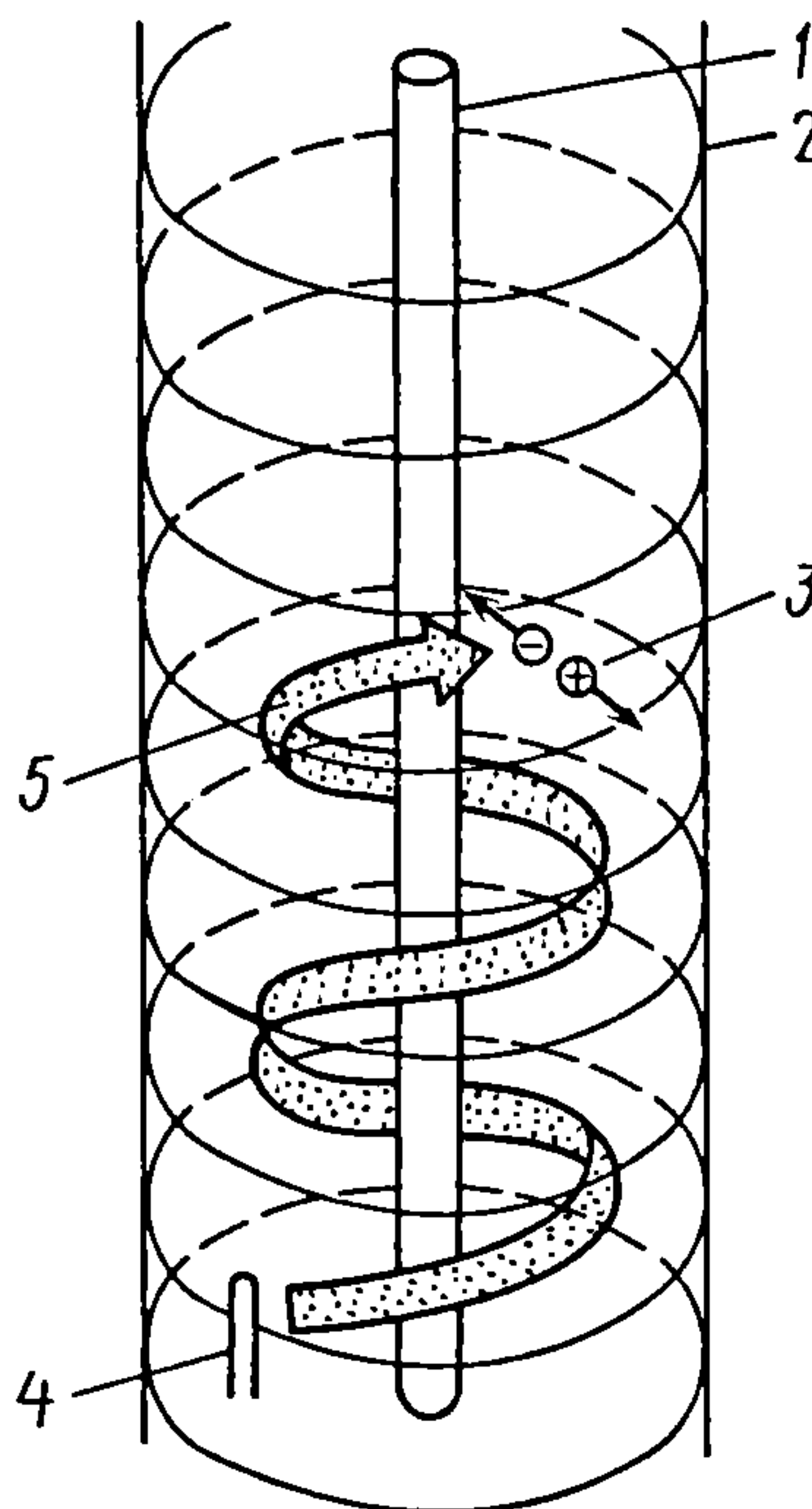


Рис. 12.12. Схема, поясняющая принцип действия орбитрона:

- 1 – стержневой анод; 2 – коллектор ионов;
- 3 – акт ударной ионизации газовой молекулы;
- 4 – катод; 5 – траектория электронного пучка

Со стороны входного сечения насоса обычно устанавливают экран. Он отражает электроны в пространство ионизации и защищает откачиваемую камеру от запыления геттером и теплового излучения.

В полости насоса электроны движутся по трехмерным траекториям вокруг и вдоль анода, ионизируя газовые молекулы. Часть электронов попадает на анод, приводя к его разогреву и сублимации закрепленных на нем штабиков геттера. Коллектором образующихся газовых ионов служит вкладыш, охлаждаемый жидким азотом, либо непосредственно стенки насоса, запыляемые пленками геттера. Быстрота действия орбитрона по инертным газам определяется соотношением

$$S = (10^{-6} I_e / e) \lambda \sigma \beta, \quad (12.14)$$

где  $I_e$  – электронный ток, А;  $e$  –  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $\lambda$  – средняя длина пробега электронов, см;



$\sigma$  – усредненное сечение ударной ионизации атомов инертных газов,  $\text{см}^2$ ;  $\beta$  – вероятность захвата образующихся ионов стенками.

Орбитроны работают от источников постоянного или переменного тока. В последнем случае быстрота действия по инертным газам снижается примерно вдвое. Для активных газов она остается практически неизменной. Относительная быстрота действия по индивидуальным газам в среднем составляет: 1,0 (азот); 1,5...1,8 (водород); 0,6...0,8 (воздух);  $1,6 \cdot 10^{-2}$  (аргон).

Орбитроны выпускаются небольшими сериями. Отечественный насос СОН-А-1 имеет предельное остаточное давление  $< 10^{-9}$  Па при охлаждении сорбционной поверхности жидким азотом и  $\sim 10^{-7}$  Па при водяном охлаждении; его быстрота действия по азоту близка к  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ; ресурс при давлении  $1 \cdot 10^{-5}$  Па составляет 2000 ч.

Самый крупный зарубежный насос имеет быстроту действия по воздуху  $30 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Разработки новых модификаций орбитронов направлены на увеличение их ресурса и быстроты действия по инертным газам.

## 12.5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ НАСОСАХ

Основу функционирования магнитных электроразрядных насосов (МЭРН) составляют несколько взаимосвязанных физико-химических процессов [18; 60; 61]. Это:

- самостоятельный газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях;
- ионное распыление электродов;
- сорбция активных газов осаждающимися металлическими пленками;
- имплантация нейтральных и ионизированных частиц;

– неупругие взаимодействия ионов газа и нейтральных молекул;

– диффузионный перенос и растворение сорбированных газов в толще электродов;

– реэмиссия поглощенных газов в результате термодесорбции и распыления электродов; вторично-эмиссионные и теплофизические процессы.

Основные события разыгрываются в полости двухэлектродной системы, помещенной в магнитное поле с индукцией  $\sim 0,1$  Тл; межэлектродную разность потенциалов выбирают обычно в пределах 3,5...7,0 кВ. Для поддержания разряда структура электродной системы должна удовлетворять определенным условиям: анод должен быть параллелен магнитным силовым линиям, а катоды, напротив, их пересекать, формируя потенциальные ловушки для электронов; межэлектродное пространство должно допускать азимутальный, осевой и радиальный дрейфы электрических зарядов.

Этим условиям отвечают электродные системы нескольких конфигураций (рис. 12.13). Исторически первой была ячейка Пеннинга (рис. 12.13, а) – цилиндрический анод и торцевые катодные пластины. Плазменный столб в ячейке имеет цилиндрическую форму. В монополярных магнетронных ячейках область, занимаемая плазмой, имеет форму полого цилиндра (рис. 12.13, б, в). В сферической (рис. 12.13, г) и мультиполярной (рис. 12.13, д) ячейках формируются тороидальные плазмоиды.

Механизм разряда в МЭРН качественно одинаков для электродных систем различной конфигурации. Поскольку широкое промышленное применение нашли лишь насосы на основе ячеек Пеннинга, рассмотрим этот механизм на примере именно таких ячеек (рис. 12.14).

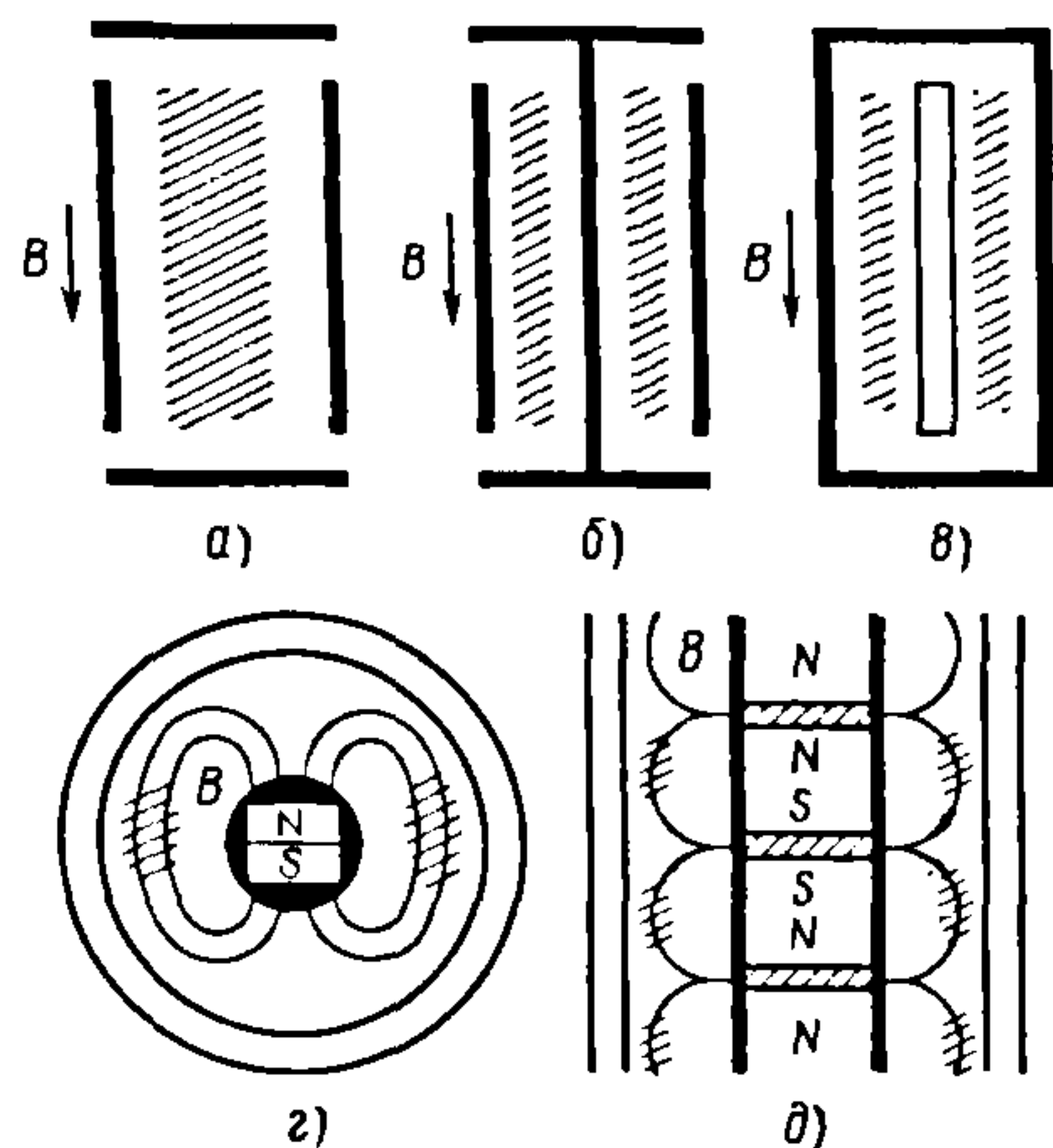


Рис. 12.13. Варианты электродных систем магнетронных насосов:

*a* – ячейка Пеннинга; *b* – магнетронная ячейка; *в* – инверсно-магнетронная ячейка; *г* – сферическая ячейка; *д* – мультипольная магнетронная ячейка. Катоды зачернены; аноды показаны двойной линией; область, занятая плазмой, заштрихована; *B* – магнитная индукция

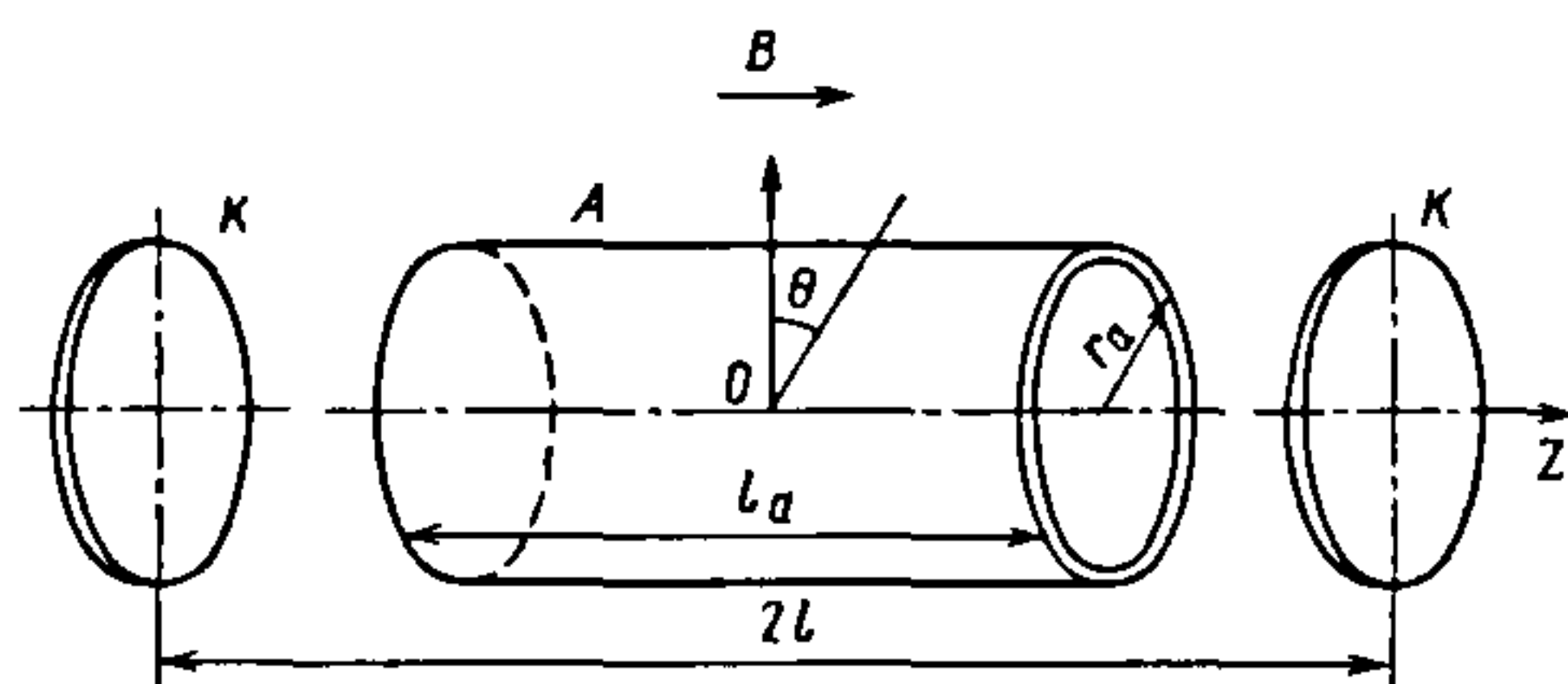


Рис. 12.14. Схема разрядной ячейки Пеннинга:

*A* – анод; *K* – катоды

Разряд Пеннинга возбуждается и устойчиво поддерживается в очень широких диапазонах напряженностей электрического и магнитного полей и давления газа. Первичная ионизация газовых молекул и зажигание разряда происходят под воздействием случайных электронов, оказавшихся в разрядном промежутке при подаче на электроды электрического напряжения.

Стартовый период, т.е. продолжительность развития разряда от момента первичной ионизации до установления квазистационарного режима, обратно

пропорционален молекулярной концентрации газа. При давлении 0,1 Па стартовый период пренебрежимо мал, тогда как при сверхвысоком вакууме он составляет сотни секунд. Газоразрядная плазма удерживается радиальным электрическим и продольным (осевым) магнитным полями; в торцовых областях электрическое поле имеет также продольную компоненту.

Указанная конфигурация определяется геометрией разрядного промежутка и влиянием пространственного заряда: в полости ячейки он имеет отрицательный знак, поскольку время жизни ионов  $\tau_i$  при низком давлении существенно меньше времени жизни электронов  $\tau_e$ . Формирование объемного заряда предшествует зажиганию разряда.

Под действием продольной компоненты электрического поля электроны колеблются между катодными пластинами вдоль оси *Z*;  $\tau_e$  обратно пропорционально молекулярной концентрации. Электроны движутся также по циклоидальным траекториям в плоскости *rθ* вокруг силовых линий магнитного поля и одновременно дрейфуют к аноду вследствие соударений с газовыми молекулами. При достаточном анодном потенциале  $U_a$  эти соударения вызывают ионизацию молекул. Образующиеся ионы уходят на катодные пластины.

Влияние магнитного поля на их траектории сравнительно невелико; оно вызывает лишь небольшие осцилляции ионов периферийной зоны разряда относительно оси ячейки в плоскости *rZ*. Плоскость колебаний прецессирует в азимутальном направлении. Влияние магнитного поля становится заметным при условии  $Br_a > 2 \cdot 10^3$  Тл·м;  $U_a = 5 \dots 7$  кВ. Ионы, образовавшиеся на оси, имеют строго прямолинейные траектории.

Бомбардируя катодные пластины, ионы вызывают их распыление; частично падающие ионы внедряются в кристаллическую решетку. Одновременно из металла выбиваются вторичные электроны, что



компенсирует уход электронов из газоразрядной плазмы на анод.

Таким образом, в разрядной цепи устойчиво поддерживается электрический ток, пропорциональный концентрации газовых молекул. Энергия, расходуемая на ионизацию газа, распыление катодных пластин, вторично-эмиссионные процессы и нагрев электродов, черпается из источника электропитания. При увеличении давления примерно до 1 Па разряд переходит в тлеющий, а при достаточной мощности источника питания – в дуговой. Эта опасность устранена в электродных системах с перфорированными катодами.

К настоящему времени вполне законченный вид получила лишь теория стационарного пеннинговского разряда. Интерпретация его динамических форм, представляющих наибольший практический интерес, носит преимущественно качественный характер. Поэтому проектирование и инженерные расчеты МЭРН опираются в значительной степени на эмпирические соотношения.

Определяющими для развития разряда являются области, прилегающие к оси ячейки и к плоскости симметрии электродной системы (плоскость  $O\theta$  на рис. 12.14). Электрический потенциал  $U(r)$  в этой плоскости имеет параболическое распределение вида

$$U(r) = U_0[1 - (r/l)^2] + (U_a - U_0)(r/r_a)^2, \quad (12.15)$$

где  $U_0$  – потенциал в центре разрядного промежутка.

Потенциал зажигания разряда сложным образом зависит от рода газа и электрофизических параметров  $B$ ,  $U_0$ ,  $U_a$ . В слабых магнитных полях потенциал зажигания резко падает с увеличением поля. Его минимальное значение для азота отвечает магнитной индукции  $\sim 0,02$  Тл. При повышении индукции он начинает медленно возрастать, оставаясь близким к 1 кВ. Потенциал зажигания зависит также от материала катодных пластин, повышаясь на  $\sim 30\%$  в ряду *алюминий – цирконий –*

*титан – тантал – молибден*. При прочих равных условиях потенциал зажигания минимален в электродных системах, размеры которых подчинены соотношениям

$$0,65 \leq l_a/2r_a \leq 1,1; \quad 0,4 \leq l_a/2l \leq 0,7$$

(см. рис. 12.14).

В слабых магнитных полях при давлении  $< 10^{-3}$  Па объемный заряд в полости ячейки имеет однородное распределение. В этом случае разрядный ток

$$I = M[2(U_a - U_0) - U_0(r_a/l)^2] \alpha l_a p, \quad (12.16)$$

где  $M$ ,  $\alpha$  – комплексные параметры, характеризующие электродную систему и род газа.

Из этой зависимости вытекает важный вывод о постоянстве интенсивности разряда  $I/p$  в данной ячейке во всем диапазоне давлений, где распределение объемного заряда однородно. Интервал параметров, в котором это условие выполняется, называют *первым режимом* разряда Пеннинга. Разряд здесь существует в стационарной форме; электромагнитное излучение отсутствует. Доля электронной составляющей разрядного тока не превышает нескольких процентов. Радиальное распределение плотности ионного тока на катодных пластинах имеет форму резко спадающей кривой с максимумом на оси.

При увеличении магнитной индукции или давления разряд переходит в динамические формы. Для них характерны неоднородное радиальное распределение объемного заряда и генерирование плазменным столбом высокочастотных электромагнитных колебаний с широким частотным спектром.

В сверхвысоковакуумной области ( $p < 10^{-5}$  Па) объемным зарядом газовых ионов можно пренебречь ввиду его малости. Рост магнитной индукции ведет к уменьшению радиуса кривизны циклоид, удлинению электронных траекторий и увеличению числа актов ионизации; концентрация электронов и разрядный ток возрастают. Однако при некотором критическом значении индукции, зависящем

от размеров ячейки и анодного потенциала, циклоны сжимаются настолько, что электроны в приосевой зоне не могут приобрести кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации молекул. Начинается лавинообразный процесс перераспределения объемного разряда: концентрация электронов в приосевой области уменьшается, а вблизи анодной поверхности растет, достигая  $10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

В конечном итоге прианодный отрицательный объемный заряд полностью экранирует электрическое поле анода. Потенциал на оси падает до нуля, а периферийное электронное облако принимает форму тонкой вращающейся оболочки, в которой и протекают ионизационные процессы.

Здесь же развиваются неустойчивости как следствие коллективного взаимодействия частиц. Электронная концентрация приобретает азимутальную неоднородность. Это приводит к генерированию электромагнитного излучения на частотах порядка 10 МГц и их гармониках; аномальному увеличению поперечной подвижности электронов; осцилляциям разрядного тока и незначительным изменениям его среднего значения. Интервал параметров, в котором протекают описанные явления, называют *переходным режимом* разряда Пеннинга.

Иным закономерностям подчинена эволюция разряда в области давлений

$>10^{-4} \text{ Па}$ . С увеличением магнитной индукции возрастают время жизни ионов и положительный объемный заряд. Это приводит к повышению потенциала  $U_0$ , снижению радиального падения потенциала и уменьшению разрядного тока; разряд переходит во *второй режим* (рис. 12.15).

При анодном потенциале  $< 3 \text{ кВ}$  появляется дополнительное электромагнитное излучение на частоте  $\nu_z$ , вызванное осцилляцией электронов относительно плоскости симметрии ячейки. Наряду с прианодной областью отрицательного объемного заряда формируется цилиндрический виртуальный катод. В спектре электромагнитного излучения появляются колебания на частоте  $\nu'_z$  (4...7 МГц) и на комбинационных частотах  $\nu' = \nu \pm \nu'_z$ . При дальнейшем росте индукции плазменный столб расширяется, «поглощая» виртуальный катод; электромагнитные колебания на частотах  $\nu'_z$  и  $\nu'$  прекращаются. В еще более сильных полях исчезают прианодная оболочка отрицательного объемного заряда и излучение на частоте  $\nu$ . Радиальное падение потенциала уменьшается, и квазинейтральная плазма заполняет всю полость анода.

Сходным образом на режим разряда влияет давление газа. Как уже отмечалось, в стационарном режиме плотность отрицательного объемного заряда и интенсивность

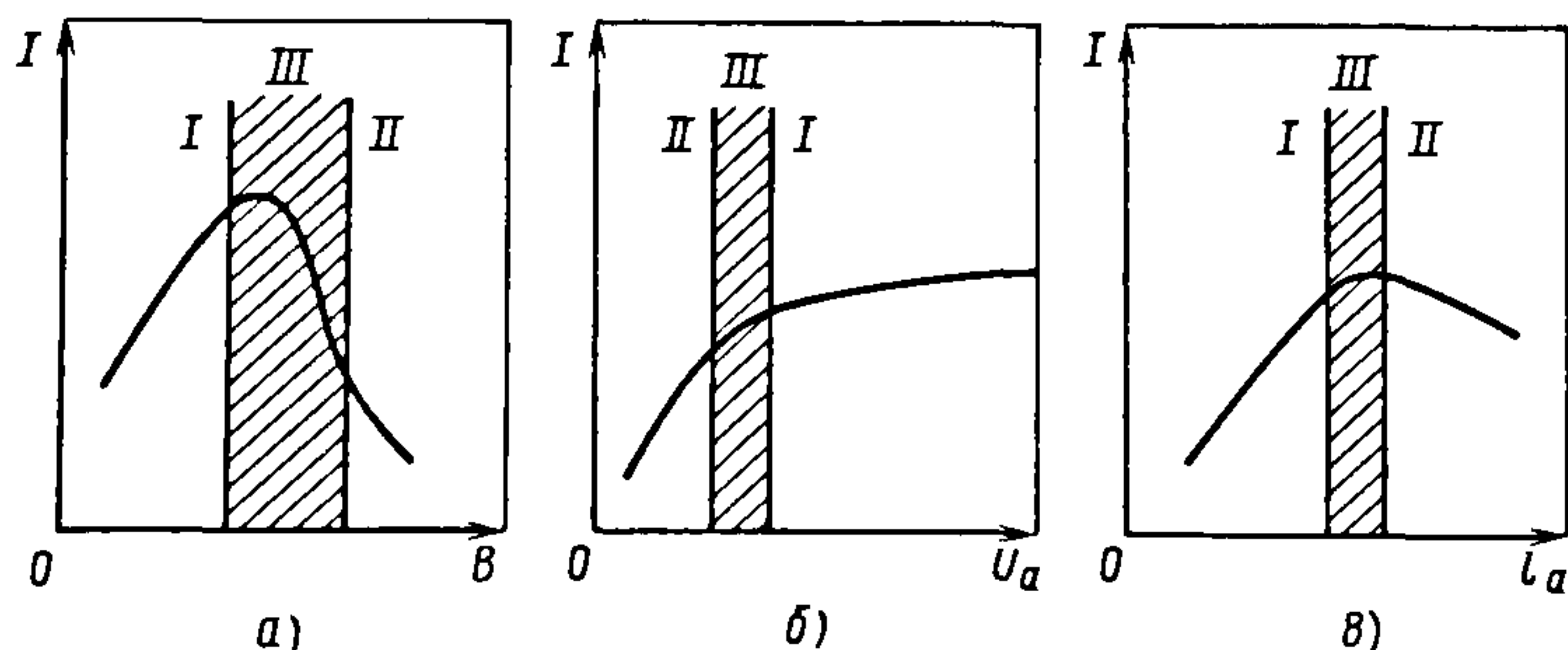


Рис. 12.15. Разрядный ток в различных режимах разряда Пеннинга в зависимости от параметров ячейки:

$a$  — магнитная индукция;  $b$  — анодное напряжение;  $v$  — длина следа; I, II, III — соответственно первый, второй и переходный режимы разряда Пеннинга



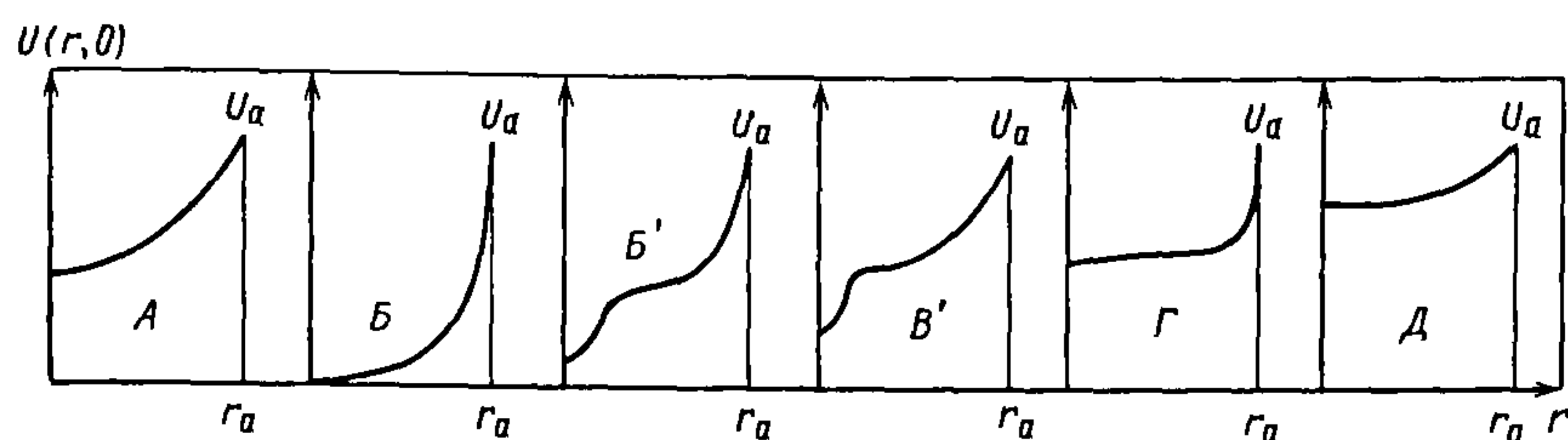


Рис. 12.16. Радиальное распределение потенциала в срединной плоскости ячейки Пеннинга в различных режимах:

А – стационарный режим, Б – переходный режим; Б', Б'', Г, Д – моды второго режима

разряда от давления не зависят. Это справедливо и для переходного режима при давлении  $\sim 10^{-3}$  Па, поскольку переменная составляющая разрядного тока мала в сравнении с его стационарной компонентой. Однако при снижении давления до  $\sim 10^{-6}$  Па эти компоненты уравниваются и уход электронов на анод уже не компенсируется захватом вторичных электронов. Плотность объемного заряда уменьшается, и интенсивность разряда падает. Повышение давления до  $10^{-1}$  Па также приводит к скачкообразному уменьшению интенсивности из-за перехода разряда во второй режим. В отличие от стационарного в динамических режимах плотности ионной и электронной компонент разрядного тока соизмеримы.

Наглядное представление об эволюции разряда дают кривые распределения потенциала в полости анода в различных режимах (рис. 12.16). Областям А и Б соответствуют стационарный и переходный режимы, а остальным областям – различные моды второго режима.

Принципиальное значение при конструировании МЭРН имеет выбор оптимальных электрофизических и геометрических параметров электродной системы. Для областей А и Б разрядный ток на единицу длины анода остается неизменным для всех ячеек, отвечающих условию  $Br_a = \text{const}$ . Таким образом, произведение  $Br_a$  можно рассматривать как параметр подобия. Это справедливо в интервале геометрических соотношений  $0,3 < l_a/2r_a < 1,5$ ;  $0,4 < (1 - l_a/2l) < 0,8$ .

Для анодов с меньшей относительной длиной подобие нарушается вследствие влияния осевой компоненты скорости электронов, а для очень длинных анодов – из-за наличия осевого падения потенциала и влияния положительного пространственного заряда.

Еще одно принципиально важное для МЭРН явление – ионное распыление катодных пластин. Количественно оно характеризуется коэффициентом распыления  $\rho$ , т.е. числом распыленных атомов мишени на один падающий ион. Взаимосвязь характеристик мишени и бомбардирующих ее по нормали к поверхности ионов описывается эмпирическим соотношением

$$\rho = \frac{20}{U_m} Z_i^2 Z_m^2 \frac{M_i}{M_m} \frac{E_i}{(E_i + 50Z_i Z_m)^2}, \quad (12.17)$$

где  $U_m$  – энергия связи поверхностных атомов мишени (энергия сублимации), эВ;  $Z_i, M_i$  – атомный номер и масса ионов;  $E_i$  – их кинетическая энергия, эВ;  $Z_m, M_m$  – атомные номер и масса материала мишени.

Максимальные значения  $\rho$  достигаются при энергии ионов  $E_i' = 50Z_i M_m$ . Для легких ионов (изотопы водорода и гелия), бомбардирующих титановую мишень,  $E_i'$  лежит в интервале 1,0...2,5 кэВ; максимальный коэффициент распыления находится в пределах 0,01...0,1. Для ионов средних масс (азот, кислород)  $\rho \geq 1,0$  и соответствует интервалу энергий 10...15 кэВ. Для ионов аргона  $\rho \approx 10$ .

Угловое распределение распыленных частиц при нормальном падении ионов на поликристаллическую мишень описывается законом косинуса. При наклонном падении ионов максимум потока распыленных атомов ориентирован в направлении, близком к зеркальному; коэффициент распыления при малых углах скольжения резко возрастает.

Поскольку электрофизические и газодиффузионные процессы существенно зависят от рода газа, для МЭРН характерна *селективность* откачки. Это находит отражение в заметном различии быстроты действия по разным газам (табл. 12.20), возникновении специфических колебаний давления и разрядного тока при откачке инертных газов, существовании газовой «памяти» и ряде других эффектов.

**12.20. Относительная быстрота действия МЭРН по различным газам**

Газ	Модификация насосов*	
	I	II
H <sub>2</sub>	1,8...2,7	2,0
D <sub>2</sub>	1,3...1,45	—
T <sub>2</sub>	1,5...1,7	—
He	0,04...0,10	0,28...0,40
NH <sub>3</sub>	1,7	—
CH <sub>4</sub>	2,1...2,5	1,60...1,80
H <sub>2</sub> O	1,00	1,00
Легкие углеводороды	0,90...1,60	0,90...1,70
Ne	0,04	—
N <sub>2</sub>	1,00	1,00
Сухой воздух	1,02	1,05
CO	0,85...1,00	0,90
O <sub>2</sub>	0,55...0,60	0,60...0,65
Ar	0,01...0,06	0,20...0,30
CO <sub>2</sub>	0,85...1,00	0,90
Cl <sub>2</sub>	0,75...0,85	—
Kr	0,01...0,02	0,20...0,25
Xe	0,01	0,15...0,18

\* I — стандартные насосы с диодной электродной системой; II — специализированные насосы для откачки смесей с повышенным содержанием инертных газов.

Быстрота действия МЭРН примерно пропорциональна интенсивности разряда. Область максимальных значений быстроты действия может быть смещена в требуемый интервал давлений подбором электрофизических параметров разряда и размеров ячейки.

Для рассмотрения особенностей откачки целесообразно выделить три группы газов. Первую группу составляют изотопы водорода; вторую — активные газы средних и больших масс; третью — инертные газы. Газы, объединяемые этими группами, поглощаются разрядными насосами по сходным физико-химическим схемам.

При откачке изотопов водорода распыление электродов существенной роли не играет: доминируют сорбция нейтральных молекул катодными пластинами и имплантация ионов с последующей диффузией. Диффузионный перенос сопровождается образованием гидрида титана TiH<sub>2</sub> и твердого раствора со структурной формулой TiH<sub>1,76</sub>. Влияние ионной компоненты разрядного тока на скорость поглощения незначительно: на каждый электрон, прошедший во внешней цепи, сорбируется несколько атомов водорода. При более высоком давлении длительная откачка водорода сопровождается двух-, трехкратным увеличением быстроты действия. Однако при повышении давления до 10<sup>-3</sup> Па этот рост прекращается, а затем быстрота действия начинает уменьшаться из-за термодесорбции ранее поглощенного водорода.

Поскольку скорость распыления катодных пластин в высоком и сверхвысоком вакууме крайне мала, их поверхностный слой при длительной откачке насыщается примесными атомами. В результате на поверхности пластин формируется диффузионный барьер, блокирующий сорбцию водородных молекул. Для устранения этого явления прибегают к напуску более тяжелых газов, например азота или аргона.



Благодаря интенсивному распылению катодных пластин это приводит, во-первых, к разрушению диффузионного барьера и, во-вторых, к формированию на аноде свеженапыленных титановых пленок, активно сорбирующих водород.

Так, напуск аргона при давлении  $\sim 10^{-4}$  Па продолжительностью 10...12 мин впятеро увеличивает быстроту действия по водороду в сравнении с ее начальным значением. Последующий возврат к этому значению происходит в течение  $>10$  ч. При этом парциальное давление аргона после прекращения его напуска остается на исходном уровне.

Повышение температуры пластин и концентрации поглощенного газа вызывает резкое уменьшение быстроты действия из-за роста равновесного давления водорода над геттером:  $10^{-10}$  Па при комнатной температуре,  $\sim 10^{-2}$  Па при 500 К и  $\sim 100$  Па при 700 К. Откачивающее действие МЭРН полностью прекращается при температуре катодных пластин  $\sim 530$  К. При этой температуре устанавливается динамическое равновесие между поглощаемым и десорбируемым потоками. После  $5 \cdot 10^4$  ч непрерывной откачки водорода при давлении  $\sim 10^{-4}$  Па быстрота действия уменьшается на 60 %; при давлении  $(5...7) \cdot 10^{-3}$  Па такое же падение наступает уже через несколько сот часов. При этом быстрота действия по воздуху уменьшается лишь на 35 %.

Ресурс МЭРН при откачке водорода лимитируется насыщением приповерхностного слоя катодных пластин глубиной  $\sim 50$  мкм. Образующийся гидрид титана локализуется по границам зерен и структурным неоднородностям металла. Содержание водорода в слое отвечает атомному соотношению 1:1, тогда как его средняя концентрация в катодных пластинах  $\leq 10^{-2}$ .

Дополнительные факторы, ограничивающие продолжительность непрерывной откачки водорода, — искривление и растрескивание катодных пластин. Их де-

формация и разрушение вызваны тем, что образующийся при поглощении водорода  $TiH_2$  имеет больший удельный объем, чем компактный титан. Поэтому в местах локализации гидроксида возникают внутренние напряжения, приводящие к появлению трещин, расслоению пластин и замыканию электродов.

Повысить производительность и увеличить ресурс МЭРН при откачке водорода можно несколькими способами. Используют, к примеру, катоды из губчатого титана с открытой пористостью 60...65 %; металлопористые катодные пластины из смеси, содержащей  $\sim 30$  % мелкодисперсного электрографита, распределенного в геттерном веществе; кассетные катодные пластины, в которых зоны повышенной концентрации водорода механически развязаны от остальной части электродов.

На внутренней поверхности анодных электродов размещают сетки из материала катода, что увеличивает быстроту действия в диапазоне  $10^{-2}...10^{-1}$  Па. С этой же целью применяют катодные пластины из титан-молибденового сплава, а также дифференциальные катоды алюминий-цирконий. В насосах с такими катодами на стенках и поверхности электродов формируется бинарный сплав, обладающий повышенной сорбционной активностью по водороду.

Существенного увеличения ресурса при откачке водорода достигают использованием анодных ячеек прямоугольного сечения с соотношением сторон 1:2. В таких ячейках электронное облако вытянуто вдоль большой оси. Это приводит к пространственному перераспределению зон интенсивной ионизации молекул, уменьшению плотности ионного тока и снижению температуры катодов. Заметный эффект дает переход на импульсную подачу откачиваемого водорода, увеличивающую ресурс на 30...50 %. Физическую основу эффекта составляет диффузионное выравнивание концентрации поглощенного водорода в паузе между импульсами. Быстрота действия практически не зави-



сит от формы импульса и определяется лишь температурой электродов.

Поскольку поглощение водорода титаном обратимо, термическое обезгаживание насыщенных катодных пластин восстанавливает начальные характеристики насосов.

**Активные газы средних и больших масс** откачиваются путем хемосорбции. Ее скорость в МЭРН намного выше, чем в ИН, так как в разряде Пеннинга генерируются диссоциированные и возбужденные частицы газа. Коэффициенты прилипания для них существенно больше, чем для стабильных молекул. Бомбардируя катодные пластины, быстрые ионы азота с вероятностью 0,3...0,5 захватываются ими. При этом на поверхности и в толще геттера образуются молекулы нитрида титана. Происходит также распыление титана и ранее образовавшегося нитрида. Распыленные атомы осаждаются на аноде, противоположном катоду (~25 %) и на стенках насоса.

Поглощение газа происходит в тех зонах, где осаждение геттерных пленок доминирует над распылением. Механизм сорбции во многом определяется ионной компонентой плазмы. На каждый электрон, проходящий во внешней цепи, поглощается один атом азота. Сходный механизм откачки характерен для кислорода и воздуха. На поглощенный атом кислорода приходится два электрона во внешней цепи. Несколько большая быстрота действия по воздуху в сравнении с его парциальными компонентами объясняется интенсивным распылением катодных пластин ионами аргона.

Образующиеся при хемосорбции оксиды, нитриды и карбиды обладают высокой термостойкостью. Так, оксид титана устойчив до 1800 К, нитрид и карбид – до 3300 и 3400 К соответственно. Поэтому поглощение кислорода, азота и углеродсодержащих газов носит необратимый характер.

Наиболее вероятный механизм откачки сложных молекул (воды, метана,

тяжелых газов) состоит в их диссоциации в разряде и поглощении осколочных компонентов. Поскольку карбид титана имеет малый коэффициент распыления, при продолжительной откачке углеводородов быстрота действия МЭРН по всем газам падает. По этой причине разрядные насосы не могут длительно эксплуатироваться в установках, содержащих источники масляных паров. Сверхвысоковакуумные системы, откачиваемые МЭРН, должны иметь безмасляные средства предварительной откачки.

Откачку тяжелых активных газов, как и изотопов водорода, можно заметно интенсифицировать аргонной обработкой электродов при давлении  $10^{-3}$ ... $10^{-2}$  Па. Такая обработка продолжительностью 30...40 мин трехкратно увеличивает быстроту действия. После нее поверхность катодных пластин становится однородной, состоящей преимущественно из атомов титана. В процессе последующей эксплуатации на поверхности, исключая приосевую зону ячеек, формируется слой углерода и молекул карбида, что приводит к уменьшению быстроты действия. При длительной откачке этот слой занимает ~95 % поверхности катодных пластин.

**Инертные газы** откачиваются путем имплантации ионов и быстрых атомов в анодные и катодные электроды и их последующего замуровывания распыляемым геттером.

Первичным является процесс бомбардировки катодных пластин ионами, сопровождающийся их имплантацией или отражением. В дальнейшем из-за распыления пластин происходит реэмиссия части имплантированных ионов. Поэтому пластинами необратимо поглощаются только частицы, упавшие на их периферийную область. Здесь распыление незначительно. Оно к тому же компенсируется осаждением атомов геттера, летящих с противоположной катодной пластины. Доля этой области в типичных эксплуатационных режимах  $\leq 20$  % от общей площади катодного электрода.



Основная часть ионов после отражения и нейтрализации падает на анод. На его поверхности они могут удерживаться только очень слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Поэтому они должны обладать достаточной начальной энергией, чтобы, внедрившись, оставаться в адсорбированном состоянии, пока над ними не сформируется достаточный слой атомов геттера.

Коэффициент отражения падающих ионов растет с увеличением отношения  $M_m/M_i$ . К примеру, около половины падающих ионов гелия отражаются в виде атомов с энергией до 70 % от начальной. При разряде в аргоне доля отраженных атомов  $\leq 10$  %, а их энергия меньше 10 % от начальной. Поэтому быстрота действия МЭРН больше по легким газам – гелию и неону; для лучшей откачки аргона и инертных газов с большей атомной массой необходимо использовать катоды из тяжелых металлов.

МЭРН обладают эффектом «памяти» относительно поглощаемых газов, в особенности инертных. С этим эффектом связаны периодические колебания давления в интервале  $(0,1 \dots 3) \cdot 10^{-2}$  Па при длительной откачке этих газов. Особенно ярко это явление выражено при откачке аргона (*аргонная нестабильность*); оно возникает и во время продолжительной эксплуатации насосов при давлении  $\sim 10^{-3}$  Па в газовых средах, близких по составу к воздушной. В меньшей степени нестабильность проявляется в других инертных средах. Причина этого состоит в перераспределении областей интенсивного распыления катодных пластин при изменении режима разряда, например вследствие вариаций давления. В вакуумных системах, работающих в широком интервале давлений, нестабильности, как правило, не возникает.

Профилактическое средство против возникновения нестабильности заключается в периодической аргонной обработке внутренней полости корпуса и электродной системы МЭРН, а также откачива-

емых металлических камер. Обработку проводят, возбуждая тлеющий разряд при давлении  $10^{-2} \dots 10^{-1}$  Па в среде чистого аргона при его непрерывной прокачке. Интенсивное ионное распыление обеспечивает быструю очистку поверхности и предотвращает аргонную нестабильность; кроме того, при этом увеличивается быстрота действия и сокращается время достижения предельного остаточного давления. Полезен также периодический прогрев насоса.

Резюмируя, скажем, что принципы конструирования разрядных насосов для устойчивой откачки инертных газов можно сформулировать следующим образом:

- малораспыляемая область катодных пластин должна иметь возможно большую площадь;
- необходимо, чтобы отражающиеся от катодных пластин ионы сохраняли возможно большую часть начальной кинетической энергии;
- скорость запыления геттером зон электродной системы, в которых происходит поглощение инертных газов, должна быть как можно большей.

Конкретные технические решения, реализующие эти принципы, будут описаны далее.

## 12.6. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

Важная эксплуатационная характеристика разрядных насосов – стартовый период, на динамику которого влияют разнообразные факторы. В их числе:

- вакуумно-технологическая предыстория насоса и откачиваемой установки в целом;
- объем камеры;
- способ предварительного вакуумирования;
- парциальный состав газовой среды;
- электрические характеристики источника питания;
- полярность изолированного электрода.



В системах, длительное время не общавшихся с атмосферой, запуск МЭРН возможен с давления до 10 Па. В системах, содержащих значительное количество адсорбированных паров и углеводородных загрязнений, давление запуска должно быть снижено до  $10^{-2} \dots 10^{-1}$  Па. В цельнометаллических установках запуск насоса с изолированным анодом сопровождается заполнением вакуумируемой камеры газоразрядной плазмой. Это способствует ионной очистке системы и достижению более низкого остаточного давления, однако продолжительность стартового периода возрастает.

Кроме того, существует опасность электрического или электротермического повреждения внутрикамерного оборудования. При давлении  $< 0,1$  Па разряд локализуется в электродном блоке. Заземленная металлическая сетка, установленная во входном патрубке насоса, предотвращает «выход» разряда, и стартовый период сокращается. Сетка защищает также внутрикамерную аппаратуру от радиочастотного излучения, генерируемого МЭРН.

Укороченный стартовый период характерен и для насосов с изолированным катодом; они работают стабильно в самых тяжелых условиях, включая периодический контакт с атмосферным воздухом. Газоразрядная плазма в таких насосах локализована в пределах электродного блока.

Наиболее распространенная причина затрудненного запуска МЭРН при повышенном давлении – насыщение электродной системы парами воды при напуске атмосферного воздуха. Экспозиция в воздухе особо нежелательна для длительно работавших насосов, поскольку напыленная на электроды толстая геттерная пленка имеет рыхлую губчатую структуру и при контакте с атмосферой поглощает значительное количество водяных паров. Поэтому в установках, эксплуатируемых в режиме периодического напуска атмосферного воздуха, целесообразно преду-

сматривать клапаны, отсекающие насос. При отсутствии клапана перед напуском атмосферного воздуха установку необходимо заполнять сухим газом, обычно азотом.

В стартовый период разрядные насосы работают в наиболее напряженном тепловом режиме, для которого характерна специфическая эксплуатационная неустойчивость. Ее кинетика определяется цепочкой вакуумно-физических процессов: *нагрев электродов разрядным током → тепловая и стимулированная десорбция с поверхности электродов → рост давления → увеличение разрядного тока → повышение температуры электродов → электрическая и тепловая деструкция поверхностных загрязнений → дальнейший рост десорбции → ...*

Эта неустойчивость особенно значима при эксплуатации загрязненных вакуумных систем. Перегрев электродов и сопутствующий рост скорости газовыделения могут быть предотвращены запуском с пониженного давления, периодическим выключением насоса, его эксплуатацией при меньших значениях мощности, параллельной работой МЭРН и средств предварительной откачки. Последние целесообразно выключать лишь при проявлении явной тенденции к снижению рабочего давления.

В условиях сверхвысокого вакуума затрудненный запуск («затягивание зажигания») вызывается недостатком в разрядном промежутке свободных электрических зарядов. Для его устранения прибегают к дополнительной инжекции электронов в межэлектродное пространство. С этой целью в стандартную электродную систему встраивают радиоактивный  $\beta$ -источник (*триггерное устройство*) малой интенсивности либо используют перфорированные катоды, в отверстия которых устанавливают изолированные электроды в виде острия или диска.

При подаче на эти электроды высоковольтного импульса генерируется электронный сгусток, вызывающий испарение материала и сопутствующее выделение



газа. Как следствие, в разрядной ячейке формируется пространственный заряд, необходимый для зажигания. Для запуска при низком давлении используют также составные анодные электроды в виде не-соприкасающихся полуцилиндров. Зазор между ними увеличивает газокинетическую проводимость электродного блока и ускоряет распространение стартового плазмоида. Затягивания зажигания даже при очень низких давлениях не наблюдается и в электродных блоках, в которых с помощью дополнительного СВЧ-генератора возбуждают мультипакторный разряд.

При эксплуатации МЭРН необходимо учитывать возможное попадание в реципиент атомов геттерного материала. При длительном рабочем цикле остаточная газовая среда обогащается аргоном. Для уверенного получения сверхвысокого вакуума электродную систему рекомендуется выполнять двухступенчатой. С этой целью ее фрагментируют и каждый фрагмент снабжают автономным электрическим вводом. Аналогичный эффект достигается разделением насосов на черновые и рабочие. Первые включают в интервале давлений  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  Па, и ими поглощается основная масса остаточного газа; вторые – при более низком давлении. Благодаря этому концентрация поглощенного газа в рабочих насосах возрастает очень медленно и их быстрота действия в течение продолжительного времени сохраняется неизменной.

Современные промышленные МЭРН имеют типовую конструктивную схему. Отдельные разрядные ячейки набирают в блоки, анодные электроды которых напоминают пчелиные соты; общие для каждого блока катодные электроды выполняются в виде тонких прямоугольных пластин. Блоки размещают в узких полостях («карманах») сварного коробчатого корпуса прямоугольного или квадратного сечения. С внешней стороны корпуса собирают магнитную систему на основе постоянных магнитов в форме плиток из

феррита бария либо сплавов *железо-кобальт, самарий-кобальт*.

На характеристики МЭРН противоречивым образом влияют многие конструктивно-физические факторы. К примеру, для достижения в разрядной ячейке наибольшей магнитной индукции и уменьшения массы и габаритных размеров насоса межполюсное расстояние должно быть минимизировано. Однако это противоречит требованию иметь не слишком малый зазор между катодными пластинами и анодом. Этот зазор определяет газокинетическую проводимость каналов откачки и электрическую прочность электродного блока. Очень велико и суммарное число разрядных ячеек: в крупных насосах оно достигает сотен и тысяч.

По указанным причинам принципиальное значение при проектно-конструкторской разработке МЭРН приобретает их многофакторная оптимизация с использованием вакуумных, электрофизических, геометрических, массогабаритных и эксплуатационных критериев. В ходе оптимизационного проектирования с приемлемой для инженерных расчетов точностью могут быть применены следующие эмпирические соотношения:

оптимальное значение параметра подобия

$$(2Br_a)_{\text{опт}} = 3,06 \cdot 10^{-5} U_a^{0,5}; \quad (12.18)$$

быстрота действия разрядной ячейки по азоту

$$S_0 = 6,92 \cdot 10^7 l_a r_a^2 B p^{0,2} \left( 1 - \frac{1,5 \cdot 10^4 p}{1,33 + 4 \cdot 10^4 p} \right) \quad (12.19a)$$

или

$$S_0 \approx 6 \cdot 10^7 B^2 r_a^2 l_a; \quad (12.19b)$$

расчетная быстрота действия электродного блока, состоящего из  $n$  разрядных ячеек,

$$S_{0 \text{ бл}} = n S_0; \quad (12.20)$$

быстрота действия электродного блока, приведенная ко входному сечению «кармана» для его размещения,

$$S_{\text{бл}} = S_{0 \text{ бл}} (\operatorname{tg} \Psi) / \Psi, \quad (12.21)$$

$$\text{где } \Psi = 2,55 \cdot 10^{-3} \frac{ka^{0,5}}{l-l_a} \left( \frac{S_{0 \text{ бл}}}{L} \right)^{0,5};$$

быстрота действия насоса, имеющего  $N$  одинаковых блоков,

$$S_n = N \left( \frac{1}{G} + \frac{1}{S_{\text{бл}}} \right)^{-1}, \quad (12.22)$$

$$\text{где } G = \frac{1}{N} \sum G_i.$$

В этих формулах  $a$ ,  $L$  – соответственно ширина и длина электродного блока;  $G_i$  – газокинетическая проводимость канала между входными сечениями насоса и  $i$ -го «кармана»;  $k$  – коэффициент, равный 1, если электродный блок доступен для откачиваемого газа с одной стороны, и 0,5, если блок открыт с обеих сторон. Быстрота действия и проводимость выражены в л/с; анодный потенциал – в В; индукция – в Тл; давление – в Па; линейные размеры – в м.

Формулы справедливы в следующем интервале параметров:

$$\begin{aligned} B &= 0,1 \dots 0,2 \text{ Тл}; & U_a &= 3 \dots 7 \text{ кВ}; \\ p &= 10^{-7} \dots 10^{-4} \text{ Па}; & r_a &= 0,5 \dots 2,5 \text{ см}; \\ l_a &= 0,5 \dots 3 \text{ см}; & l &= 1 \dots 5 \text{ см}; & l_a/l &= 0,2 \dots 0,9; \\ a &= 1 \dots 20 \text{ см}; & L &= 1 \dots 40 \text{ см}. \end{aligned}$$

Для интенсификации откачки инертных газов используют несколько конструктивных решений, позволяющих реализовать сформулированные выше физические принципы. Одно из них – применение гребенчатых (рис. 12.17, а) или решетчатых (рис. 12.17, б) катодов. Ионы бомбардируют их поверхность под очень малыми углами скольжения, что резко увеличивает поток распыляемых атомов геттера.

Кроме того, в таких катодах намного больше запыляемая геттером поверхность; в то же время она почти не подвержена распылению. Относительная быстрота действия по аргону у МЭРН с подобными катодами достигает 10 %.

Эффективное связывание инертных газов присуще и магнетронным насосам с центральным катодным стержнем (рис. 12.17, в). Поскольку электрический потенциал осевой области в этой конструкции фиксирован,

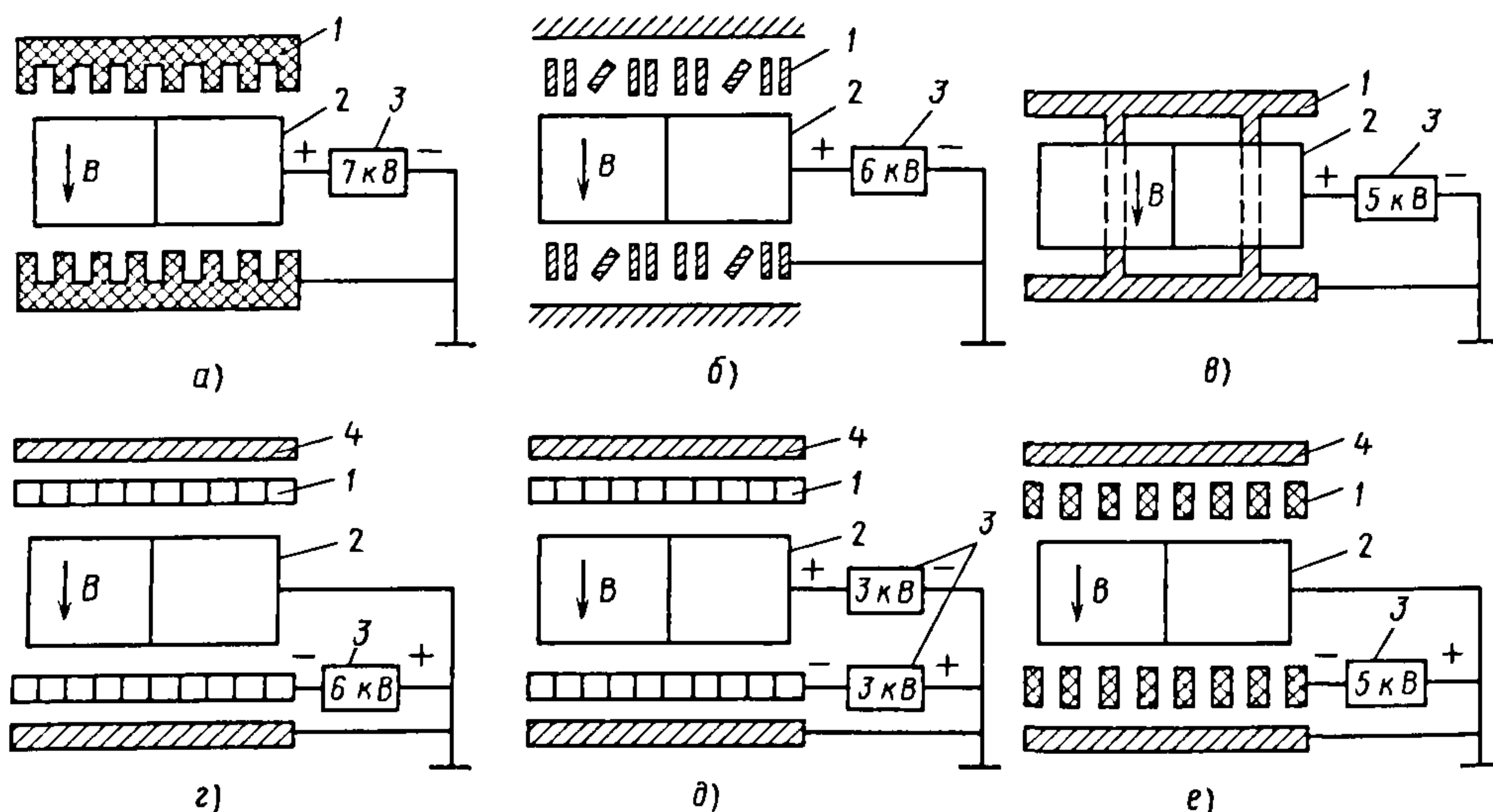


Рис. 12.17. Конструктивные схемы электродных блоков для откачки инертных газов: 1 – катод; 2 – анод; 3 – источник питания; 4 – коллектор



вариации давления не влияют на режим разряда и пространственное распределение плотности ионного тока. Сильному распылению здесь подвержен лишь катодный стержень и в меньшей степени «пяточки» торцовых пластин вокруг него. Остальная поверхность пластин покрыта слоем напыленного титана, в котором замуровано  $> 80\%$  атомов поглощенного инертного газа. Магнетронные насосы свободны от аргонной нестабильности; их относительная быстрота действия по аргону приближается к  $20\%$ .

В числе других конструктивных усовершенствований стоит упомянуть следующие.

Применяют перфорированные катодные пластины с отверстиями звездообразной формы, расположенными соосно анодным ячейкам (серия Star Cell фирмы Varian). Насосы этой серии способны длительно откачивать инертные газы при давлении до  $10^{-3}$  Па; их относительная быстрота действия по различным газам составляет:  $2,0$  ( $\text{H}_2$ );  $1,0$  ( $\text{CH}_4$ ; воздух;  $\text{O}_2$ );  $0,23$  (Ar). Используют дифференциальные катоды, т.е. пластины из металлов с существенно различными коэффициентами распыления, например из труднораспыляющегося титана и тантала. Осаждаясь на титановой пластине, пленка тантала препятствует реэмиссии поглощенных инертных газов. Сходных результатов достигают выполнением одного из электродов металлическим с повышенной упругостью пара, например магния. Разогрев электрода увеличивает концентрацию ионов в разрядном промежутке. Пропорционально возрастают скорость распыления геттерного материала, быстрота действия и производительность насоса.

Большой эффект дают триодные электродные блоки. Триодный блок состоит из заземленного сотового анода и электрически изолированного титанового катода в виде решетки (рис. 12.17, з) либо сетки с ячейками, меньшими анодных (рис. 12.17, д). Третьим электродом служат заземленные стенки корпуса насоса

или специальные коллекторные пластины. В отдельных модификациях триодных насосов ненулевой электрический потенциал могут иметь и анод, и катод (рис. 12.17, е). В этом случае для питания обеих электрических цепей целесообразно использовать унифицированные выпрямители с относительно низким выходным напряжением.

В триодных насосах, как и в насосах с гребенчатыми катодами, ионы падают на поверхность под малыми углами скольжения, вызывая интенсивное распыление геттерного вещества. Проходя сквозь катодные сетки, ионы замедляются, меняют направление движения и с малой энергией бомбардируют катоды со стороны коллекторных пластин. Остальные ионы достигают стенок с небольшой и даже нулевой скоростью, быстро замуровываясь атомами геттера. Относительная быстрота действия триодных насосов по аргону доходит до  $30\%$ .

Сравнительная оценка МЭРН диодного и триодного типов позволяет сделать следующие выводы. Триодные насосы предпочтительнее при повышенных давлениях ( $5 \cdot 10^{-4}$  Па и выше). При меньшем давлении более стабильны вакуумные параметры диодных насосов; в режиме непрерывной откачки они имеют к тому же больший ресурс. Триодные насосы целесообразно использовать в установках с частым напуском газа, а диодные — в сверхвысоковакуумных системах. Запуск диодных насосов при повышенном давлении желательно сопровождать напылением дополнительных геттерных пленок. В триодных насосах почти незаметен эффект «памяти» по аргону даже после его длительной откачки; стартовый период имеет меньшую продолжительность.

Электропитание разрядных насосов обычно осуществляют от выпрямителей или преобразователей с напряжением холостого хода до  $7$  кВ. Для предотвращения перехода разряда Пеннинга в дуговой при запуске используют ограничители тока. К электродному блоку должна под-

водиться оптимальная электрическая мощность, соответствующая мгновенному значению откачиваемого газового потока. При большей мощности неизбежен избыточный разогрев электродов, приводящий к росту термодесорбционных потоков; при недостаточной мощности падает производительность насоса. Поэтому в интервале давлений  $10 \dots 10^{-3}$  Па собственно насос и блок питания должны иметь согласованные электрические характеристики (рис. 12.18).

Разрядные насосы – наиболее распространенное средство безмасляной сверхвысоковакуумной откачки. Промышленными сериями выпускаются насосы с быстротой действия  $5 \cdot 10^{-5} \dots 3,0$  м<sup>3</sup>/с; изготавливаются также единичные образцы большей производительности. Насосы различных фирм оптимизированы по конструктивным решениям электродных блоков и электрофизическим параметрам. Эти решения и параметры можно рассматривать как типичные для современных МЭРН.

Отечественные разрядные насосы включают в себя несколько промышленных серий. Важнейшие конструктивные особенности насосов одной из них – серии НМДО<sup>1</sup> (насосы магниторазрядные диодные охлаждаемые) – применение перфорированных катодов и водяное охлаждение анода. Это позволило удвоить быстроту действия по инертным газам в сравнении с насосами первой серии НЭМ. Кроме того, устранение локального перегрева электродов и сопутствующей интенсивной термодесорбции обеспечило заметный рост максимального рабочего давления (до  $10^{-1}$  Па) и быстроту действия в интервале давлений  $10^{-3} \dots 10^{-1}$  Па. Давление запуска насосов  $6 \dots 10$  Па; предельное давление  $5 \cdot 10^{-7}$  Па; быстрота действия по воздуху  $0,01 \dots 1,0$  м<sup>3</sup>/с. При откачке смесей, близких по составу к воздуху,

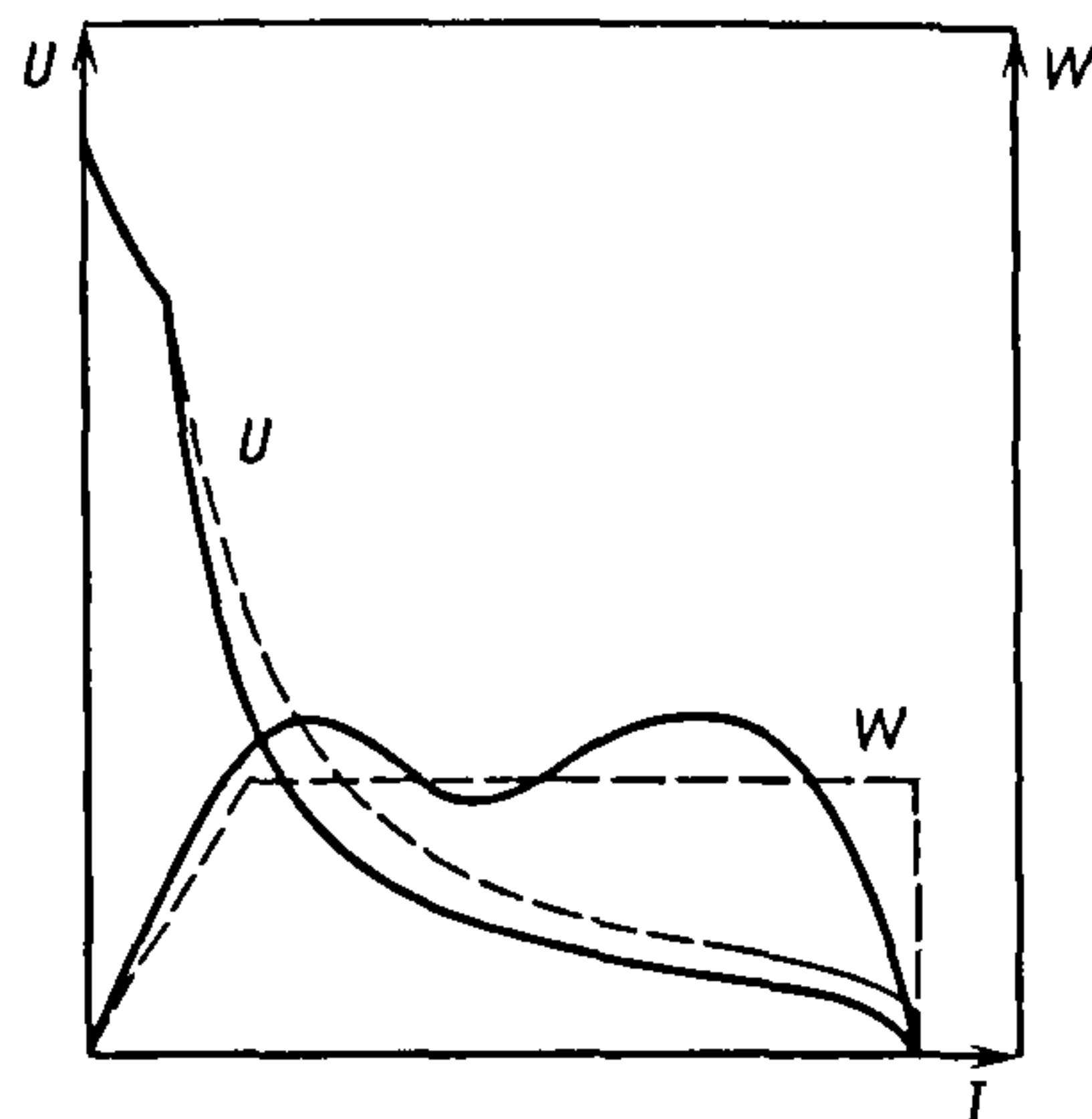


Рис. 12.18. Выходное напряжение  $U$  блока питания и мощность  $W$ , потребляемая МЭРН, в функции от разрядного тока: пунктир – оптимальные теоретические зависимости; сплошные линии – характеристики типового блока

насосы в течение  $\sim 800$  ч могут работать при давлении до  $10^{-1}$  Па; диапазон  $(2,5 \dots 7) \cdot 10^{-2}$  Па характеризуется неустойчивостью, связанной с вариациями режима разряда.

Откачка водорода при давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  Па возможна в течение  $\sim 200$  ч, затем производительность резко падает. Она может быть восстановлена до номинального значения прогревом электродной системы. При высоковакуумной откачке гелия быстрота действия монотонно падает со временем. Устойчивая работа в среде гелия при давлении  $7 \cdot 10^{-3}$  Па возможна в течение  $500 \dots 600$  ч; затем начинает проявляться *гелиевая неустойчивость*.

Насосы серии НМДО также имеют разборную конструкцию, кроме самой малой модели; электродные блоки унифицированы. Анодный электрод представляет собой медную перфорированную пластину толщиной 16 мм, диаметр перфораций (анодных ячеек) 12 мм. Анод электрически соединен с корпусом; по периметру к нему припаяна тонкостенная трубка из коррозионно-стойкой стали, по которой циркулирует вода. Титановые

<sup>1</sup> Используется также аббревиатура НОРД (насосы охлаждаемые разрядные диодные).



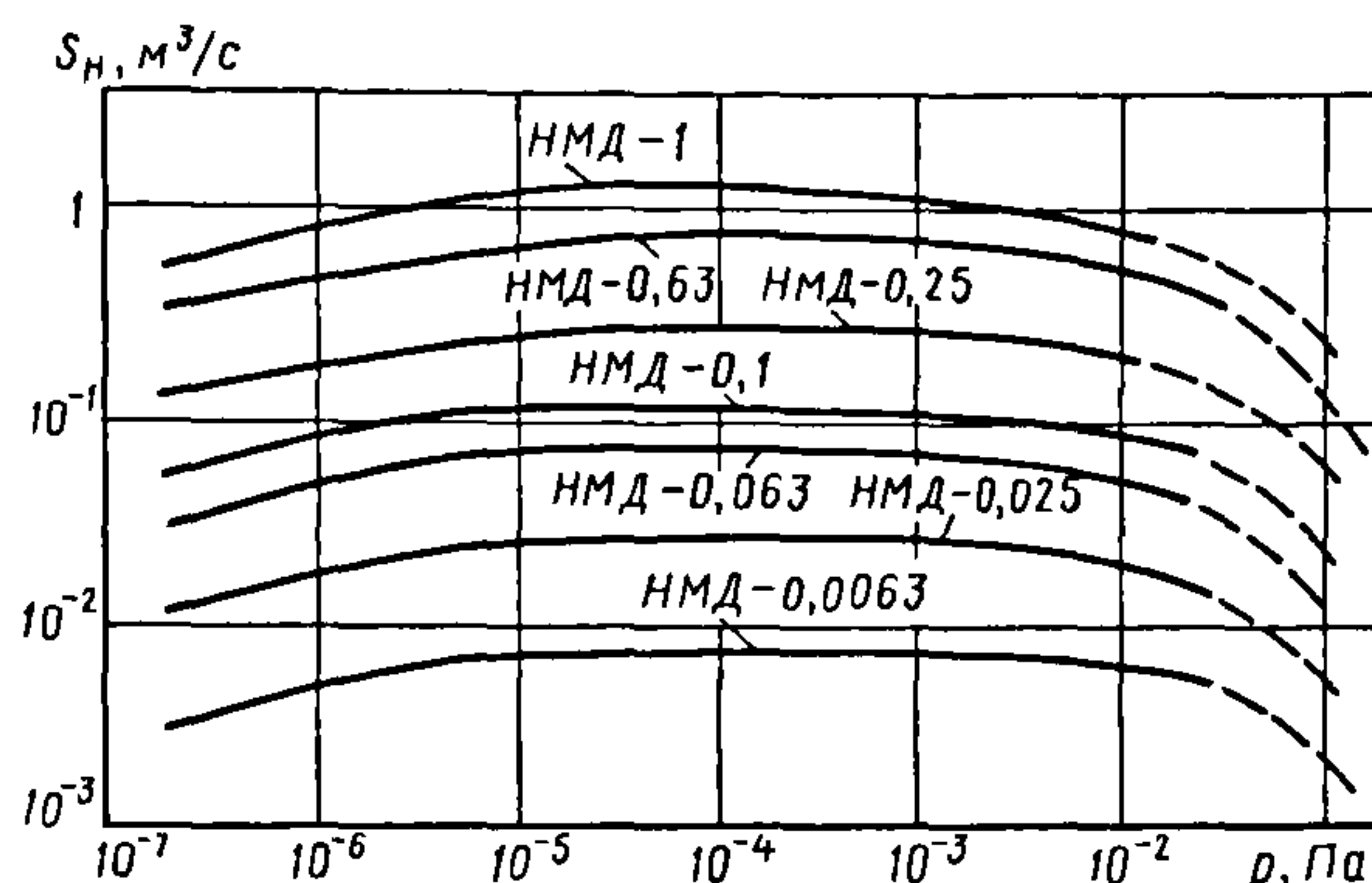
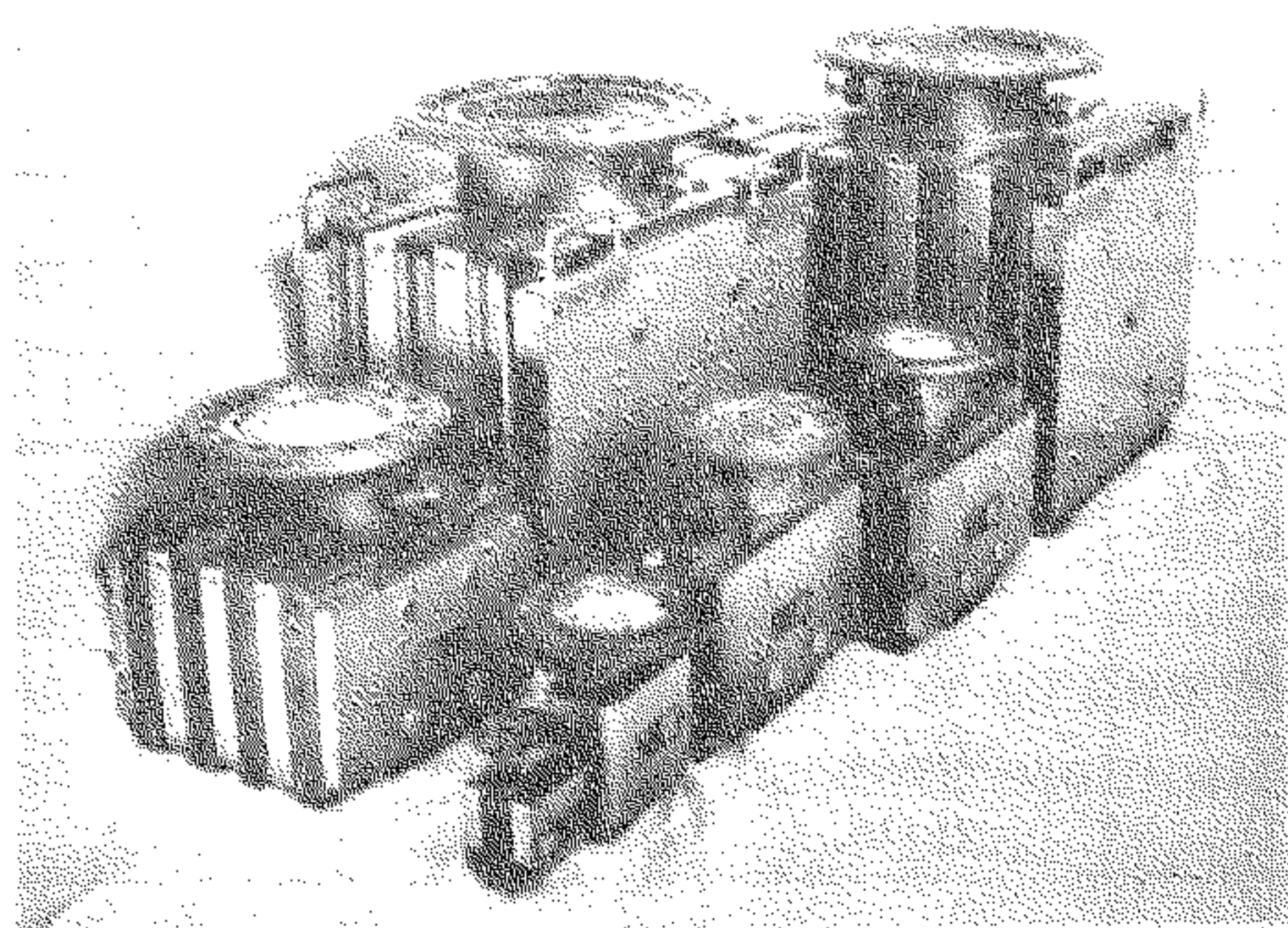


Рис. 12.19. Быстрота действия насосов серии НМД в зависимости от давления (воздух)



12.20. Магнитные электроразрядные насосы серии НМД

катоды смонтированы на керамических изоляторах. По оси на отдельном фланце установлен внутренний нагреватель для термического обезгаживания корпуса и электродной системы.

Серию НМД (насосы магниторазрядные диодные) составляют 10 насосов (табл. 12.21; рис. 12.19, 12.20). Насосы не имеют принудительного охлаждения. Тем не менее, благодаря конструктивно-геометрической оптимизации, адекватному выбору электрофизических параметров и согласованию электрических характеристик разрядных систем и источников питания по своим пусковым характеристикам они близки к водоохлаждаемым насосам серии НМДО. Максимальное давление запуска 1 Па; предельное остаточное давление  $1 \cdot 10^{-8}$  Па.

За исключением самой малой модели, насосы сср. НМД имеют разборную

конструкцию. Электродные блоки унифицированы для групп насосов малой, средней и повышенной производительности; в пределах каждой из групп переход к последующей модели осуществляют увеличением числа электродных блоков. Магнитная система набирается из оксидно-бариевых пластин марки 2,8 БА; максимальная индукция в межполюсном зазоре 0,16 Тл. Электродный блок включает в себя электрически изолированный сотовый анод высотой 20 мм из ячеек диаметром 16 мм, выполненный из тонколистовой коррозионно-стойкой стали, и катодные пластины из сплава ВТ-1-0 толщиной 2 мм. Зазор между анодным электродом и катодными пластинами составляет 3...7 мм. Входное отверстие перекрыто заземленной металлической сеткой.

Металлокерамические электроводы собраны на отдельном фланце, что позволяет осуществлять их независимую очистку и замену. Насосы имеют почти постоянную быстроту действия в интервале давлений  $3 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-3}$  Па и стабильные эксплуатационные характеристики. Их ресурс при давлении  $1 \cdot 10^{-4}$  Па > 40 тыс. ч.

Насос с диаметром входного отверстия 160 мм выполнен в трех модификациях: со стандартными электродными блоками (модели НМД-0,25 и НМД-0,4) и с электродными блоками, имеющими дифференциальные катоды (модель НМДИ-0,25).

## 12.21. Основные характеристики МЭРН серии НМД

Характеристика		Модель насоса				
		НМД-0,0063	НМД-0,025	НМД-0,063	НМД-0,1	НМД-0,16
Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с:						
по азоту		6·10 <sup>-3</sup>	0,02	0,06	0,11	0,16
по водороду		0,01	0,04	0,12	0,22	0,32
по аргону		3·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	5,5·10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-3</sup>
по гелию		6·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	6·10 <sup>-3</sup>	0,01	0,02
Диаметр входного отверстия, мм		25	100			
Разрядный ток при давлении 5·10 <sup>-5</sup> Па, мА		0,04	0,13	0,32	0,55	0,60
Масса насоса, кг		2,9	8,4	21	32	42
Блок питания	Ток короткого замыкания, А	0,1	0,2	0,6	0,65	0,75
	Масса, кг	21	20	37	35	50
Характеристика		Модель насоса				
		НМД-0,25	НМДИ-0,25	НМД-0,4	НМД-0,63	НМД-1
Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с:						
по азоту		0,25	0,23	0,40	0,65	1,0
по водороду		0,50	0,70	0,80	1,30	2,4
по аргону		0,01	0,07	0,02	0,03	0,06
по гелию		0,03	0,10	0,04	0,07	0,12
Диаметр входного отверстия, мм		160			250	
Разрядный ток при давлении 5·10 <sup>-5</sup> Па, мА		1,25	1,2	2,5	3,5	5,5
Масса насоса, кг		53		95	190	290
Блок питания	Ток короткого замыкания, А	0,75			1,0	1,0·2
	Масса, кг	47		50	47	47·2

Модель НМДИ-0,25 в сравнении с базовой моделью НМД-0,25 характеризуется существенно большей быстротой действия по аргону и другим инертным газам.

Для питания насосов обеих серий используются унифицированные блоки с оптимизированными вольт-амперными характеристиками. Напряжение холостого хода блоков составляет 7 кВ.

Для откачки крупных электровакуумных приборов в процессе их эксплуатации, длительного хранения и на промежуточных технологических этапах широко применяются миниатюрные разрядные на-

сосы с быстротой действия 10<sup>-5</sup>...10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/с; по их разрядному току одновременно индицируется молекулярная концентрация остаточного газа. Такие насосы содержат всего одну или несколько разрядных ячеек, что позволяет совмещать магнитопровод и корпус и использовать осесимметричные магнитные поля. В сравнении с насосами традиционного исполнения они имеют лучшие параметры и повышенную технологичность.

В электронных микроскопах, оже-спектрометрах, генераторных лампах нашли применение бесфланцевые насосы,



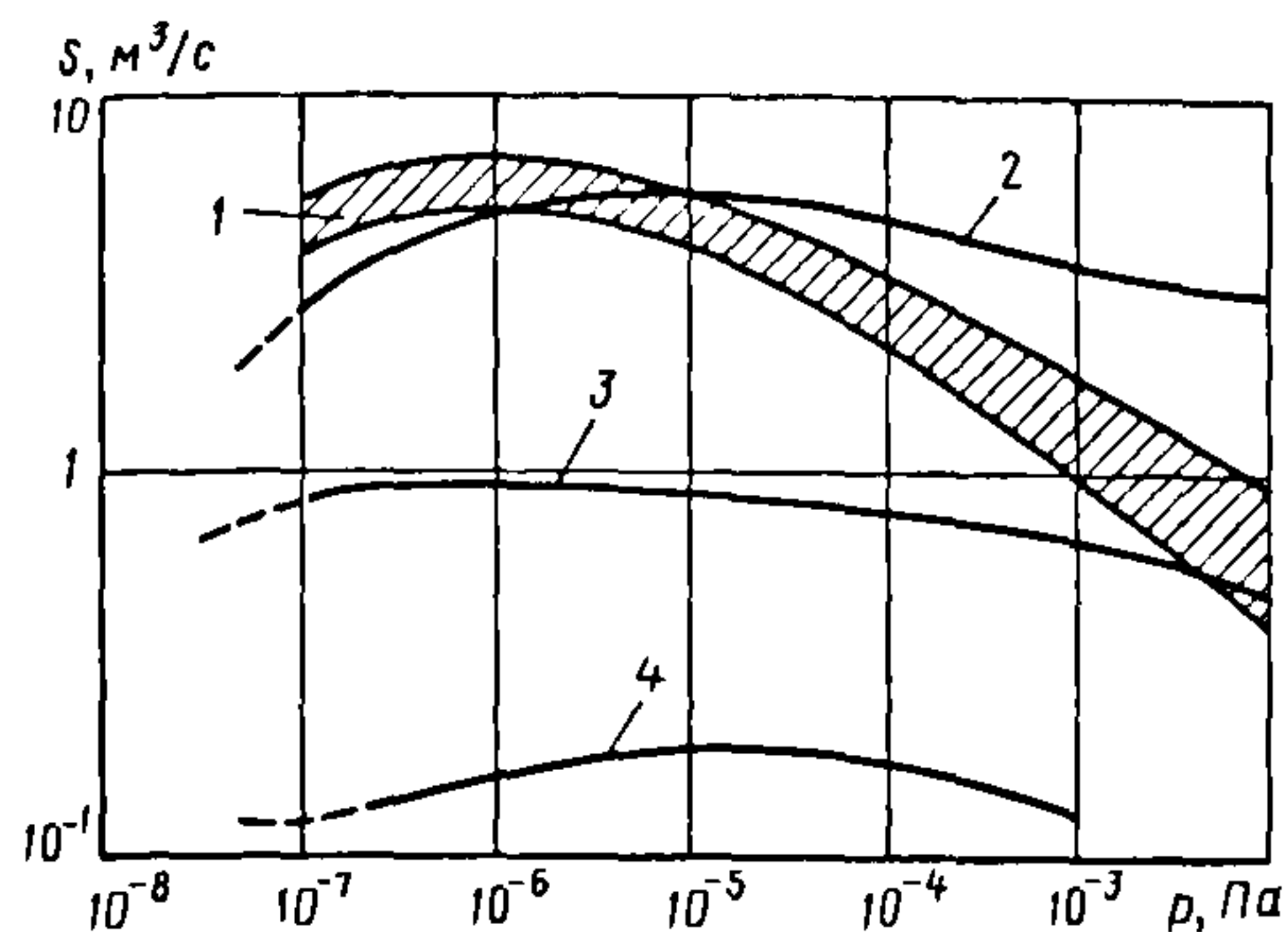


Рис. 12.21. Быстрота действия комбинированного насоса НВГМ-5 как функция от давления при охлаждении жидким азотом:

- 1 – при совместном включении разрядных модулей и плазменного испарителя (воздух);  
 2 – при совместном включении разрядных модулей и резистивного испарителя (воздух);  
 3, 4 – при включении только разрядных модулей (воздух, аргон)

привариваемые к откачиваемому изделию. Они отличаются рациональной компоновкой и улучшенными массогабаритными характеристиками. Весьма специфично конструктивное исполнение электродных блоков электрофизических комплексов с интегрированным вакуумным трактом (накопители заряженных частиц, коллайдеры, изохронные циклотроны и т.п.).

Блоки, встраиваемые непосредственно в вакуумные камеры, функционируют в магнитных полях откачиваемых комплексов, имеющих обычно экстремально высокую индукцию. Критерию оптимизации электродных блоков для таких комплексов отвечают анодные ячейки диаметром 2...3 мм. Технологически реализовать подобные ячейки в виде традиционной сотовой конфигурации затруднительно. Поэтому в электрофизических комплексах с интегрированным вакуумным трактом используют виртуальные анодные электроды в форме тонких перфорированных пластин. Чередую анодные и катодные пластины в полости вакуумной камеры, находящейся между полюсами электромагнита, и формируют откачные магниторазрядные модули.

Эффективность средств откачки на основе МЭРН удастся существенно повысить, применяя комбинированные геттерно-ионные насосы. В этих насосах в едином внутрикорпусном пространстве совмещены магниторазрядный и испарительный откачные блоки. Как следствие, на распыляемые пленки геттера попадают возбужденные в разряде газовые молекулы, обладающие большим коэффициентом прилипания. Благодаря этому быстрота действия комбинированного насоса намного превышает ее суммарное значение для отдельно взятых разрядного и испарительного блоков.

Эксплуатационные преимущества комбинированных насосов особо значимы в вакуумно-технологическом оборудовании с частым напуском атмосферы; системах с импульсной газовой нагрузкой; сверхвысоковакуумных установках. Комбинированные насосы выпускают промышленными сериями крупнейшие специализированные фирмы.

В простейшем варианте комбинированный насос представляет собой классический МЭРН, на цокольном фланце которого установлен резистивный испаритель. По такой схеме выполнены, к примеру, отечественные насосы семейства НВГМ с быстротой действия по воздуху 2,5 и 5,0 м³/с (рис. 12.21).

Съемный испаритель ориентирован по оси цилиндрического корпуса. Поверхностью, запываемой геттером, служит экран, окружающий испаритель; он может охлаждаться водой или жидким азотом. Лучами по периметру корпуса смонтированы разрядные триодные модули. Съемные внешние магниты из клиновидных пластин составляют в сборе замкнутую кольцевую систему, так что магнитные поля рассеяния практически отсутствуют.

В базовом конструктивном варианте в насосах используется прямонакальный испаритель на основе титан-молибденовых шпилек. Предельное остаточное давление насосов при охлаждении экрана жидким азотом  $5 \cdot 10^{-11}$  Па; максимальное рабочее

давление  $10^{-2}$  Па; давление запуска 10 Па. В альтернативном варианте применен плазменный испаритель со стабилизацией дуги вращающимся магнитным полем.

Насосы НВГМ имеют многофункциональное назначение. Они пригодны для стабильной откачки водорода, активных и инертных газов, а также парогазовых смесей агрессивных веществ, содержащих галогены и мышьяк.

Интересные перспективы сулят комбинированные насосы на основе плазменных источников геттерных пленок. В этих насосах оптимальным образом сочетаются два фактора, стимулирующие процесс откачки. Плазменный испаритель действует как мощный генератор носителей электрического заряда. Их инжекция в рабочую зону многократно увеличивает интенсивность пеннинговского либо магнетронного разряда и, соответственно, быстроту действия по активным и инертным газам. Магниторазрядный блок, в свою очередь, используется как «даровой» источник постоянного магнитного поля для стабилизации электродугового разряда и управления потоками заряженных частиц.

В развитие этой идеи разработаны различные варианты. Основу одного из них составляет комбинированный разрядно-испарительный блок (рис. 12.22). В блоке сочетаются мультипольные магнетронные ячейки и магнитостабилизированный плазменный источник геттерных пленок. Магнитное поле формируется кольцевыми магнитами со встречным включением полюсов. Арочная конфигу-

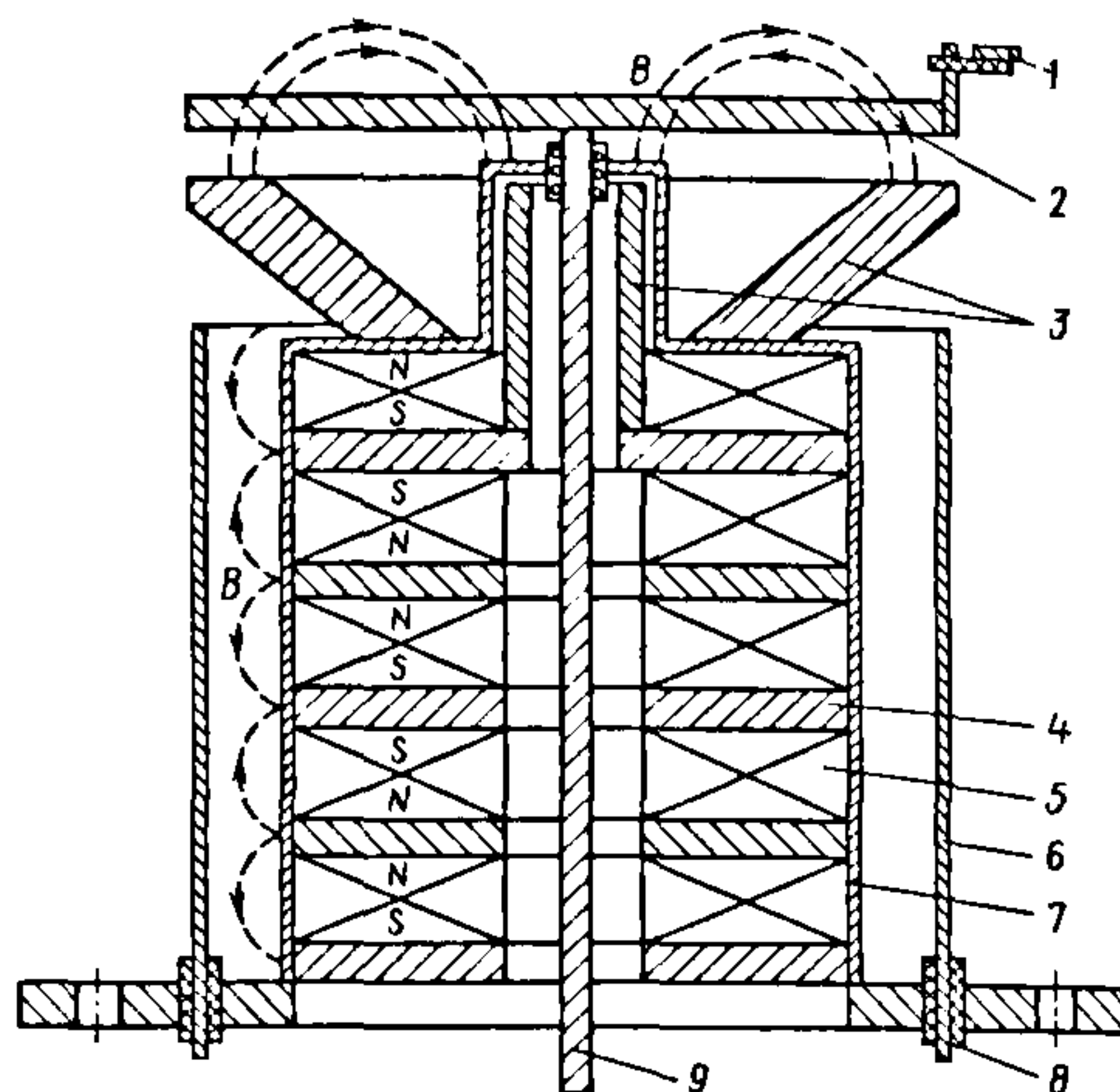


Рис. 12.22. Конструктивная схема разрядно-испарительного блока комбинированного насоса:

1 – устройство иницирования дугового разряда; 2 – катод плазменного испарителя; 3 – магнитопровод; 4 – ферромагнитная вставка; 5 – постоянный магнит; 6, 7 – соответственно анод и катод мультипольной магнетронной системы; 8 – токовод магниторазрядной системы; 9 – то же, плазменного испарителя

рация поля в зоне локализации катодных пятен создается магнитопроводом.

Как показали эксперименты, ток в магнетронных ячейках при включении плазменного испарителя возрастает на три порядка. Примерно пропорционально разрядному току увеличивается и быстрота действия по инертным газам. Инжекция в разрядный промежуток атомов титана с поверхности резистивного биметаллического испарителя дает существенно меньший эффект.



## Глава 13

### КРИОГЕННЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

В данном разделе рассмотрено четыре основных вида систем криогенной откачки, а именно: высоко- и низковакуумные крионасосы, вакуумные криoadсорбционные насосы, комбинированные крионасосы.

#### 13.1. ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ КРИОНАСОСЫ

Работа крионасосов основана на использовании низких температур для осаждения откачиваемых газов на специально сформированных криогенных поверхностях, размещенных в объеме насоса или непосредственно в вакуумной камере.

Принципиальная конструктивная схема насоса (рис. 13.1) содержит четыре основных элемента: криопанель, теплозащитный экран, охлаждающее устройство (на рисунке не показано) и герметичный корпус.

Криопанель является основным рабочим элементом насоса и представляет собой поверхность, охлажденную до криогенной температуры ( $T < 120\text{ K}$ ). Сама же температура определяется составом откачиваемых газов и уровнем рабочих давлений. Криопанели выполняют в виде дисков, цилиндров, змеевиков, сложных оребренных систем и т.п.

Криоткачка — эндотермический процесс, и для поддержания температуры криопанели на требуемом уровне необходимо

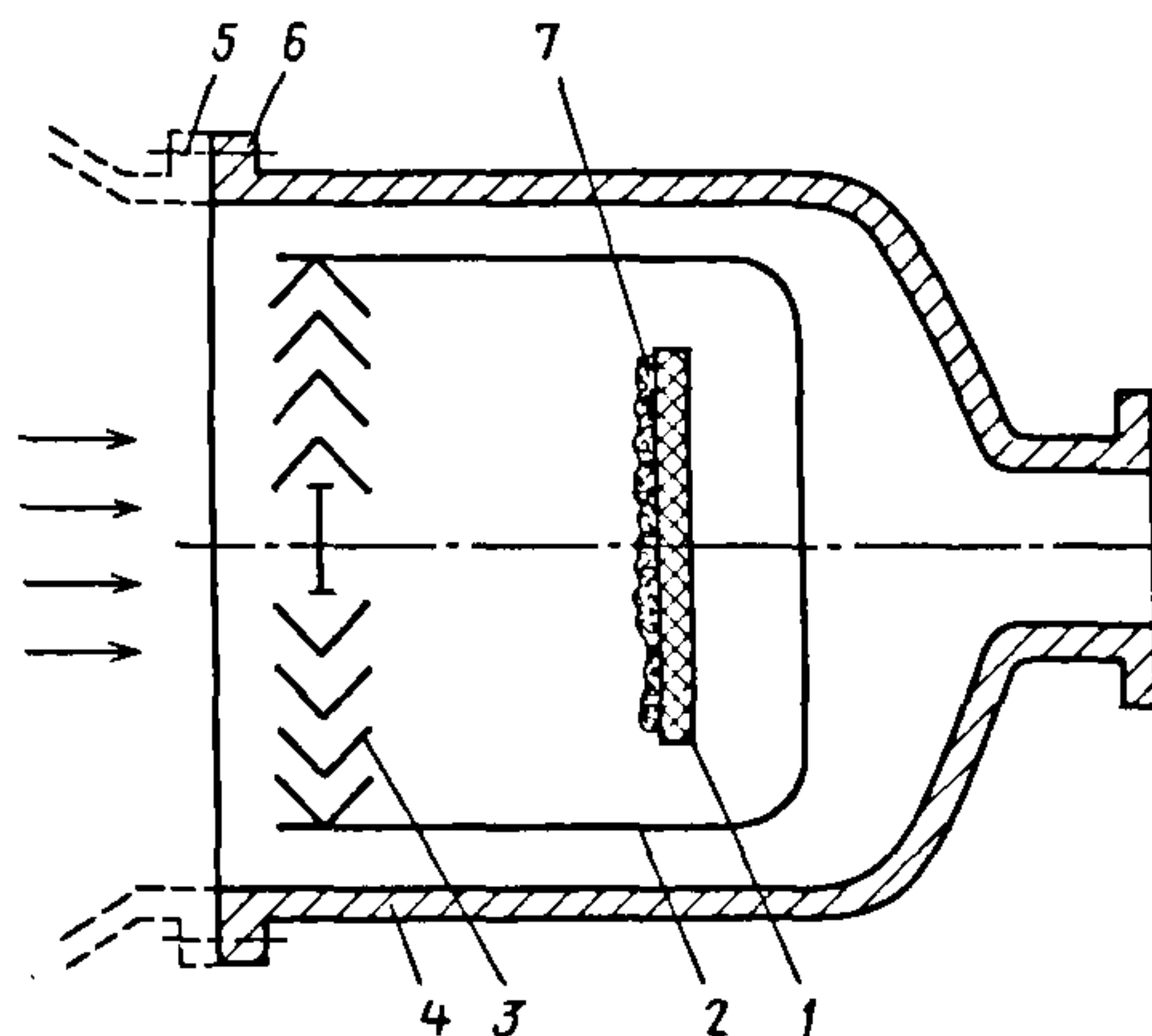


Рис. 13.1. Принципиальная схема крионасоса:

1 — криопанель; 2 — экран; 3 — жалюзи;  
4 — корпус; 5 и 6 — соответственно фланцы  
камеры и насоса; 7 — конденсат (криоосадок)

обеспечить отвод теплоты десублимации. Дополнительно нужно отводить тепловую энергию, которая поступает от поверхностей, имеющих более высокую температуру. Эти задачи решаются с помощью установки теплозащитных экранов и охлаждающих устройств.

Теплозащитный экран, выполненный, как правило, в виде жалюзийных решеток, устанавливают между корпусом и криопанелью. Температура экрана явля-

ется промежуточной между температурами корпуса и криопанели. Эффективность экрана не только определяется его температурой, но и зависит от того, насколько полно поглощается падающее со стороны корпуса тепловое излучение, что достигается специальным чернением поверхностей, обращенных к корпусу, например путем покрытия черным лаком или созданием на поверхности высокопористой фактуры с интегральной степенью черноты до 0,95.

Другим показателем работоспособности экрана является отражательная способность поверхностей, обращенных на криопанель: чем она выше, тем эффективнее будет действие экрана. Для этой цели применяют электролитическое золочение или серебрение поверхностей.

Система охлаждения служит для предварительного понижения температуры от нормального до рабочего уровня и для отвода тепловой энергии, выделяющейся при работе крионасоса. Корпус предназначен для монтажа и герметизации конструктивных элементов крионасоса. В вакуумных установках, имитирующих условия космического пространства, где скорости откачки превышают сотни кубических метров в секунду, криопанели вместе с экранами размещают непосредственно в объеме вакуумной камеры, что позволяет добиться максимальной эффективной быстроты откачки из-за отсутствия сопротивлений промежуточных коммуникаций. Такие насосы называют *встроенными*.

#### 13.1.1. Классификация и описание работы крионасосов

Крионасосы классифицируют по следующим основным признакам: принципу действия, температурному уровню криопанели, скорости действия, способу охлаждения криопанели и конструктивной схеме.

Температурный уровень криопанели – это основной фактор, определяющий дав-

ление паров откачиваемого газа, а следовательно, и предельный вакуум, создаваемый насосом. По температурному уровню крионасосы подразделяют на четыре группы в соответствии с температурами кипения азота (77 К), неона (27,1 К), водорода (20 К) и гелия (4,2 К) при атмосферном давлении.

Быстрота действия  $S$ , м<sup>3</sup>/с, в основном зависит от размеров криопанели, а значит, и от энергозатрат на ее охлаждение. По скорости действия крионасосы условно подразделяют на три группы: малые с  $S < 10$  (для их охлаждения требуется мощность в несколько ватт); средние с  $S = 10...50$  (мощность – несколько десятков ватт); крупные с  $S > 100$  (мощность – несколько сот и даже тысяч ватт). Наиболее распространены средние крионасосы; их выпускают на нормализованных фланцах.

По способу охлаждения крионасосы классифицируют на охлаждаемые сжиженными газами и газовыми холодильными машинами. Конструктивное оформление и эксплуатационные особенности насосов во многом зависят от способа охлаждения криопанелей.

По конструктивной схеме крионасосы бывают фланцевые и встроенные. Быстрота действия насосов первого типа в основном определяется проводимостью фланца. Эти насосы обычно выполняют в виде отдельного агрегата, подсоединяемого к откачиваемому сосуду. Насосы второго типа проектируют применительно к конкретным условиям эксплуатации. Криопанели в этих насосах обычно располагают в откачиваемом сосуде в непосредственной близости от источника газовой выделения.

В зависимости от термодинамического состояния откачиваемого газа внутреннюю полость крионасоса можно условно разделить на три области (рис. 13.2): область I расположена между стенкой 1 (входное сечение насоса) и теплозащитным экраном 2; область II – между экраном и верхним слоем криоосадка 3; область III – это слой сконденсированного или сорбированного газа на криопанели 4.



Входное сечение насоса условно показано в виде стенки 1, температура которой  $T_c$  равна температуре окружающей среды. Это сечение является источником потока  $Q_1$  откачиваемых газов, а также теплового потока  $\Phi_1$ .

Теплозащитный экран 2, температура которого  $T_3$  поддерживается охлаждающим устройством с холодопроизводительностью  $Q_{х.э}$  на более низком температурном уровне, чем  $T_c$ , воспринимает тепловые излучения от стенок, исключая возможность попадания их на криопанель (имеющую температуру  $T_n$ ). Молекулы откачиваемых газов, пройдя область I, ударяются о холодные поверхности экрана и теряют часть кинетической (тепловой) энергии. Одновременно часть молекул из газового потока  $Q_{э.к}$ , имеющих при температуре экрана  $T_3$  давление насыщенных паров меньше давления  $P_1$ , конденсируется на холодных поверхностях экрана и не попадает в область II. Часть молекул  $Q_{э.о}$ , отражаясь от экрана, возвращается в область I.

Тепловой экран (по аналогии со стенкой 1) можно считать источником  $Q_2$  потока газов для области II. При этом

$$Q_2 = Q_1 - (Q_{э.о} + Q_{э.к}). \quad (13.1)$$

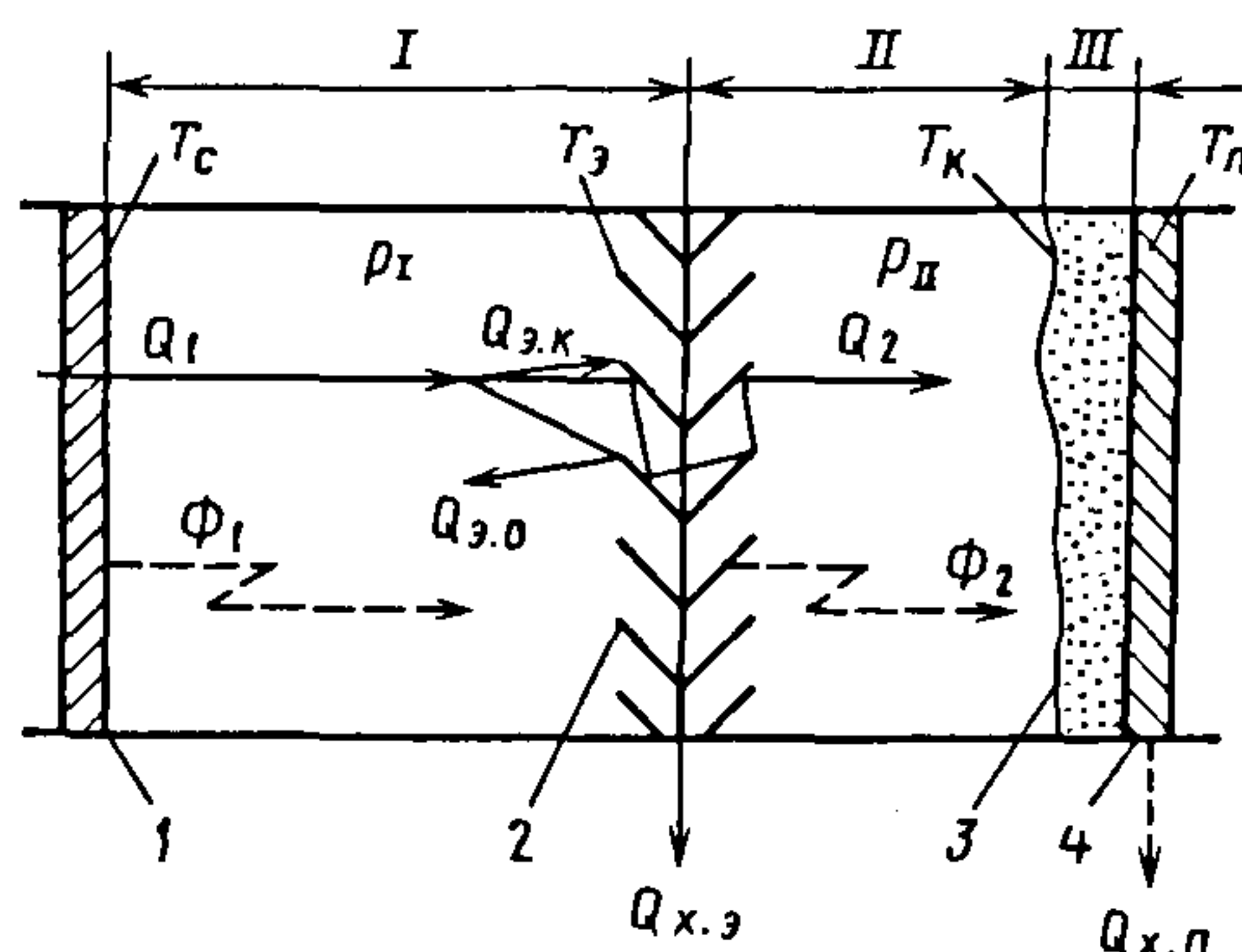


Рис. 13.2. Модель процесса откачки

Тепловой экран является также источником теплового потока  $\Phi_2$  на криопанель 4, поскольку температура экрана выше температуры криопанели. Кроме того, экран служит сопротивлением для прохода газов к откачиваемому элементу, поэтому давление в области II меньше, чем в области I ( $p_{II} < p_I$ ).

В области III газ находится в твердом состоянии при температуре  $T_n$ . Теплота излучения и конденсации отводится соответствующим охлаждающим устройством с холодопроизводительностью  $Q_{х.п}$ .

На рис.13.3 представлена классификация крионасосов.

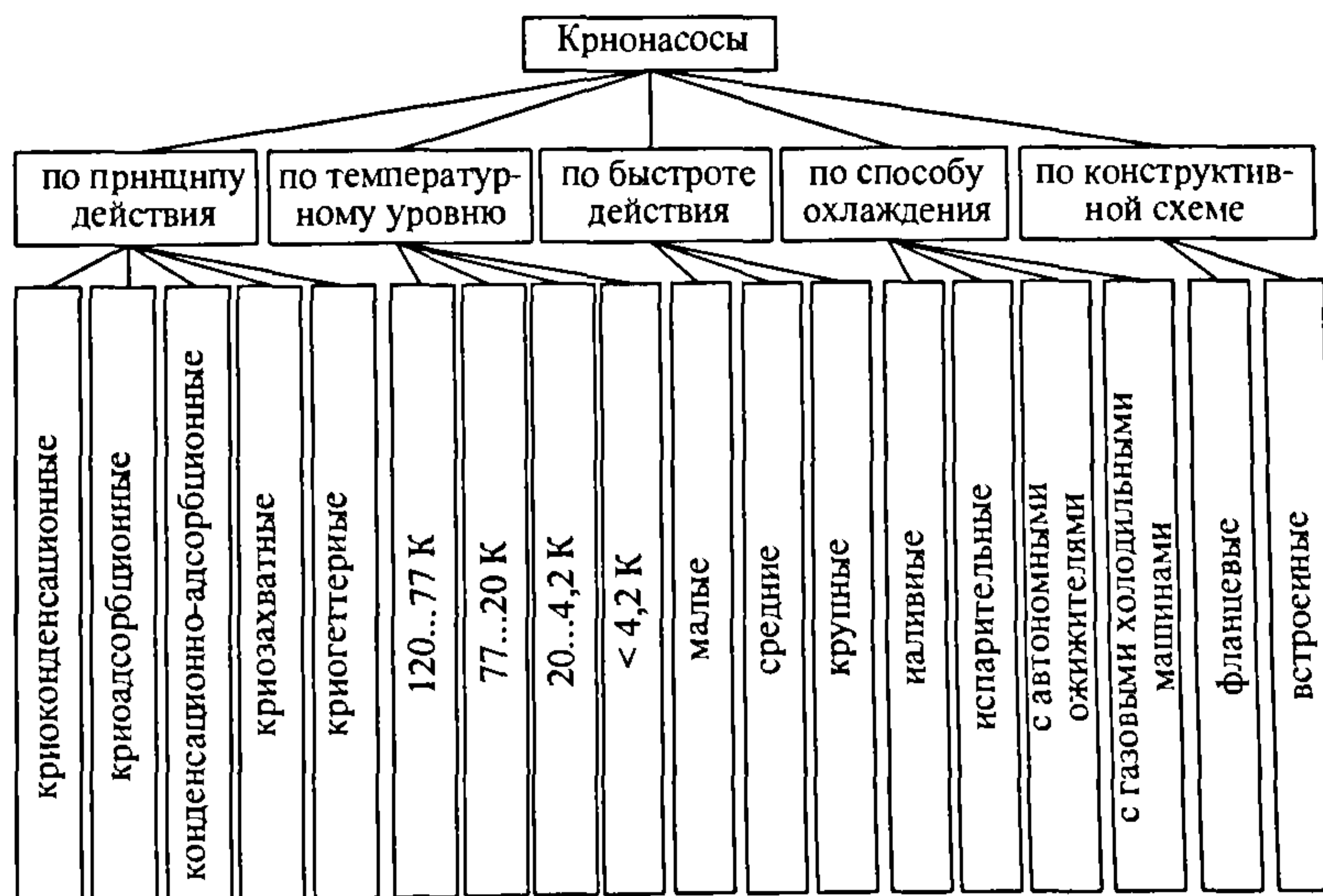


Рис. 13.3. Классификация крионасосов

### 13.1.2. Способы охлаждения

Наиболее простой способ охлаждения крионасосов – жидким криоагентом, наливаемым в сосуд, наружная поверхность которого служит криопанелью. Наливные крионасосы (рис. 13.4) выполняют по типу криостатов. Они отличаются простотой конструкции и малой стоимостью, не требуют подсоединения к электросети, водопроводу или сети сжатого воздуха; в них нет движущихся деталей. Эти насосы легко прогреваются, поэтому их применяют в высоковакуумных системах. В качестве криоагентов обычно используют сжиженные газы (азот, неон, водород или гелий).

Несмотря на относительно высокую стоимость жидкого гелия, ему отдают предпочтение по сравнению с жидким водородом, поскольку последний взрывоопасен. Преимущество жидкого гелия – низкая температура кипения, недостаток – весьма малая скрытая теплота парообразования, а следовательно, необходимость эффективной защиты от теплопритоков к криопанели насоса.

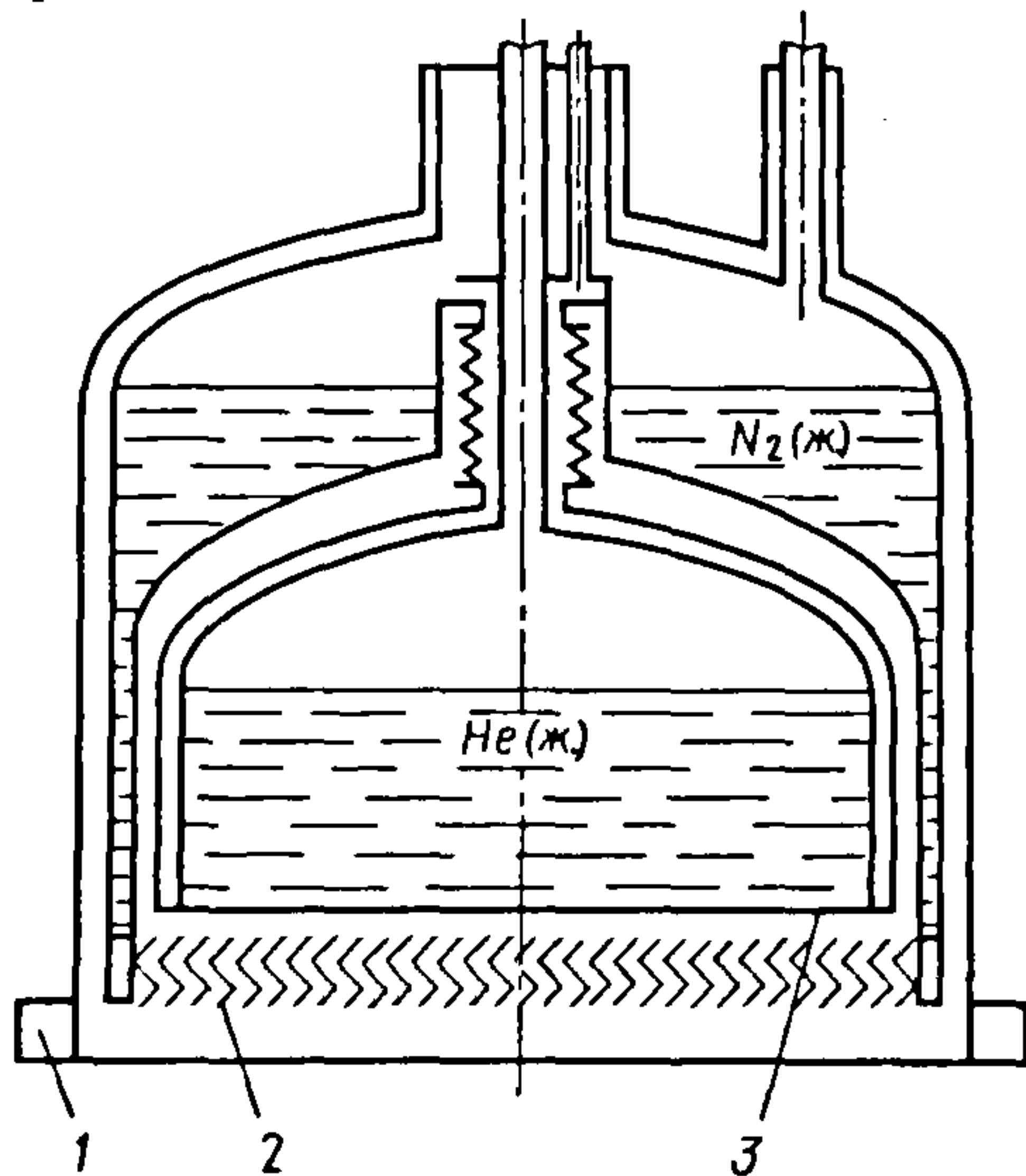


Рис. 13.4. Фланцевый наливной крионасос:  
1 – соединительный фланец; 2 – шевронный отражатель; 3 – криопанель;  
 $N_2(ж)$  и  $He(ж)$  – жидкие азот и гелий соответственно

Охлаждение с помощью встроенных газовых холодильных машин (криогенераторов) применяют для малых и средних крионасосов. Посредством криогенераторов достигаются температурный уровень 15...20 К и холодопроизводительность 2...50 Вт. Холодильные машины удобны тем, что для их работы требуются только электропитание и техническая охлажденная вода. Они работают без расхода рабочего газа (гелия), так как рабочее тело в холодильном цикле криогенератора совершает замкнутый цикл, оставаясь в газовой фазе. Насосы со встроенными криогенераторами экономичны, поскольку холод используется непосредственно в месте его получения. Охлаждение крупных насосов ( $S > 100 \text{ м}^3/\text{с}$ ) проводится с помощью выносных холодильно-газовых установок большой мощности.

### 13.1.3. Тепловые нагрузки

Тепловой расчет крионасосов разделяют на два этапа: определение тепловых нагрузок на криопанель и теплозащитный экран; определение расхода криоагентов или мощности криогенных устройств.

Тепловую нагрузку на криопанель создают потоки:

$\Phi_n$  – теплоизлучения с поверхностей, окружающих криопанель;

$\Phi_m$  – теплопроводности через тепловые мосты (механические опоры и держатели криопанелей, подвески заливных бачков, трубки для подвода жидких криоагентов и отвода испаряющихся газов и др.);

$\Phi_k$  – возникающие вследствие непрерывной конденсации откачиваемых газов;

$\Phi_r$  – теплопроводности остаточных газов от стенки насоса к криопанели.

Следовательно, суммарный тепловой поток  $\Phi_n = \Phi_n + \Phi_m + \Phi_k + \Phi_r$ .

При давлении  $< 0,1 \text{ Па}$  основными источниками тепловых нагрузок на криопанель являются тепловое излучение и теплопроводность по тепловым мостам. Теплота конденсации и теплопроводность остаточных газов в общем балансе тепловых нагрузок составляют незначительную долю, и ими можно пренебречь.



Тепловой поток к холодному телу, заключенному в полости теплого тела,

$$\Phi_{\text{и}} = \sigma \epsilon_{\text{пр}} F_2 (T_2^4 - T_1^4), \quad (13.2)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) – постоянная Стефана–Больцмана;  $\epsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты;  $F_2$  – площадь поверхности теплого тела;  $T_1$ ,  $T_2$  – температуры соответственно холодного и теплого тела; индексы «1» и «2» относятся соответственно к холодному и теплему телу.

Для коаксиальных цилиндров, концентрических сфер и параллельных плоскостей приведенную степень черноты определяют, считая диффузионное излучение серым, по формуле

$$\epsilon_{\text{пр}} = \left[ \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (13.3)$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – степень черноты соответственно холодного и теплого тела;  $F_1$  – площадь поверхности холодного тела.

Экспериментальные значения степени черноты для материалов, наиболее широко применяемых в крионасосах, приведены в табл. 13.1.

### 13.1. Экспериментальные значения степени черноты для ряда материалов

Материал	Значение $\epsilon$ при $T$ , К		
	300	78	7,3
Медь	0,03	0,019	0,015
Алюминий	0,03	0,018	0,011
Коррозионно-стойкая сталь	0,1	0,06	–
Углеродистая сталь	0,6	–	
Серебро	0,03	0,01	

Тепловой поток, возникающий вследствие теплопроводности остаточных газов, Вт:

$$\Phi_{\text{г}} = 3,2 \cdot 10^{-3} F_{\text{п}} \frac{\alpha_{\text{п}} \alpha_{\text{с}}}{\alpha_{\text{с}} + (F_{\text{п}} / F_{\text{с}})(1 - \alpha_{\text{с}}) \alpha_{\text{с}}} \frac{k+1}{k-1} \frac{p}{\sqrt{MT_{\text{г}}}} (T_{\text{с}} - T_{\text{п}}), \quad (13.5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент аккомодации;  $k$  – показатель адиабаты;  $M$  – молекулярная масса;  $F$  – площадь поверхности;  $T_{\text{г}}$  – температура газа; индексы «п» и «с» соответствуют панели и стенке.

Ориентировочные значения коэффициента аккомодации  $\alpha$  приведена в табл. 13.3.

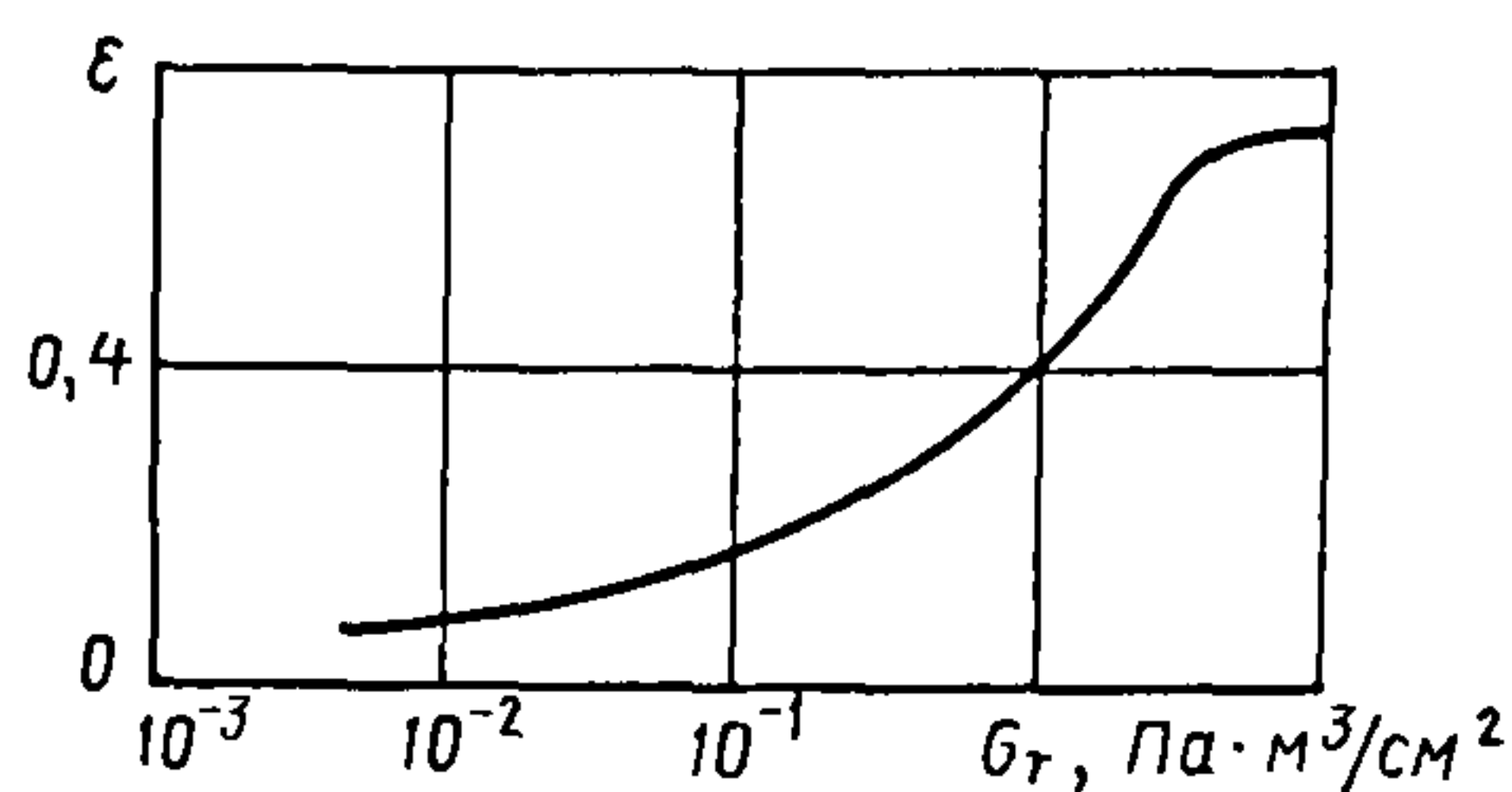


Рис. 13.5. Зависимость степени черноты  $\epsilon$  криопанели от количества  $G_{\text{к}}$  конденсата (азота)

Степень черноты криопанели сильно зависит от количества газа (например, азота), сконденсированного на единице площади ее поверхности (рис. 13.5).

Чернением значение  $\epsilon$  для теплозащитных экранов можно увеличить до 0,9 и более в очень широком диапазоне длин волн, однако конденсация на этих поверхностях паров воды и углеводородов существенно уменьшает  $\epsilon$ .

Наиболее типичные конструкции экранов и варианты их расположения показаны на рис. 13.6. Характеристики этих вариантов приведены в табл. 13.2.

Тепловой поток через тепловые мосты, Вт:

$$\Phi_{\text{м}} = \frac{F}{l} \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT \approx \frac{F}{l} \bar{\lambda} (T_2 - T_1), \quad (13.4)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения моста, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина моста, м;  $\lambda$  – теплопроводность материала моста, Вт/(м·К);  $\bar{\lambda}$  – средняя теплопроводность материала моста в температурном интервале  $T_1 \dots T_2$ , Вт/(м·К).

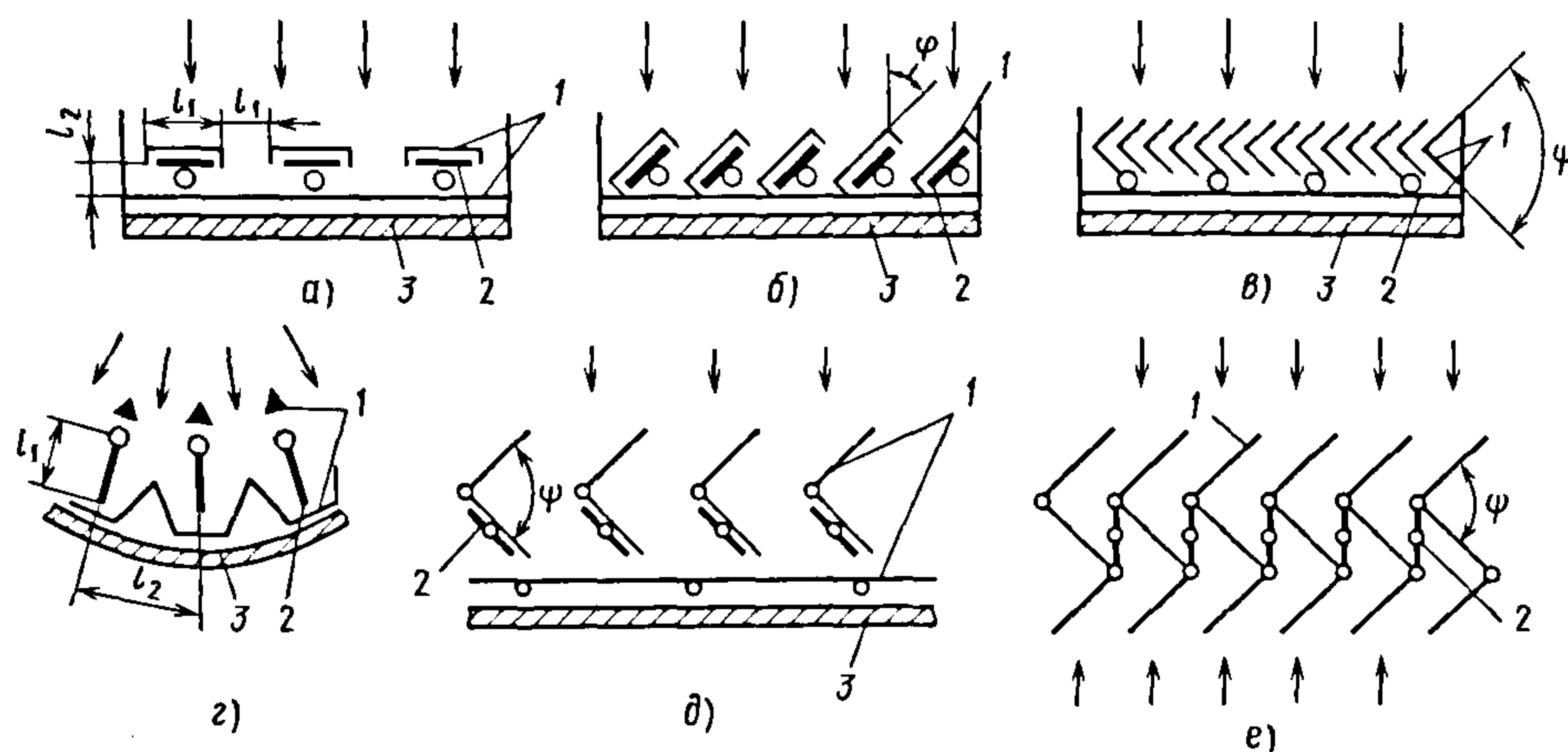


Рис. 13.6. Конструктивные схемы защитных экранов и криопанелей  
(стрелки соответствуют направлению откачки):  
1 — экран; 2 — криопанель; 3 — корпус

### 13.2. Конструктивные схемы экранов и варианты их расположения

Конструктивная схема	Геометрический фактор		Вероятность пролета	Коэффициент тепловой защиты
	Обозначение	Значение		
Плоскоститковая (см. рис. 13.6, а)	$l_1/l_2$	0,080	0,090	0,010
		0,125	0,122	
		0,250	0,134	
Наклонно-щитковая (см. рис. 13.6, б)	$\varphi,^\circ$	45	0,360	0,015
Шевронная (см. рис. 13.6, в)	$\psi,^\circ$	60	0,290	0,007
		90	0,324	
		120	0,360	
Рационально-защитная (см. рис. 13.6, г)	$l_1/l_2$	1,0	0,70	—
		1,5	0,84	
Шевронно-щитковая (см. рис. 13.6, д)	$\psi^\circ$	90	0,370	
Комбинированная двух- сторонняя (см. рис. 13.6, е)			0,330	

### 13.3. Ориентировочные значения коэффициента аккомодации

T, К	Значение $\alpha$ для		
	воздуха	H <sub>2</sub>	He
300	0,8...0,9	0,3	0,3
77	1,0	0,5	0,6
20		1,0	

Тепловой поток, обусловленный конденсацией, Вт:

$$\Phi_k = \gamma F_p p \frac{1}{\sqrt{2\pi R T_r M}} \Delta I, \quad (13.6)$$

где  $\gamma$  — коэффициент конденсации;  
 $R = 8,314$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная;  $\Delta I$  — среднее изменение энтальпии при конденсации.



На рис. 13.7 приведена зависимость теплового потока  $\Phi_k$  от давления азота, водорода и паров воды (на единицу площади поверхности криопанели) при разности температур от 300 К до абсолютно нулю с учетом теплоты испарения и конденсации при  $\gamma = 1$ .

Если газ предварительно охлажден, например на азотоохлаждаемом теплозащитном экране, удельный тепловой поток на криопанель, обусловленный конденсацией, будет меньше. При высоком вакууме этот тепловой поток составляет незначительную часть тепловых потоков и им можно пренебречь.

Расход криоагента на предварительное охлаждение крионасоса в интервале температур  $T_1 \dots T_2$  при условии использования только теплоты испарения криоагента практически можно определить по формуле

$$Q_m = (m/r)\bar{c}_m(T_1 - T_2), \quad (13.7)$$

где  $m$  — охлаждаемая масса насоса;  $r$  — скрытая теплота парообразования;  $\bar{c}_m$  — средняя удельная теплоемкость.

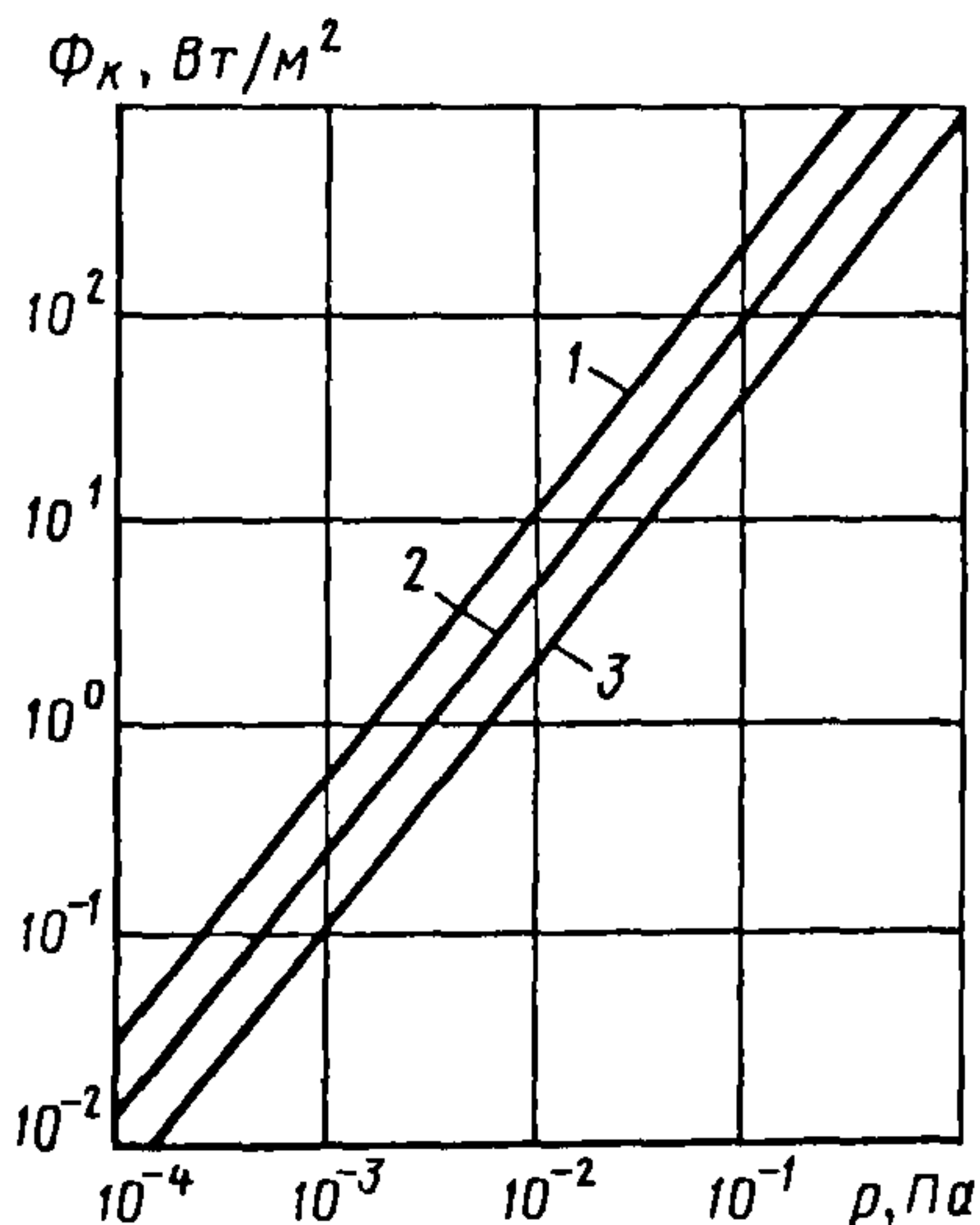


Рис. 13.7. Зависимость теплового потока  $\Phi_k$ , обусловленного конденсацией, от давления  $p$  для паров воды, водорода и азота (линии соответственно 1, 2 и 3)

Если при охлаждении насоса используют теплоту испарения и холод, то расход криоагента, г,

$$Q_m = \frac{m\bar{c}_m}{\bar{c}_p} \ln \left[ \frac{r + (T_n - T_n)\bar{c}_p}{r + (T_n - T_n)\bar{c}_p} \right], \quad (13.8)$$

где  $T_n$  — начальная температура;  $T_n$  — температура испарения;  $\bar{c}_p$  — средняя удельная теплоемкость газа.

Расход испаряемого криоагента во время работы крионасоса

$$Q_k = \Phi_n / r, \quad (13.9)$$

#### 13.1.4. Откачные характеристики

Основные характеристики крионасосов — это предельное остаточное давление, быстрота действия и ресурс работы.

Предельное остаточное давление  $P_{пр}$  зависит от многих факторов, таких, как величина и состав газовой смеси, конструкция элементов, их газопроницаемость, герметичность конструкции. Для идеально обезгаженного, герметичного и газонепроницаемого насосов можно говорить о предельном вакууме по отдельным компонентам газовой смеси, который с учетом эффекта Кнудсена равен

$$p_{пр} = p_{нас} \sqrt{T_c / T_n}, \quad (13.10)$$

где  $p_{нас}$  — давление насыщенного пара при температуре криопанели  $T_n$ ;  $T_c$  — температура газа в криопространстве между экраном и корпусом насоса.

Быстрота действия конденсационного насоса  $S$  зависит от проводимости  $U_3$  теплозащитного экрана:

$$S = S_k U_3 / (S_k + U_3), \quad (13.11)$$

где  $S_k$  — скорость конденсации на криопанели;

$$S_k = k_n S_T F_n. \quad (13.12)$$

Здесь  $k_n$  — коэффициент прилипания;  $S_T$  — удельная теоретическая быстрота действия;  $F_n$  — площадь поверхности криопанели.

Коэффициент  $k_n$  учитывает сложность процесса конденсации и влияние различных факторов на его протекание.

Удельная теоретическая быстрота действия  $S_{т.м}$ , м<sup>3</sup>/с·м<sup>2</sup> (для конденсационного насоса – удельная теоретическая скорость конденсации) зависит от вида течения газа:

при молекулярном течении

$$S_{т.м} = 36,4 \sqrt{T_r / M}; \quad (13.13)$$

при вязкостном течении

$$S_{т.в} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2kRT_r}{(k+1)M}}, \quad (13.14)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

Ресурс конденсационного насоса определяется допустимой толщиной конденсата. Температура  $T_k$  поверхностного слоя конденсата из-за наличия температурного градиента (по толщине) не должна превышать температуры, при которой давление насыщенных паров откачиваемых газов более допустимого. Толщина слоя конденсата (криоосадка)

$$d_o = \bar{\lambda} \frac{(T_k - T_n)}{\Phi_n + \Phi_k}. \quad (13.15)$$

В практических расчетах для области высокого вакуума потоком  $\Phi_k$  можно пренебречь.

### 13.2. НИЗКОВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Низковакуумная откачка газов конденсационными насосами, как и высоковакуумная, возможна, если температура криопанели ниже температуры насыщенных паров откачиваемого газа. При откачке воздуха до низкого и среднего вакуума (от атмосферного давления до 1 Па) температура насыщенных паров изменятся от 81,6 до 34,5 К. В связи с этим распространены криоагрегаты, переохлажденные откачкой паров жидкого и твердого азота, жидкого неона с температурой 11...75 К.

Конструктивно низковакуумные насосы разделяют на имеющие сборник жидкого конденсата (если откачка возду-

ха происходит при  $p > 5,9$  Па) и без сборника жидкого конденсата. При использовании жидкого криоагента конструкция насоса включает в себя сосуд для криоагента; если криопанель охлаждается газобразным криогентом, то он циркулирует по змеевику, находящемуся в тепловом контакте с криоагентом.

Большая часть низковакуумных насосов снабжена предварительными теплообменниками с жидким азотом, в которых откачиваемый воздух перед конденсацией на криопанели охлаждается до температуры 80 К. Для уменьшения энергозатрат на откачку и количества используемого в насосе криоагента его подают в криопанели в рефрижераторном режиме.

Основные преимущества низковакуумных конденсационных насосов – высокая чистота остаточной атмосферы; отсутствие шумов и различных выбросов в окружающую среду; малые капитальные затраты на изготовление; недостатки – повышенные энергозатраты на откачку газов с давлением, близким к атмосферному; необходимость установки для получения криоагента.

В настоящее время разработаны низковакуумные конденсационные насосы для откачки камер объемом  $1 \cdot 10^{-3} \dots 120$  м<sup>3</sup>.

**Методика расчета низковакуумных конденсационных насосов.** При расчете низковакуумных насосов основное внимание обращают на определение массы требуемого для откачки криоагента или мощности охлаждающих устройств, а также интенсивность процессов теплообмена в предварительных теплообменниках и конденсирующем элементе для нахождения длительности процесса откачки [11, 46].

В отличие от высоковакуумных насосов в низковакуумном расход криоагента определяется не теплопритоками излучением и через тепловые мосты, а количеством теплоты, выделяемой при конденсации.



Масса газа, откачиваемого крионасосом,

$$m_r = \frac{V}{RT_r}(p_0 - p_{\text{нас}}), \quad (13.16)$$

где  $V$  – объем откачиваемой камеры;  $T_r$  – температура газа в откачиваемой камере;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $p_0$  – начальное давление откачки;  $p_{\text{нас}}$  – давление насыщенных паров откачиваемого газа при температуре криоагента.

Скорость процесса конденсации откачиваемого газа в жидкую фазу, как правило, превышает скорость поглощения теплоты криоагентом, поэтому время откачки при использовании жидкого криоагента

$$t = \frac{m_r Q_0}{\Phi_{\text{уд}}(\Delta T_{\text{кр}}) F_{\text{п}}}, \quad (13.17)$$

где  $Q_0$  – количество теплоты, отдаваемой откачиваемым газом при охлаждении до температуры конденсации и при конденсации;  $\Phi_{\text{уд}}(\Delta T_{\text{кр}})$  – тепловой поток при кипении криоагента;  $F_{\text{п}}$  – площадь поверхности криопанели.

При откачке в рефрижераторном режиме время откачки

$$t_p = m_r Q_0 / Q, \quad (13.18)$$

где  $Q$  – холодопроизводительность криогенной рефрижераторной установки криоагента.

Масса криоагента

$$m_k = m_r Q_0 / r, \quad (13.19)$$

где  $r$  – скрытая теплота парообразования криоагента.

Мощность, затрачиваемая на откачку в рефрижераторном режиме

$$N = N_0 t_p = N_0 m_r Q_0 / Q, \quad (13.20)$$

где  $N_0$  – мощность электрооборудования криогенной установки.

Если низковакуумный насос снабжен теплообменником для предварительного охлаждения откачиваемого газа на температурном уровне, отличном от температуры конденсации (например, при использовании жидкого азота, кипящего при ат-

мосферном давлении), то интенсивность охлаждения газа зависит от режима течения газа (турбулентное и ламинарное) и определяется критериальным уравнением

$$Nu = f(Re, Pr, l/d),$$

где  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$  – критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;  $l$  – длина участка охлаждения;  $d$  – характерный диаметр.

Значение коэффициента Нуссельта позволяет рассчитать коэффициент теплоотдачи и температуру, до которой охлаждается газ в предварительном теплообменнике.

При конденсации откачиваемого газа в низковакуумном насосе в твердую фазу время откачки определяется скоростью увеличения толщины слоя криоосадка на охлажденных панелях; при этом справедливо соотношение

$$t_o = \left( h^2 - 2 \frac{\lambda_k}{\alpha} h \right) \frac{Q' \rho_k}{2 \Delta T_k \lambda_k}, \quad (13.21)$$

где  $h$  – толщина криоосадка;  $\lambda_k$ ,  $Q'$ ,  $\rho_k$  – соответственно теплопроводность, теплота десублимации и полнота криоосадка;  $\Delta T_k$  – перепад температуры в криоосадке;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от криопанели к криоагенту.

### 13.3. АДСОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия адсорбционного насоса основан на температурной обратимости физической адсорбции, т.е. поглощении газа твердым адсорбентом при снижении температуры и выделении его адсорбентом при повышении температуры.

Адсорбционные насосы применяют в системах безмасляной откачки для получения как форвакуума, так и весьма низких давлений (до  $10^{-5}$  Па) в замкнутых объемах.

В качестве адсорбента в насосах используют пористые вещества с сильно развитой внутренней поверхностью ( $F_{\text{ад}} \approx 1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ), к которым относятся синтетические и природные цеолиты, активные угли и силикагели. На практике для этих целей наиболее широко применяют

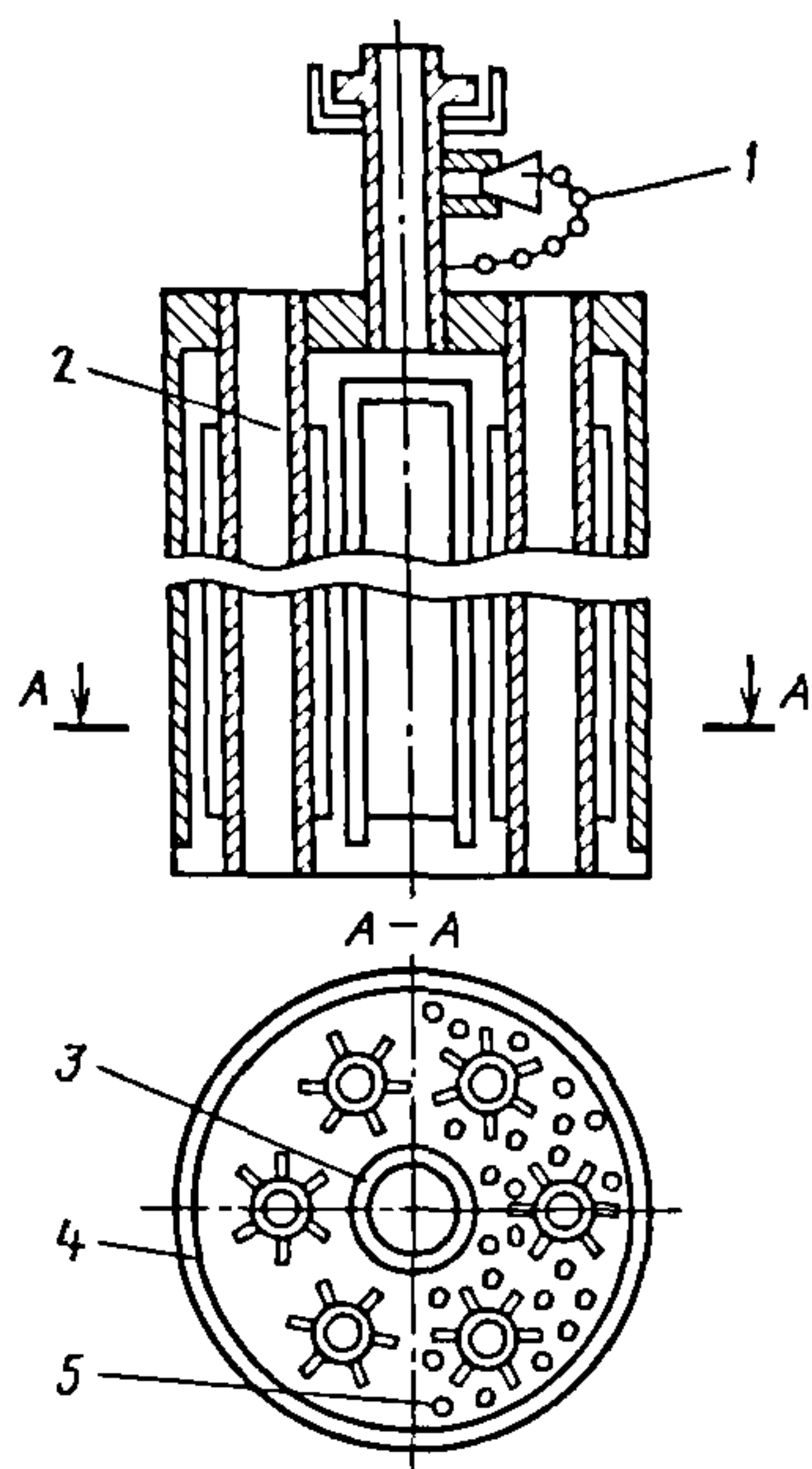


Рис. 13.8. Погружной адсорбционный насос с медными ребрами:

1 – заглушка; 2 – дополнительные охлаждающие трубки; 3 – внутренний цилиндр для подвода газа; 4 – корпус; 5 – адсорбент

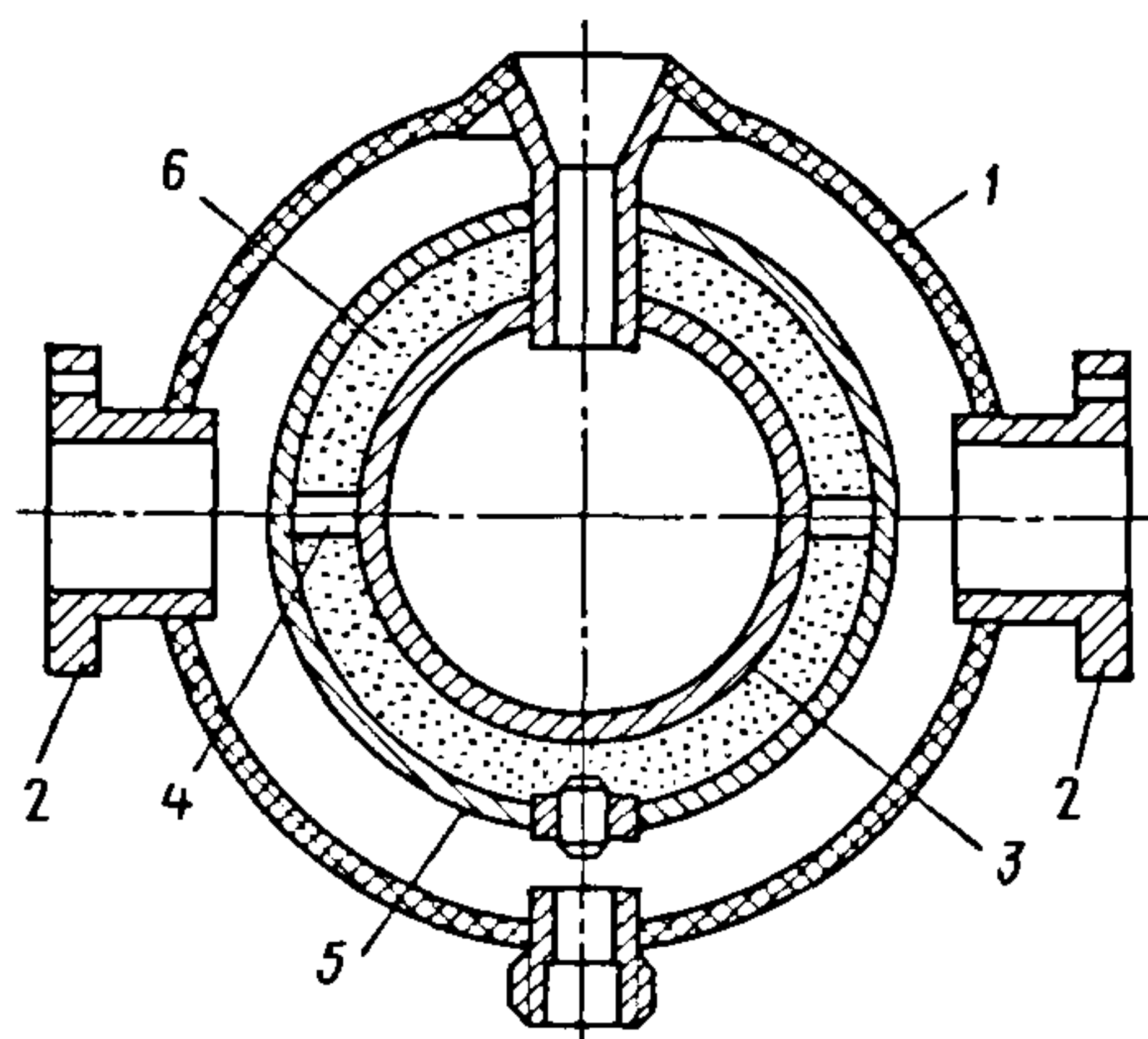


Рис. 13.9. Сферический криоадсорбционный насос:

1 – корпус; 2 – соединительные патрубки;  
3 – резервуар для криогенной жидкости;  
4 – экваториальное ребро; 5 – пористый экран;  
6 – адсорбент

углеродные гранулированные сорбенты типа СКТ, специализированные вакуумный цеолит СаЕН-4В и углеродный тканый сорбент типа КУТ-2.

Адсорбционные насосы создают вакуум, свободный от углеводородов, имеют практически неограниченный срок службы и при эксплуатации не создают шума.

Адсорбционный насос представляет собой устройство, содержащее слой адсорбента толщиной  $\leq 30$  мм, расположенного внутри корпуса на развитой теплообменной поверхности криопанели, омываемой криоагентом. Корпус насоса снабжен, как правило, двумя патрубками: один (большого диаметра) служит для подсоединения к камере, другой (меньшего диаметра) – для регенерации. Насос может включать в себя устройство для нагрева адсорбента и предохранительный узел на случай аварийного повышения давления в объеме насоса.

На рис. 13.8 приведена схема погружного форвакуумного адсорбционного насоса с теплообменными поверхностями, выполненными в виде ребер. Ребра этих насосов изготовлены из меди.

Недостатки адсорбционного насоса – необходимость периодической регенерации и значительное время пуска.

Основные характеристики адсорбционных насосов – быстрота действия по откачиваемому газу и ресурс – определяются температурой сорбента и его удельной адсорбционной емкостью.

Температура адсорбента в адсорбционных насосах всегда выше температуры криоагента и характеризуется функцией от распределения или полем, которое при расчете удобно заменить средней температурой  $\bar{T}_{ад}$ , отнесенной к массе адсорбента. Средняя температура адсорбента определяется системой тепловой защиты. Для реальных систем при использовании для защиты адсорбента от теплового потока шевронных или жалюзийных охлаждаемых теплозащитных экранов средняя температура на 10...20 К выше температуры криоагента. В случае применения пористых теплозащитных экранов, изготовленных из медного порошка, средняя температура адсорбента превышает температуру криоагента на несколько градусов (рис. 13.9).



По эффективности тепловой защиты адсорбента, а также технологичности конструкции насоса пористый теплозащитный экран предпочтителен. Пористые экраны изготавливают из порошков фосфористой меди спеканием при температуре 1073...1425 К в восстановительной среде при свободной насыпке в специальные пресс-формы. При этом используют порошки различных фракций, основные параметры которых, а также получаемых экранов приведены в табл. 13.4.

13.4. Основные параметры порошков и получаемых из них экранов

№ фракции	Диаметр частиц, мкм			Пористость материала экрана П,
	$d_{\min}$	$d_{\max}$	$d$	
1	80	200	105	0,295...0,315
2	200	350	245	0,325...0,340
3	350	500	400	0,350...0,395
4	500	630	555	0,400...0,425
5	630	1000	755	0,415...0,460

Для адсорбционных кассет основных видов – плоской, цилиндрической и сферической – с пористыми экранами среднюю температуру адсорбента вычисляют по формулам соответственно

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}_{\text{ад}} &= 0,5(\bar{T}_3 + T_{\text{кр}}); \\ \bar{T}_{\text{ад}} &= T_{\text{кр}} + (\bar{T}_3 - T_{\text{кр}}) \left[ \frac{D_3^2}{D_3^2 - D_{\text{кр}}^2} - \frac{1}{2 \ln(D_3 / D_{\text{кр}})} \right]; \\ \bar{T}_{\text{ад}} &= T_{\text{кр}} + \frac{D_3(\bar{T}_3 - T_{\text{кр}})}{D_3 - D_{\text{кр}}} - \frac{3}{2} \frac{(\bar{T}_3 - T_{\text{кр}}) D_{\text{кр}} D_3}{D_3^2 - D_3 D_{\text{кр}} + D_{\text{кр}}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (13.22)$$

где  $T_{\text{кр}}$  – температура криоагента;  $\bar{T}_3$  – температура на периферии адсорбционного слоя, принимаемая равной средней температуре теплозащитного экрана;  $D_{\text{кр}}$  и  $D_3$  – диаметры сосуда соответственно для криоагента и теплозащитного экрана.

Если экран охлаждают отводом теплоты на криогенную поверхность через тепловые мосты, его средняя температура

$$\bar{T}_3 = T_{\text{кр}} + \frac{\Phi_{\text{уд}} \Pi l_{\text{м}}}{n d_{\text{м}} \lambda_{\text{м}}} + \frac{\Phi_{\text{уд}} \Pi^2}{l_{\text{м}} 2 n^2 \lambda_3 d_3}, \quad (13.23)$$

где  $\Phi_{\text{уд}}$  – удельный тепловой поток на единицу поверхности экрана;  $\Pi$  – периметр теплозащитного экрана;  $l_{\text{м}}$  и  $d_{\text{м}}$  – соответственно длина и толщина теплового моста;  $n$  – число тепловых мостов;  $\lambda_{\text{м}}$  и  $\lambda_3$  – теплопроводность материалов соответственно моста и экрана;  $d_3$  – толщина экрана.

Теплопроводность материала экрана определяется пористостью П, этого материала и теплопроводностью компактного (монокристаллического) материала, используемого для изготовления экрана. Теплопроводность материала экрана можно определить по эмпирической формуле

$$\lambda_3 = 0,14 \lambda_{\text{к}} (1 - \text{П}_3) / (1 + \text{П}_3), \quad (13.24)$$

где  $\lambda_{\text{к}}$  – теплопроводность компактного (монокристаллического) материала исходного порошка.

Удельный тепловой поток для наливных насосов

$$\Phi_{\text{уд}} = \sigma \varepsilon_{\text{пр}} (T_2^4 - T_3^4), \quad (13.25)$$

где  $T_2$  – температура корпуса насоса.

Приведенную степень черноты для цилиндрической и сферической кассет определяют по формуле для плоской кассеты

$$\varepsilon_{\text{пр}} = (1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}, \quad (13.26)$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – степени черноты соответственно поверхности экрана и внутренней поверхности корпуса (для пористых экранов из порошка фосфористой меди  $\epsilon_2 = 0,3$  и практически не зависит от размера частиц и температуры экрана).

Для насосов с охлаждаемым корпусом (погружных) тепловой поток определяют опытным путем. В уравнения (13.22) для определения средней температуры адсорбента не входят его теплофизические параметры, поскольку стационарное температурное поле в слое адсорбента при отсутствии внутренних тепловых источников полностью определяется граничными условиями, т.е. температурами экрана, ребер и криоагента. Теплофизические параметры адсорбента влияют на время его охлаждения, а также на скорость нагрева при регенерации. В связи с этим для расчета нестационарных тепловых процессов необходимо знать теплофизические характеристики слоев адсорбента в условиях вакуума и криогенных температур. Ориентировочные данные для цеолитов и углей приведены в табл. 13.5.

Углеродные адсорбенты имеют более высокий коэффициент температуропроводности, чем цеолиты, поэтому для адсорбционных насосов, в которых ис-

пользуют активные угли, характерна меньшая тепловая инерционность, чем для цеолитовых.

Удельная адсорбционная емкость адсорбента  $v$  – основной расчетный параметр, который зависит от давления, температуры и условий подготовки сорбента. При определении удельной адсорбционной емкости фактор подготовки учитывают коэффициентом регенерации, который показывает, какая часть потенциальной адсорбционной емкости реализуется в насосе. Для цеолита СаЕН-4В значения коэффициента регенерации в зависимости от давления, температуры и времени регенерации приведены в табл. 13.6. При отклонении реального процесса регенерации от приведенных параметров ориентировочные значения коэффициента регенерации можно определить интерполяцией. При проектных расчетах для углеродных сорбентов с учетом их гидрофобности можно принять  $\beta_p = 0,90 \dots 0,95$ .

Для определения емкостных характеристик адсорбентов используют графические зависимости удельной емкости от давления при постоянной температуре адсорбента (изотермы адсорбции).

### 13.5. Ориентировочные данные для слоев цеолитов и углей

Адсорбент	$a \cdot 10^5, \text{ м}^2/\text{ч}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	$C, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
Гранулированный цеолит	1...2	1...1,5	0,3...0,4	650	600...800
Порошковый цеолит	4...5	4...5	2...3	350	
Гранулированный уголь	—	2...2,5	—	450	300...400
Угольная ткань – плотная намотка				600	200...300
Угольная ткань – рыхлая намотка		7...8		200	

Условные обозначения:  $a, \lambda, \alpha$  – соответственно коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, теплоотдачи;  $\rho$  – плотность слоя;  $C$  – теплоемкость.

Примечание. Степень черноты поверхности слоя адсорбента составляет 0,3...0,4.



13.6. Значение  $\beta_r$  при давлении, Па, и температуре, К, регенерации

Время регене- рации, ч	13,3 Па				4,0 Па			
	343 К	373 К	393 К	423 К	343 К	373 К	393 К	423 К
1	0,117	0,205	0,316	0,471	0,153	0,269	0,349	0,610
5	0,133	0,233	0,355	0,494	0,186	0,324	0,413	0,664
10	0,138	0,245	0,359	0,515	0,193	0,347	0,449	0,687
20	0,142	0,251	0,366	0,516	0,198	0,351	0,460	0,695
30	0,143	0,253	0,370	0,518	0,203	0,359	0,469	0,702
40	0,144	0,255	0,371		0,207	0,365	0,477	0,709
50	0,145	0,257	0,377		0,209	0,371	0,485	0,715
60	0,146	0,258	0,373		0,212	0,376	0,492	0,720

Время регене- рации, ч	1,33 Па				> 0,13 Па
	343 К	373 К	393 К	423 К	293 К
1	0,183	0,322	0,429	0,634	—
5	0,213	0,231	0,525	0,72	—
10	0,254	0,425	0,546	0,754	0,107
20	0,258	0,439	0,568	0,771	0,122
30	0,263	0,454	0,583	0,783	0,126
40	0,268	0,461	0,587	0,794	0,132
50	0,273	0,466	0,589	0,802	0,134
60	0,277	0,469	0,591	0,809	0,139

На рис. 13.10, а приведены изотермы адсорбции водорода на используемых в вакуумной технике адсорбентах при  $T = 20,4$  К. При этой температуре удельная адсорбционная емкость велика ( $v \geq 10^3$  Па·м<sup>3</sup>/кг) даже при очень низком давлении ( $p \leq 10^{-4}$  Па). Многие промышленные системы не требуют такого низкого давления, поэтому в них допустимы более высокие температуры. На рис. 13.10, б приведены изотермы адсорбции азота при  $T = 77$  К.

Для определения удельной адсорбционной емкости графическим методом необходима сетка изотерм. При ее отсутствии можно воспользоваться аналитичес-

кой зависимостью удельной адсорбционной емкости от температуры и давления — термическим уравнением адсорбции. В вакуумной технике обычно применяют два уравнения: Генри и Дубинина-Радускевича.

Уравнение Генри, справедливое для вакуумных адсорбентов при степени заполнения  $\theta \leq 0,1$ , имеет вид

$$v = Bp \exp [E_{ад}/(R \bar{T}_{ад})], \quad (13.27)$$

где  $B$  — эмпирическая константа;  $E_{ад}$  — адсорбционный потенциал (теплота адсорбции);  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Значения  $B$  и  $E_{ад}$  приведены в табл. 13.7

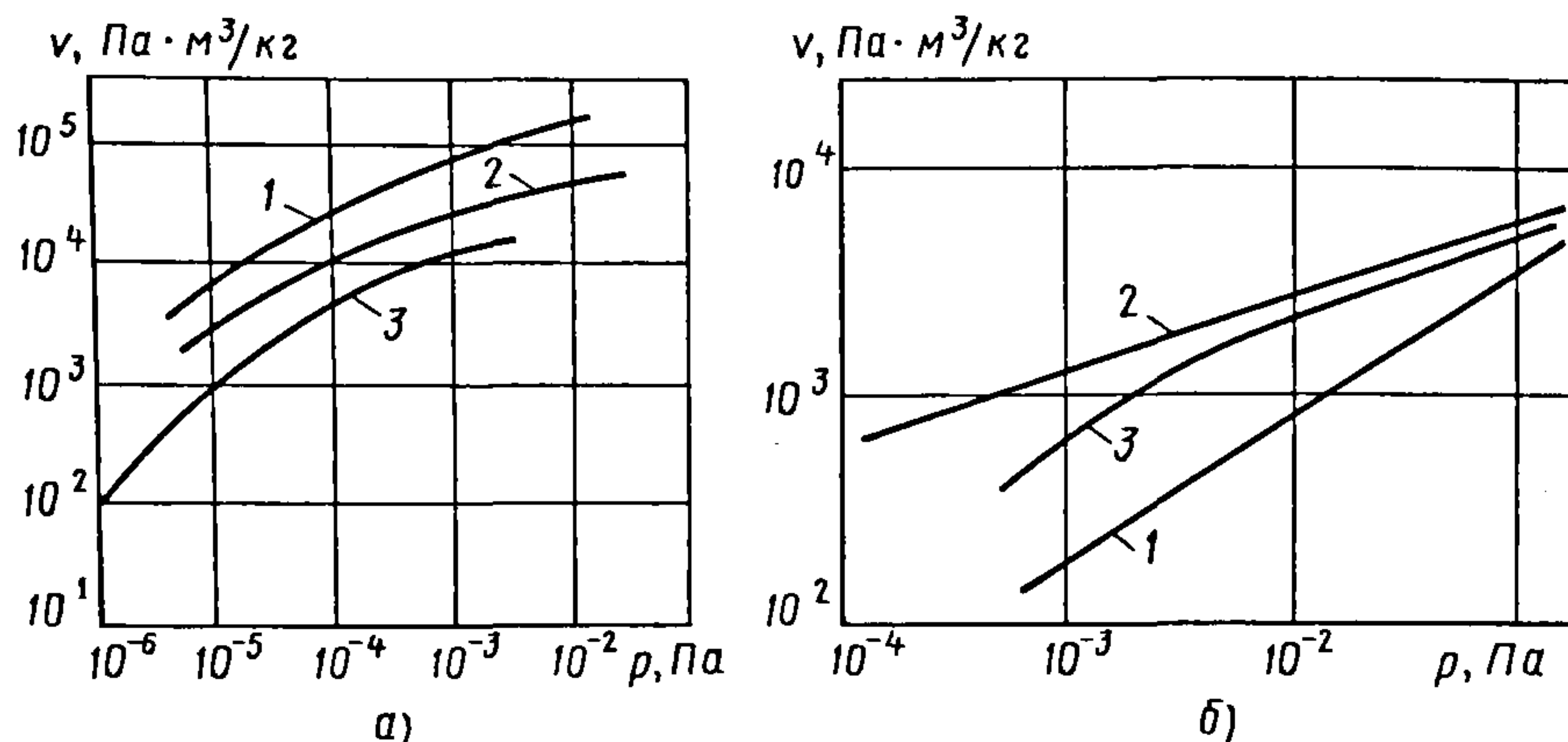


Рис. 13.10. Изотермы адсорбции водорода при  $T = 20,4$  К (а) и азота при  $T = 77$  К (б) для сорбентов: 1 – активный уголь СКТ-4; 2 – угольная ткань КУТ-2; 3 – цеолит СаЕН-4В

### 13.7. Постоянные уравнения Генри

Газ	$B$ , м³/кг, для		$E_{ад}$ , Дж/моль
	СаЕН-4В	СКТ-4; КУТ-2	
$N_2$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	12 560
$O_2$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	—	9630
$Ar$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	
$H_2$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	5000
$CH_4$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	16 300
He	—	$1,0 \cdot 10^{-1}$	585

Уравнение Дубинина–Радускевича, удовлетворительно описывающее адсорбцию на цеолитах и углеродных сорбентах при  $\theta > 0,20$ , имеет вид

$$v = \frac{w_0}{a} \exp \left[ -A \frac{\bar{T}_{ад}^2}{\beta^2} \left( \lg \frac{p_{нас}}{p} \right) \right], \quad (13.28)$$

где  $w_0$  – удельный объем адсорбционного пространства (табл. 13.8);  $a$  – молярный объем пара в адсорбированной фазе, принимаемый равным молярному объему жидкости;  $A$  – постоянная пористой структуры (см. табл. 13.8);  $p_{нас}$  – давление насыщенного пара при температуре  $T_{ад}$ ;  $\beta$  – коэффициент аффинности характеристических кривых.

Если в качестве стандартного пара при определении постоянных  $w_0$  и  $A$  использовался азот, то для  $N_2$ ;  $O_2$  и  $Ar$  коэффициент  $\beta$  собственно равен 1; 0,9 и 0,87.

### 13.8. Постоянные уравнения Дубинина–Радускевича

Адсорбент	$w_0 \cdot 10^4$ , м³/кг	$A \cdot 10^6$ , К⁻²
Цеолит	2,4	2,9
Уголь	4,0	0,6
Угольная ткань КУТ-2	3,0	0,4

При выборе адсорбента кроме емкостных характеристик следует учитывать требования техники безопасности. Так, углеродные адсорбенты нежелательно использовать в системах, где они могут контактировать с жидким кислородом (это может привести к взрыву), однако применение углеродных адсорбентов в совокупности с пористыми экранами в насосах для откачки сред с большой долей кислорода взрывобезопасно; при откачке агрессивных сред необходимо применять специальные кислотостойкие адсорбенты.

После выбора адсорбента по описанной методике находят его удельную емкость с учетом коэффициента регенерации  $\beta_p$  и определяют поглотительную способность насоса при рабочем давлении. Предельное остаточное давление адсорбционного насоса (при условии, что насос идеально обезгажен и герметичен)



$$P_{\text{рп}} = \sum_{i=1}^n P_{0i} \frac{V_{\text{н}} + \beta_{\text{р}} M_{\text{ад}} B_i \exp [E_{i\text{ад}} / (RT_0)]}{V_{\text{н}} + \sqrt{\bar{T}_{\text{ад}} / T_0} \cdot \beta_{\text{р}} M_{\text{ад}} B_i \exp [E_{i\text{ад}} / (R\bar{T}_{\text{ад}})]}, \quad (13.29)$$

где  $P_{0i}$  – парциальное начальное давление  $i$ -го компонента газовой смеси в объеме насоса перед пуском;  $V_{\text{н}}$  – внутренний объем насоса;  $M_{\text{ад}}$  – масса адсорбента в насосе;  $T_0$  – температура газа в объеме насоса перед пуском, как правило, равная температуре окружающей среды;  $n$  – число компонентов в газовой смеси.

Если известен спектр газовыделения корпуса насоса  $Q_{\text{г}i}$  и негерметичность  $Q_{\text{нг}}$ , то значение выражения по формуле (13.29) увеличивается на

$$\Delta p \approx \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\text{г}i}}{S_{\text{д}i}} + 0,8 \frac{Q_{\text{нг}}}{S_{\text{д}N_2}} + 0,2 \frac{Q_{\text{нг}}}{S_{\text{д}O_2}}, \quad (13.29a)$$

$S_{\text{д}i}$  – действительная быстрота действия адсорбционной кассеты по  $i$ -тому компоненту газовой смеси (формула [13.31]).

Быстроту откачки адсорбционной полости в зависимости от ее геометрических характеристик и коэффициента прилипания  $k_{\text{п}}$  удобно определять графически (рис. 13.11).

Для определения быстроты откачки  $S_{\text{вх}}$  на входе в адсорбционную полость необходимо знать коэффициент  $k_{\text{п}}$ , отношение длины адсорбционной полости к ширине  $h/\Delta$  и проводимость  $U_{\text{вх}}$  входного сечения адсорбционной полости.

Коэффициент прилипания характеризуется отношением действительной быстроты действия адсорбционной кассеты к теоретической:

$$k_{\text{п}} = S_{\text{д}}/S_{\text{т}}. \quad (13.30)$$

Действительная быстрота действия адсорбционной кассеты

$$S_{\text{д}} = S_{\text{ад}} U_{\text{з}} / (S_{\text{ад}} + U_{\text{з}}), \quad (13.31)$$

где  $S_{\text{ад}}$  – быстрота откачки адсорбционного слоя за экраном;  $U_{\text{з}} = u_{\text{з}} F_{\text{з}}$  – проводимость экрана ( $u_{\text{з}}$  – удельная проводимость экрана;  $F_{\text{з}}$  – площадь поверхности экрана).

Удельная проводимость пористых экранов,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,

$$u_{\text{з}} = 21,56 \frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{з}}} \Pi_{\text{з}}^2 \sqrt{\frac{T_{\text{г}}}{M}}, \quad (13.32)$$

где  $d_{\text{ч}}$  – средний размер частиц исходного порошка, из которого изготовлен экран (см. табл. 13.4), м;  $d_{\text{з}}$  – толщина экрана, м;  $\Pi_{\text{з}}$  – пористость материала экрана (см. табл. 13.4);  $T_{\text{г}}$  – температура газа, поступающего к экрану (обычно принимают равной температуре корпуса насоса), К;  $M$  – молекулярная масса откачиваемого газа.

Для шевронных экранов

$$U_{\text{з}} = (0,20 \dots 0,25) S_{\text{т}}.$$

Быстрота откачки адсорбционного слоя

$$S_{\text{ад}} = \frac{D_{\text{эф}} \beta_{\text{р}} B \exp [E_{\text{ад}} / (R\bar{T}_{\text{ад}})]}{k_{\text{з}} R_{\text{з}}^2} M_{\text{ад}}, \quad (13.33)$$

где  $D_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент диффузии (для азота и кислорода  $D_{\text{эф}} \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ ; для аргона  $D_{\text{эф}} \approx 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ );  $B$  – см. в табл. 13.7;  $k_{\text{з}}$  – коэффициент формы зерна адсорбента (для плоских, цилиндрических и сферических зерен соответственно  $k_{\text{з}} = 1/3$ ;  $1/8$  и  $1/15$ );  $R_{\text{з}}$  – характерный размер зерна.

Теоретическая быстрота действия

$$S_{\text{т}} = 36,4 F_{\text{з}} \sqrt{T_{\text{г}} / M}. \quad (13.34)$$

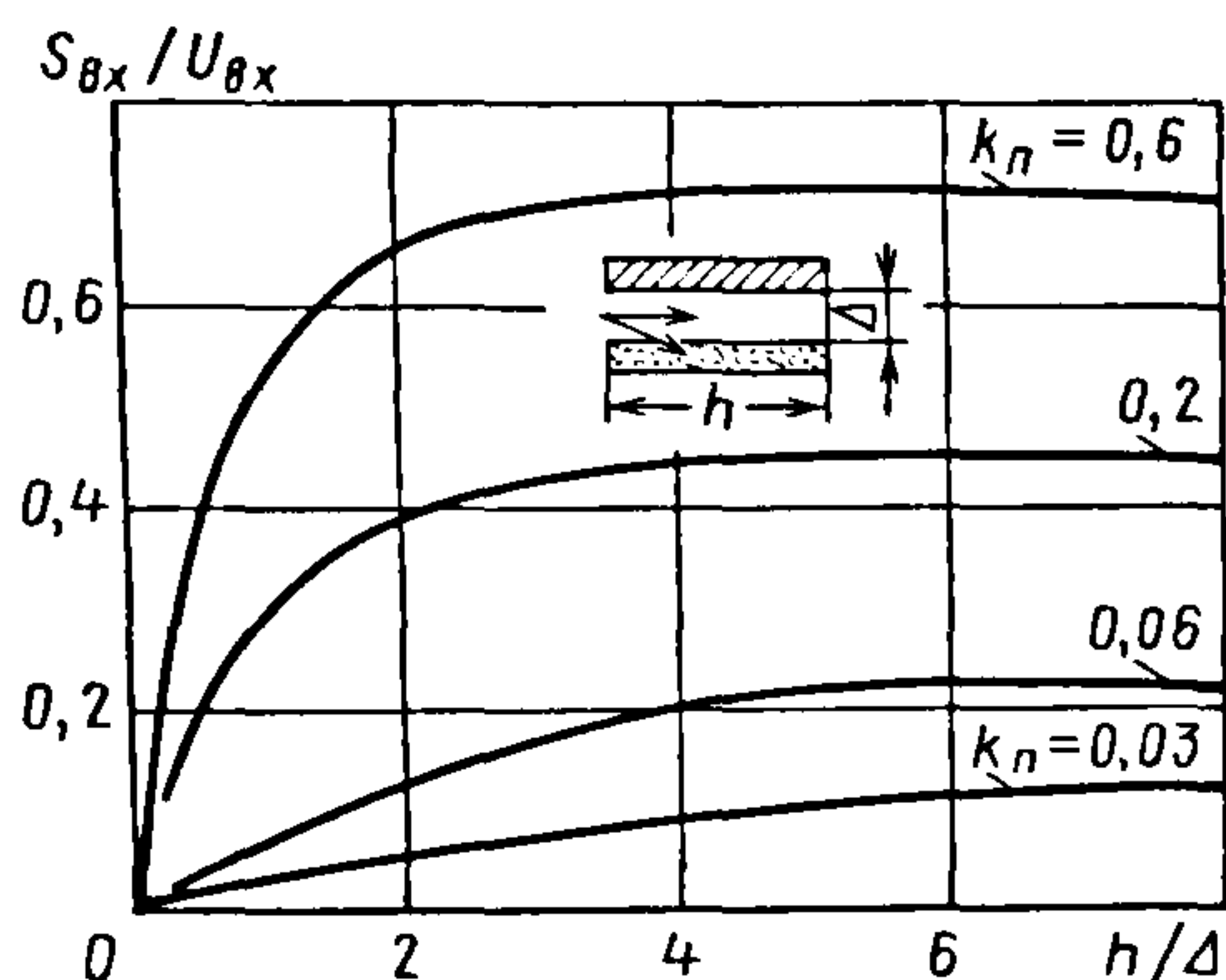


Рис. 13.11. Зависимость относительной скорости откачки односторонней адсорбционной полости от ее геометрического фактора

Проводимость входного сечения адсорбционной полости вычисляют по известным уравнениям вакуумной техники, а начальную быстроту действия насоса – по формуле

$$S_0 = S_{вх} U_n / (S_{вх} + U_n), \quad (13.35)$$

где  $U_n$  – проводимость входного патрубка насоса.

Найденная таким образом быстрота действия насоса соответствует малой степени заполнения сорбента газом ( $\theta \approx 0$ ).

Поглотительная способность насоса определяется предельным количеством газа, который может поглотить насос при заданном равновесном давлении над адсорбентом:

$$L = M_{ад} v, \quad (13.36)$$

где  $M_{ад}$  – масса адсорбента в насосе, кг;  $v$  – удельная емкость адсорбента при заданном режиме подготовки,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ .

Масса адсорбента

$$M_{ад} = V \rho, \quad (13.37)$$

где  $V$  – объем адсорбционной кассеты,  $\text{м}^3$ ;  $\rho$  – насыпная плотность сорбента,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Расчет по удельной емкости, соответствующей средней температуре адсорбента, сопряжен с ошибкой, которая ведет

к занижению реальной поглотительной способности, особенно в условиях малых заполнений, где адсорбция подчиняется уравнению типа Генри (13.27). Для получения более точного значения нужно определить температурное поле в слое адсорбента, подставить полученную функцию в уравнение адсорбции и выполнить интегрирование по всему объему адсорбента.

Адсорбционные насосы относятся к устройствам периодического действия; по мере насыщения сорбента давление в вакуумной системе возрастает, а быстрота действия уменьшается. Зависимость быстроты действия от степени заполнения  $\theta$  можно описать полуэмпирической зависимостью

$$S = S_0 \exp(-k_n \theta), \quad (13.38)$$

где  $S_0$  – начальная быстрота действия насоса при  $\theta \approx 0$ ;  $k_n$  – постоянная насыщения ( $k_n = 5 \dots 10$ );  $\theta = m/L$  – степень насыщения адсорбента газом, показывающая, какая часть поглотительной способности насоса израсходована ( $m$  – количество газа, поглощенного сорбентом,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3$ ).

Постоянная насыщения  $k_n$  зависит от диаметра пор адсорбента: с его увеличением  $k_n$  уменьшается. Так, для цеолитов типов Е и А постоянная  $k_n \approx 10$ , для цеолитов типа Х постоянная  $k_n \approx 7$ , для углеродных сорбентов  $k_n \approx 5$ .

Время, в течение которого адсорбционный насос обеспечивает давление не выше требуемого ( $p \leq p_p$ ),

$$t_p = \frac{L}{Q k_n} \ln(S_0 p_p / Q), \quad (13.39)$$

где  $p_p$  – рабочее давление, Па;  $Q$  – поток газа,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ .

Если время  $t_p$  больше или равно продолжительности рабочего цикла установки, то достаточно одного насоса; в противном случае требуются дополнительные



насосы, которые в зависимости от условий работы установки можно подключать параллельно или последовательно.

#### 13.4. КРИОГЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ НАСОСЫ

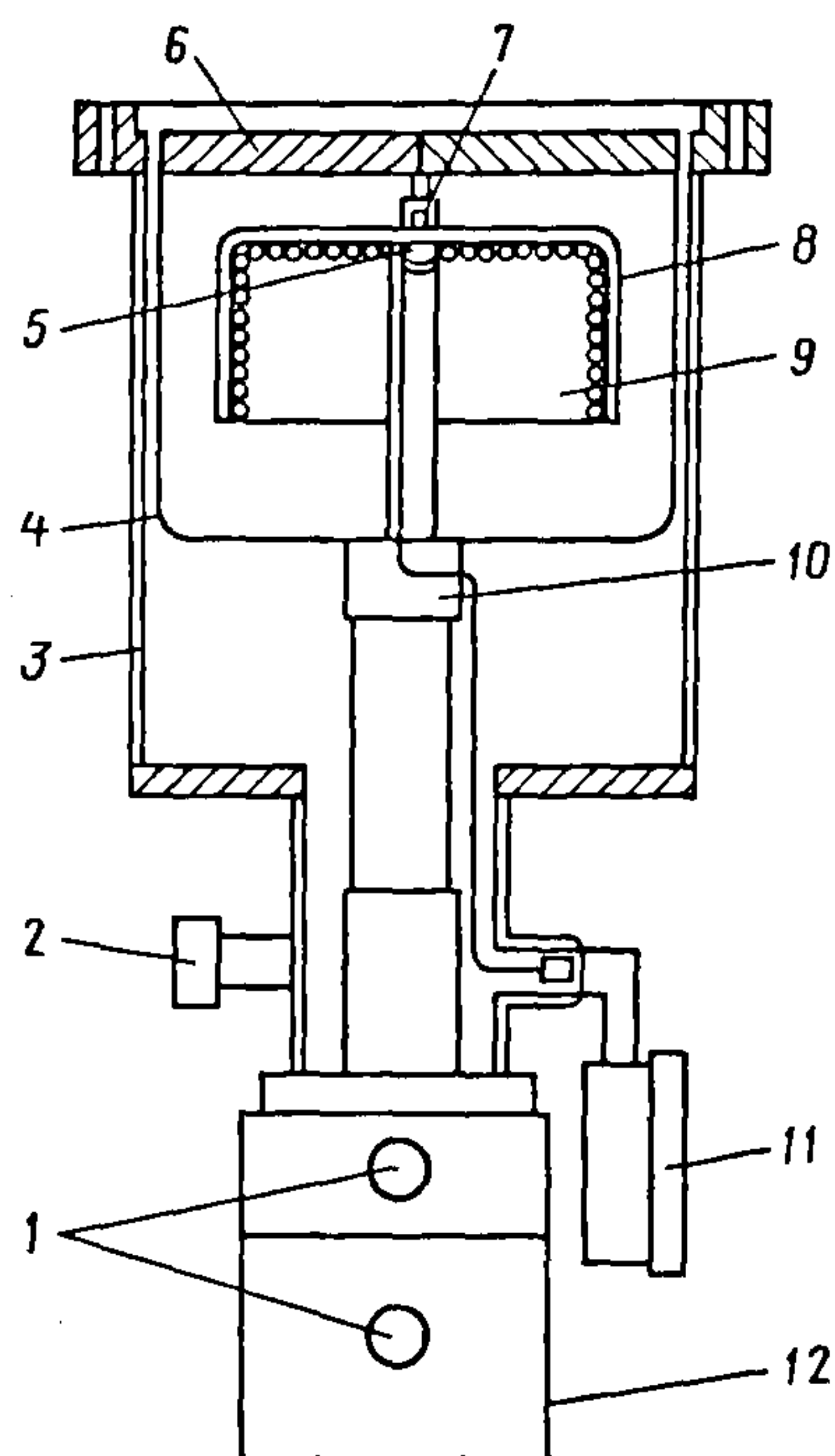
Такие насосы сочетают в себе преимущества криогенной и криoadсорбционной откачки. Схема насоса приведена на рис. 13.12.

Главным рабочим элементом является криопанель охлаждения до температуры 20 К. Криопанель выполнена в виде перевернутого стакана, обращенного к входному отверстию насоса своей тыльной частью.

На внешней поверхности, имеющей высокую отражательную способность, осаждаются легкоконденсируемые компоненты газовой смеси:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , углеводороды и др. Трудноконденсируемые газы, такие как  $\text{He}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$  и др., поглощаются адсорбентом, приклеенным к внутренней поверхности криопанели. Внешний экран защищает последнюю от излучения со стороны корпуса насоса. Для охлаждения используются компактные криогенераторы.

В качестве адсорбента применяют активированный уголь.

Насосы этого типа работают в диапазоне  $10^{-1} \dots 10^{-9}$  Па и имеют быстроту действия  $1 \dots 100 \text{ м}^3/\text{с}$ .



**Рис. 13.12. Насос с автономным криогенератором:**

- 1 – трубопроводы гелия; 2 – фланец для подсоединения форвакуумного насоса;
- 3 – корпус; 4 – теплозащитный экран;
- 5 – чувствительный элемент водородного термометра; 6 – теплозащитный экран типа «жалюзи»; 7 – вторичный контур охлаждения;
- 8 – криопанель; 9 – поверхность криопанели, покрытая активированным углем; 10 – первичный контур охлаждения; 11 – водородный термометр; 12 – привод

## Раздел 4

# ВАКУУМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ

## Глава 14

### ВАКУУММЕТРИЯ

#### 14.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Полное (абсолютное) давление измеряют специальными приборами – манометрами.

Манометры, предназначенные для измерения давления меньше атмосферного, называются *вакуумметрами*. Их основным элементом является манометрический преобразователь давления – устройство, вакуумно-плотно присоединяемое к

вакуумной камере, воспринимающее непосредственно измеряемое давление и преобразующее его в другую физическую величину.

Кроме того, как правило, они включают в себя измерительный блок вакуумметра – устройство, обеспечивающее требуемый электрический режим работы манометрического преобразователя, усиление и измерение его выходного сигнала.

Диапазон давлений, измеряемых вакуумметрами, составляет  $10^5 \dots 10^{-11}$  Па ( $760 \dots 10^{-13}$  мм рт.ст.). В практике вакуумных измерений используют разнообразные типы приборов, принцип действия которых основан на различных физических закономерностях [38].

Вакуумметры классифицируют по принципу действия, методу измерения давления и классу точности. На рис. 14.1 приведены погрешности и диапазоны давлений, измеряемых вакуумметрами различных классов.

По методу измерения различают вакуумметры, основанные на прямых и косвенных измерениях давления. К первой группе относятся вакуумметры, измеряющие непосредственно давление как отношение силы к площади чувствительного элемента. Это жидкостные, грузопоршневые и деформационные вакуумметры, отличающиеся независимостью показаний от рода газа. Наименьшее давление, которое можно измерить вакуумметрами этой группы,  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па.

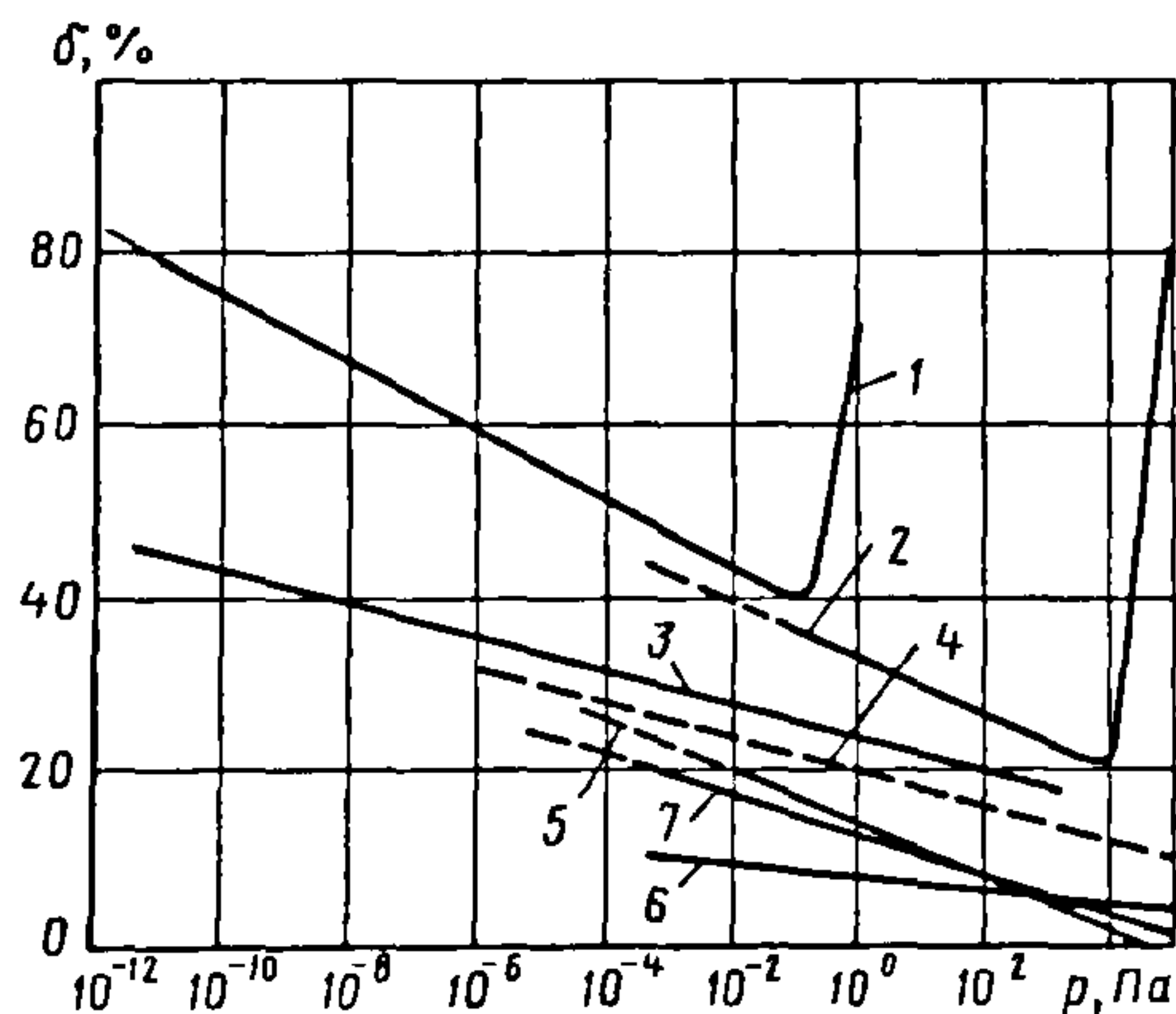


Рис. 14.1. Погрешность и диапазоны измерений лабораторных (штриховые кривые) и промышленных (сплошные кривые) вакуумметров:

1, 3, 7 – ионизационных (1 – магнитных электроразрядных, 3 – электронных, 7 – радиоизотопных); 2 – тепловых; 4 – вязкостных; 5 – деформационных; 6 – жидкостных



Во вторую группу входят вакуумметры, принцип действия которых основан на использовании зависимости некоторых физических процессов от давления. Такие вакуумметры измеряют физические величины, связанные с давлением определенными функциональными зависимостями (силу тока, напряжение, ЭДС, частоту и др.). Это ионизационные, вязкостные, радиометрические и тепловые вакуумметры; их показания зависят от рода газа. Диапазон измерений и вид градуировочной характеристики устанавливают по результатам их градуировки для соответствующего газа с использованием образцовых средств измерений. Диапазоны измерений и погрешности современных образцовых вакуумметров различных классов показаны на рис. 14.2.

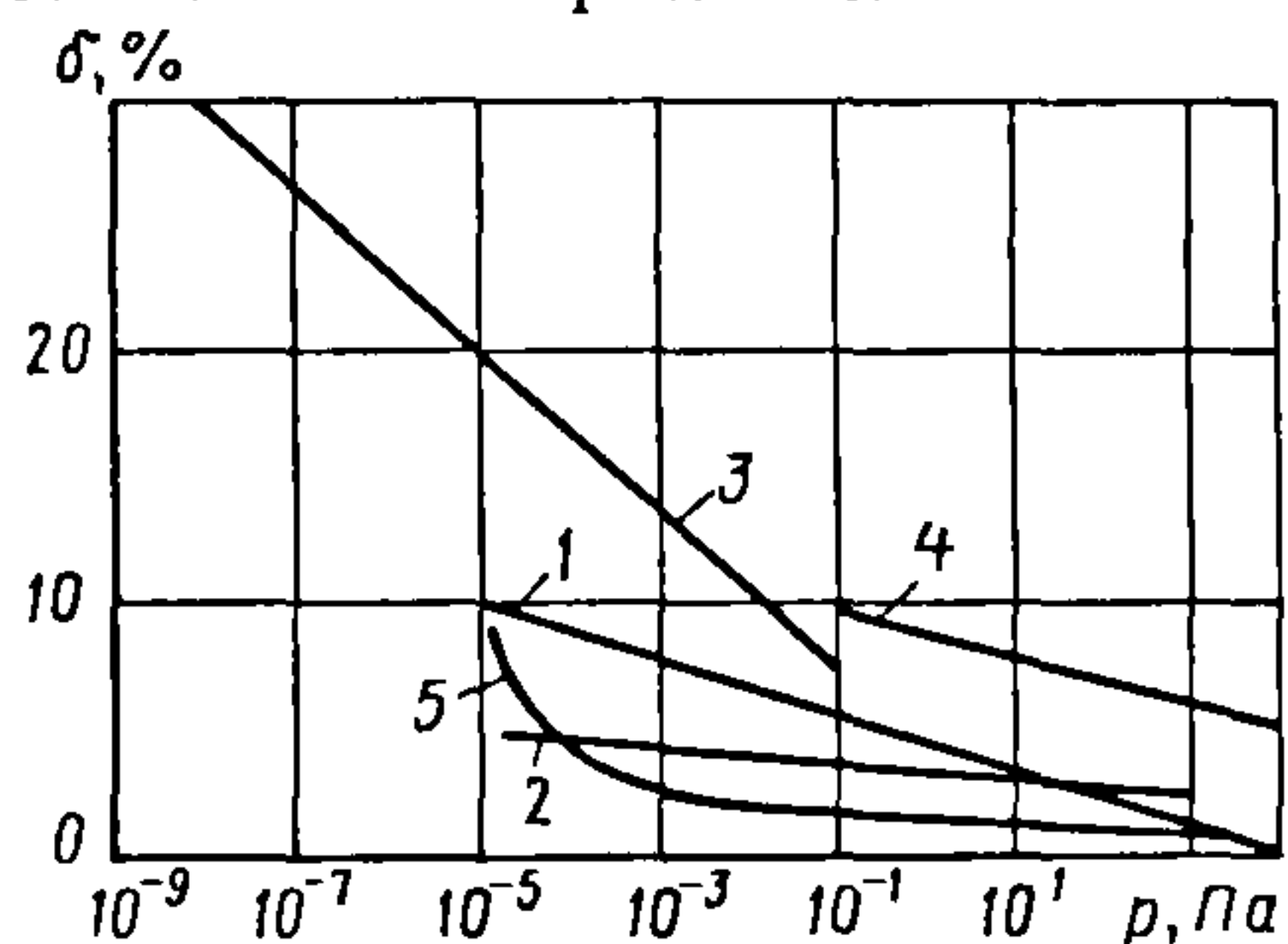


Рис. 14.2. Погрешности и диапазоны измерения образцовых вакуумметров: 1 — мембранных; 2 — жидкостных (компрессионных); 3 — ионизационных электронных; 4 — тепловых; 5 — вязкостных

Метрические характеристики промышленных вакуумметров обычно приводят для воздуха или азота. Шкалы вакуумметров градуируют в единицах давления, относительных единицах или единицах физической величины, связанной с давлением определенной функциональной зависимостью. Для вакуумметров с нелинейной градуировочной характеристикой эту зависимость записывают в паспорт в виде графика, для вакуумметра с линейной характеристикой указывают чувствительность (постоянную).

Диапазоны давлений, измеряемых отечественными вакуумметрами с различными манометрическими преобразователями, представлены в табл. 14.1.

## 14.2. ЖИДКОСТНЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Принцип действия жидкостных вакуумметров основан на уравнивании измеряемого давления или разности давлений давлением столба жидкости. Их подразделяют на U-образные и компрессионные.

U-образные вакуумметры — жидкостные вакуумметры, состоящие из сообщающихся сосудов, в которых измеряемое давление определяют по одному или нескольким уровням жидкости.

Простейший U-образный вакуумметр представляет собой изогнутую в виде буквы U стеклянную трубку постоянного сечения, заполненную рабочей жидкостью. Для исключения погрешности измерений, вызванной действием капиллярных сил, внутренний диаметр стеклянной трубки должен быть  $\geq 7$  мм. Один конец трубки соединяют с вакуумной системой, другой может быть открытым или запаянным (рис. 14.3).

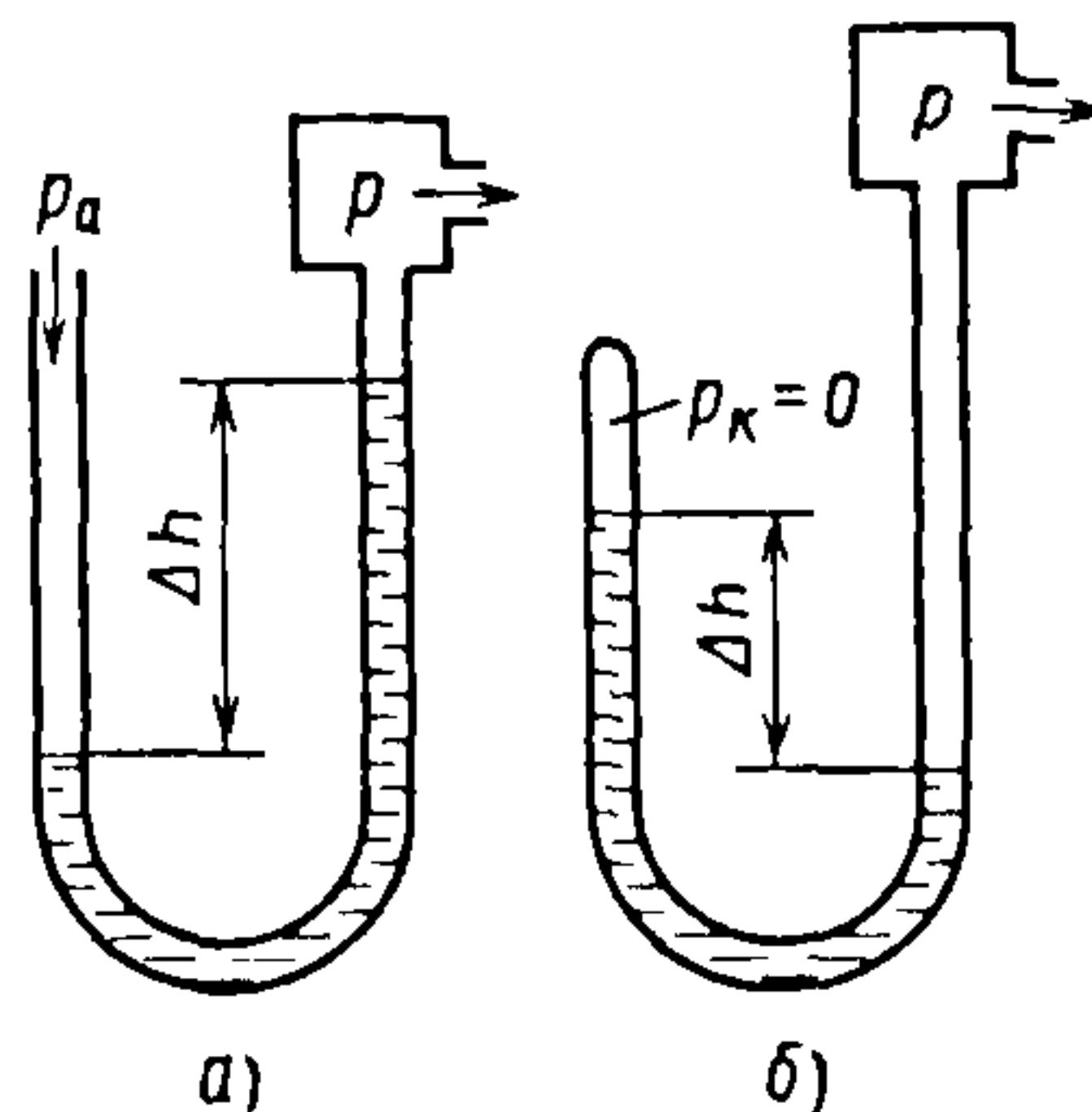


Рис. 14.3 U-образные вакуумметры с открытым (а) и закрытым (б) коленами

14.1. Диапазоны давлений, измеряемых вакуумметрами с манометрическими преобразованиями

Тип действия	Марка	Диапазон давлений, Па											
		$10^{-11}$	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1
Мембранные	ВДГ-1												
	ВД-1												
	ВД-2												
Тепловые	ДВТ-3/0-001												
	ВТ-6												
	13ВТ3-003, РВТ-2М (ВТБ-2)												
	ВТЦ-1												
Ионизационно-тепловые	ВИТ-2												
	ВИТ-3												
	РВИЦБ-1А ВИЦБ-2/7-002												
Ионизационные	ВИ-14												
	ВИЦ-9/0-001												
	ВППД-1												
	ВТИ-1												
	ВЭМБ-1												
Магнито-разрядные	ВМБ-12, ВМБ-10												
	ВМЦБ-12												
	ВМБ-8, ВМБ-14												
	ВМБ-1/8-001 (ВМБ-11)												
	УКВ-3/002												
Устройства контроля вакуума	УКВ-3/7-001												

Примечание. В скобках указаны модификации.



Давление в закрытом колене должно быть значительно меньше измеряемого. Для поддержания давления на этом уровне применяют периодическую или постоянную откачку. Измеряемое давление  $p$ , Па:

для манометра с открытым коленом

$$p = p_k - \rho_{\text{ж}} g \Delta h;$$

для манометров с закрытым коленом

$$p = p_k + \rho_{\text{ж}} g \Delta h,$$

где  $p_k, p_a$  — соответственно сравнительное и атмосферное давление, Па;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность рабочей жидкости при температуре измерения,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\Delta h$  — разность уровней жидкости (УЖ), м.

Диапазон измеряемых давлений зависит от свойств жидкости, геометрических размеров прибора и способа определения УЖ. В качестве рабочей выбирают неагрессивную жидкость с малыми давлением насыщенного пара, вязкостью и способностью к растворению газов.

Плотности жидкостей  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ ,  
при  $T = 293 \text{ К}$

Вода .....	998
Этиловый спирт .....	789
Дибутилфталат .....	1046
Ртуть .....	13 546
Масло:	
ВМ-3 .....	850
ВМ-5 .....	870
5Ф4Э .....	1200

Погрешность измерения давления определяется в первую очередь погрешностью отсчета УЖ, неравномерностью сечения трубок, влиянием температуры и др. Нижний предел измеряемого давления ограничивается возможностью измерения с требуемой точностью малой разности УЖ в соответствии с формулой

$$p_{\min} = 10^{-3} \rho_{\text{ж}} g \Delta h_{\min} = 10^{-1} \rho_{\text{ж}} g a_h / \delta,$$

где  $\Delta h_{\min}$  — минимально допускаемая разность уровней, мм;  $a_h$  — абсолютная погрешность отсчета УЖ, мм;  $\delta$  — требуемая относительная погрешность измерения, %.

Значения минимального давления  $p_{\min}$ , измеряемого с погрешностью 10 %, при различной абсолютной погрешности  $a_h$  отсчета уровней ртути и масла ВМ-3 приведены в табл. 14.2.

14.2. Зависимость минимального измерения давления от типа жидкости и способа измерения ее уровня

Способ отсчета УЖ	$a_h$ , мм	$p_{\min}$ , Па	
		ртуть	масла ВМ-3
Линейкой	1,0	$1,3 \cdot 10^3$	83,0
Штангенциркулем	0,1	$1,3 \cdot 10^2$	8,3
Катетометром	0,02	27,0	1,7
Интерференционный	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$

На практике используют различные U-образные вакуумметры — чашечный, укороченный, наклонный, поплавковый, двухжидкостный с переменным сечением трубки и др.

Компрессионный вакуумметр (манометр Мак-Леода) — жидкостный вакуумметр, в котором для измерения абсолютного давления разреженного газа последний предварительно сжимают. Находящийся в измерительном баллоне 3 объемом  $V$  газ (рис. 14.4), давление  $p$  которого необходимо измерить, сжимается в измерительном капилляре 2 до некоторого объема  $V_1$  вследствие принудительного подъема жидкости из резервуара 4. Давление  $p_1$  в измерительном капилляре уравнивается давлением столба жидкости в сравнительном капилляре 1 и давлением газа в вакуумной системе:

$$p_1 = pV / V_1 = \rho_{\text{ж}} g |h_2 - h_1| + p.$$

Измеряемое давление, Па:

$$p = C \rho_{\text{ж}} g |h_0 - h_1| |h_2 - h_1| 10^{-3} / (1 - C |h_0 - h_1|),$$

где  $C = 0,25 \pi d^2 / V$  — постоянная вакуумметра,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $h_0$  — координата вершины запаянного конца капилляра, мм;  $d$  — внутренний диаметр измерительного капилляра, мм.

В качестве рабочей жидкости чаще всего используется ртуть.

Применяют три способа измерения давления компрессионным вакуумметром:

1) уровень ртути в измерительном капилляре поднимают до определенного значения  $h_1$  и получают линейную зависимость давления от разности уровней  $h_2 - h_1$  (способ позволяет измерять давления в узком диапазоне);

2) уровень ртути в сравнительном капилляре доводят до конца запаянного капилляра ( $h_2 = h_0$ ) и получают квадратичную зависимость давления от разности уровней  $h_0 - h_1$ , т.е.  $p \approx (h_0 - h_1)^2$ ;

3) уровень ртути в измерительном капилляре повышают до получения максимально возможной разности уровней в капиллярах, соблюдая условие  $h_0 - h_1 \geq 7$  мм.

Первые два способа определения давления позволяют пользоваться графиком или таблицей, но высокой точности установления заданного уровня ртути добиться весьма сложно.

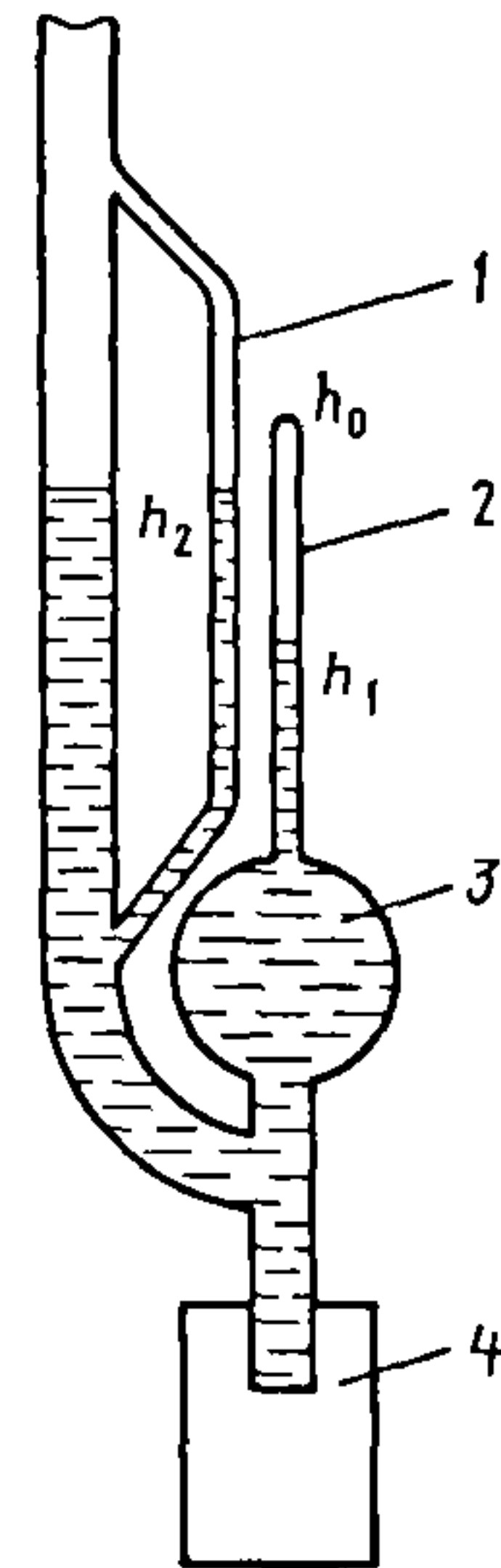
Третий способ, лишенный этого недостатка, предпочтительный. Погрешности измерения компрессионными вакуумметрами обусловлены:

- погрешностями определения постоянной вакуумметра и уровней ртути в капиллярах;
- депрессией ртути в капиллярах;
- отличием формы мениска ртути от формы запаянного конца измерительного капилляра, степенью точности принятых в расчет значений  $g$  и  $\rho_{\text{ж}}$ ;

– погрешностью из-за откачивающего действия струи ртутного пара, направленной из компрессионного вакуумметра к вымораживающей ртутные пары ловушке.

Компрессионные вакуумметры обычных конструкций позволяют измерять давление в диапазоне  $10^{-3} \dots 4 \cdot 10^3$  Па. Минимальная погрешность измерения 1...3%. Обычно компрессионные вакуумметры применяют в качестве образцовых приборов.

Рис. 14.4. Компрессионный вакуумметр



### 14.3. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

В деформационных вакуумметрах давление определяют по деформации упругого элемента под действием разности давлений. Их показания не зависят от рода газа. Такие вакуумметры различают по типу чувствительного элемента и способу измерения деформации.

По типу чувствительного элемента вакуумметры подразделяют на трубчатые, сильфонные и мембранные. Деформацию чувствительного элемента определяют механическими, оптическими или электрическими способами. В последнем случае для определения деформации применяют тензопреобразователи, индукционные, механотронные и другого типа датчики, обеспечивающие преобразование линейного (механического) перемещения чувствительного элемента в электрический сигнал (сила тока, напряжение, частота).

Трубчатые (пружинные) вакуумметры (трубки Бурдона) представляют собой запаянную с одного конца тонкостенную трубку эллиптического сечения, изогнутую по дуге окружности (пружину); другой конец трубки соединяют с вакуумной



системой. Конструкция простейшего деформационного манометра показана на рис. 14.5.

В качестве элемента, чувствительного к разности давлений, он имеет трубку 1 эллиптического сечения, свернутую в спираль. Один конец этой трубки подключен к вакуумной системе с помощью штуцера 2, а другой запаян и соединен через систему рычагов с зубчатым сектором 3, который приводит во вращение стрелку 4. Угол поворота стрелки пропорционален измеряемой разности давлений.

В некоторых конструкциях подвижной конец спиральной трубки вместо стрелки скрепляется с упругой пластинкой, на которой устанавливаются тензодатчики. В деформационных манометрах этого типа используется свойство спиральной трубки раскручиваться с увеличением давления внутри трубки. При изменении давления в трубке под действием разности давлений между наружным (атмосферным) и давлением внутри трубки меняется радиус ее кривизны, что приводит к перемещению запаянного конца трубки на угол  $\beta$  и повороту на некоторый угол стрелки, связанной с ним системой зубчатых передач.

В сильфонных манометрах в качестве упругого элемента, чувствительного к давлению, используется гибкая гофриро-

ванная трубка — сильфон. Недостаток сильфонов заключается в возможности появления в них остаточных деформаций из-за низкого предела упругости, что требует применения конструктивных мер для предохранения их от перегрузок в процессе работы манометра.

Отношение жесткости сильфона  $g_i$  к площади  $f_i$  ( $i$  — номер сильфона) подбирается таким образом, чтобы получить значительные деформации сильфонов в различных диапазонах давления. Деформация сильфона регистрируется по изменению электрической емкости конденсатора. Емкость цилиндрического конденсатора между кареткой  $L$  и корпусом манометра пропорциональна суммарной величине деформаций сильфонов и служит мерой измеряемого давления.

Градуировочная кривая такого манометра может с некоторым приближением считаться линейной функцией от логарифма давления. Изменение емкости конденсатора при изменении давления от  $p'$  до  $p''$  рассчитывается по формуле

$$\Delta C \approx K_c \ln (P'/P''),$$

где  $K_c$  зависит от параметров конденсатора.

Показания прибора обычно определяются атмосферным давлением, которому соответствует нулевое показание при-

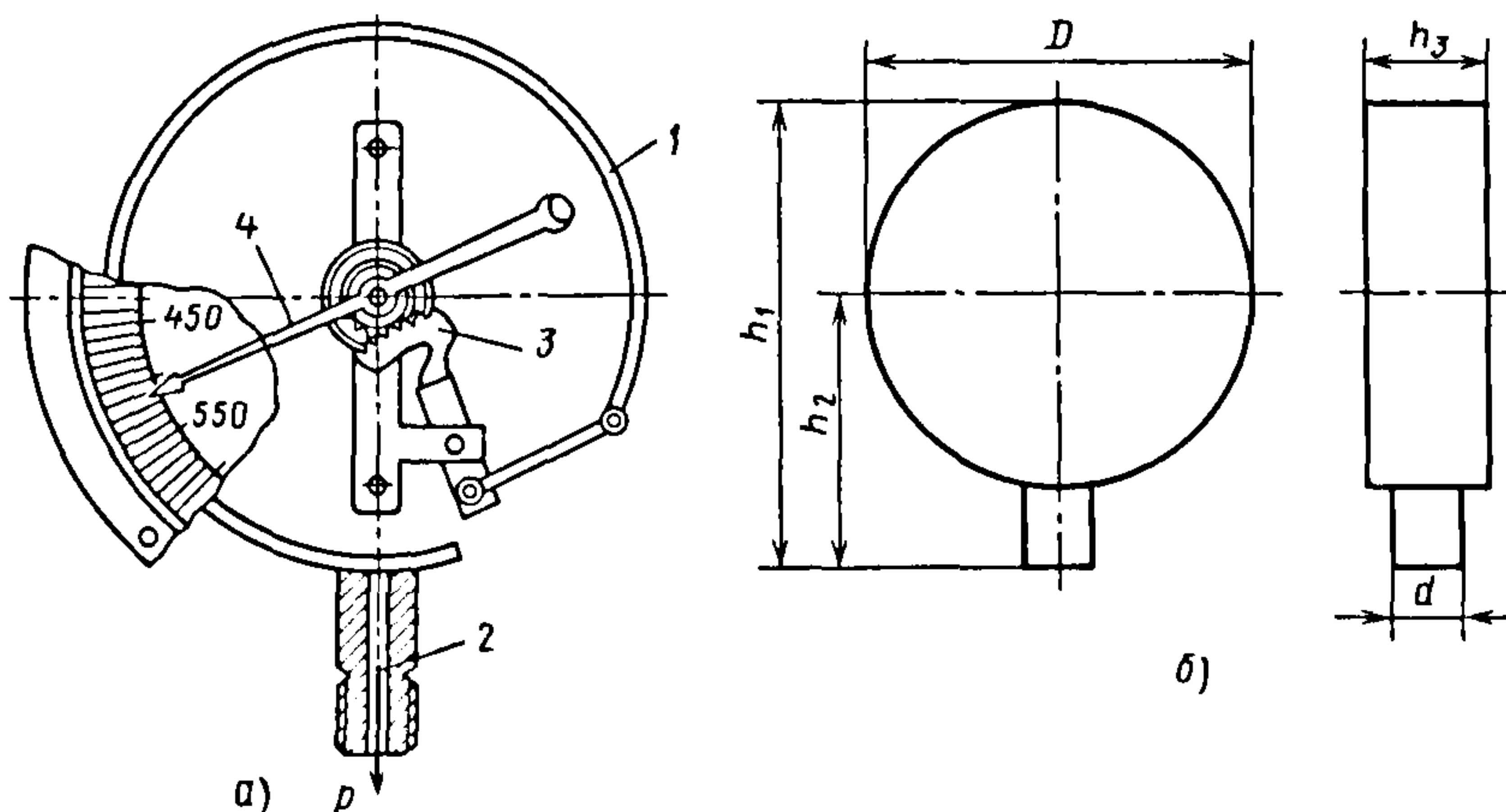


Рис. 14.5. Схема (а) и габаритный чертеж (б) трубчатого вакуумметра

бора. Измеряемое давление, Па,

$$p = p_a(1 - n/N),$$

где  $n$  – отсчет измеряемого давления в делениях шкалы;  $N$  – число делений шкалы прибора, соответствующее разности показаний при  $p = p_a$  и  $p = 0$ .

В табл. 14.3 и 14.4. приведены основные технические характеристики промышленных вакуумметров соответственно трубчатого (см. рис. 14.5) и сильфонного типов.

Применение механотронного преобразователя перемещения позволяет повысить чувствительность деформационного вакуумметра сильфонного типа, а использование набора механотронов – расширить диапазон измерения.

Цифровой блокировочный широкодиапазонный вакуумметр сильфонного типа ВМБ-133/1,3-002 выполнен на базе четырех механотронов, чувствительные элементы которых (сильфоны) изготовле-

ны из коррозионно-стойкой стали 36НХТЮ, что позволяет использовать их для измерения давления агрессивных газовых сред. Габаритные размеры вакуумметра 520×174×570 мм; масса 15 кг; цифровой отсчет – в Па и мм рт.ст.; автоматическое переключение диапазонов измерений 0,13...1,3·10<sup>2</sup>; 1,3...1,3·10<sup>3</sup>; 13,0...1,3·10<sup>4</sup>; 6,7·10<sup>3</sup>...1,0·10<sup>5</sup> Па, аналоговый выход 0...10 В, приведенная погрешность 3 %.

Основные недостатки сильфонных преобразователей давления – их высокая чувствительность к вибрациям и гистерезис градуировочной характеристики вследствие консольности чувствительного элемента и его больших линейных деформаций. Этих недостатков лишены преобразователи с мембранным чувствительным элементом.

В мембранных вакуумметрах чувствительным элементом служит тонкая плоская

### 14.3. Основные технические характеристики вакуумметров трубчатого типа

Вакуумметр	Модель	Класс точности	Верхний предел измерений, МПа	Габаритные размеры (см. рис. 14.5), мм			
				$D$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
Образцовый (ВО)	11201	0,4	0,1	160	205	125	60
	1227	0,25		250	310	165	90
Точных измерений (ВТИ)	1218	0,6; 1,0	0,06; 0,1	160	205	125	60

Примечание. Для вакуумметров указанных моделей  $d = 27$  мм.

### 14.4. Основные технические характеристики вакуумметров сильфонного типа

Вакуумметр	Модель	Верхний предел измерений $p$ , МПа	Класс точности
ВС-Э1	9223	0,025	1,0; 1,5
	9523	0,04; 0,06; 0,1	0,6; 1,0; 1,5
МАС-Э1	9231	0,04	1,5
	9531	0,06; 0,1	1,0; 1,5
МАС-Э3	9233	0,006	2,5
	9533	0,01	1,5; 2,5
		0,016	1,0; 1,5
		0,025	0,6; 1,0; 1,5
		0,04	



или гофрированная герметичная мембрана, реже – мембранная манометрическая коробка, по прогибу которой под действием разности давлений судят об измеряемом давлении. Деформация  $y$ , мм, круглой упругой пластины с защемленными краями под действием равномерно распределенной силы, вызванной перепадом давления  $p$ , МПа, составит

$$y = \frac{3(1 - \mu^2)}{16 E h^3} p R^4 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]^2,$$

где  $E$  – модуль упругости для материала мембраны, МПа;  $h$  – толщина мембраны, мм;  $R$  – радиус мембраны, мм;  $r$  – расстояние от центра мембраны, мм;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

По одну сторону от мембраны поддерживается постоянное сравнительное давление; если оно пренебрежимо мало по сравнению с измеряемым, то обеспечивается возможность измерения абсолютного давления. Для определения прогиба мембраны применяют оптические, а чаще электрические методы. В последнем слу-

чае прогиб измеряют с помощью тензопреобразователей или способом компенсации прогиба мембраны электростатическими силами (нулевой метод измерения), а также механотронными, индукционными, струнными, оптико-механическими методами (например, ОМ6 и ОМ7).

Характеристики мембранных деформационных измерительных комплексов давлений с индукционным преобразователем деформации (типа ИКД6ТДа) приведены в табл. 14.5. Высокая точность измерений давления приборами типа ОМ способствует их применению в качестве образцовых при градуировке и поверке рабочих средств измерений.

Для непрерывного преобразования значения измеряемого давления в унифицированный токовый сигнал в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами можно применять мембранные измерительные преобразователи типа «Сапфир-22» (рис. 14.6) с тензопреобразователями (табл. 14.6).

**14.5. Характеристики мембранных деформационных измерительных комплексов давлений**

Измерительный комплекс	Диапазон измерений, кПа	Относительная погрешность выходного сигнала, %	Масса, кг
ИКД6ТДа-10	0,13...1,3	3	0,85
ИКД6ТДа-20	0,13...2,6		
ИКД6ТДа-30	0,13...3,9		
ИКД6ТДа-50	0,13...6,5		
ИКД6ТДа-100	0,13...13	1,5	0,7
ИКД6ТДа-200	0,13...26		
ИКД6ТДа-250	0,13...32		
ИКД6ТДа-400	0,13...52		
ИКД6ТДа-800	0,13...100		

Примечание. Диаметр комплексов 86 мм, длина 128...105 мм. Нет отсчетного устройства. Выходной сигнал – напряжение 0...6 В. Нелинейность характеристики не превышает  $\pm 3\%$ , для приборов типа 10 и 20 не более  $\pm 1,5\%$ .

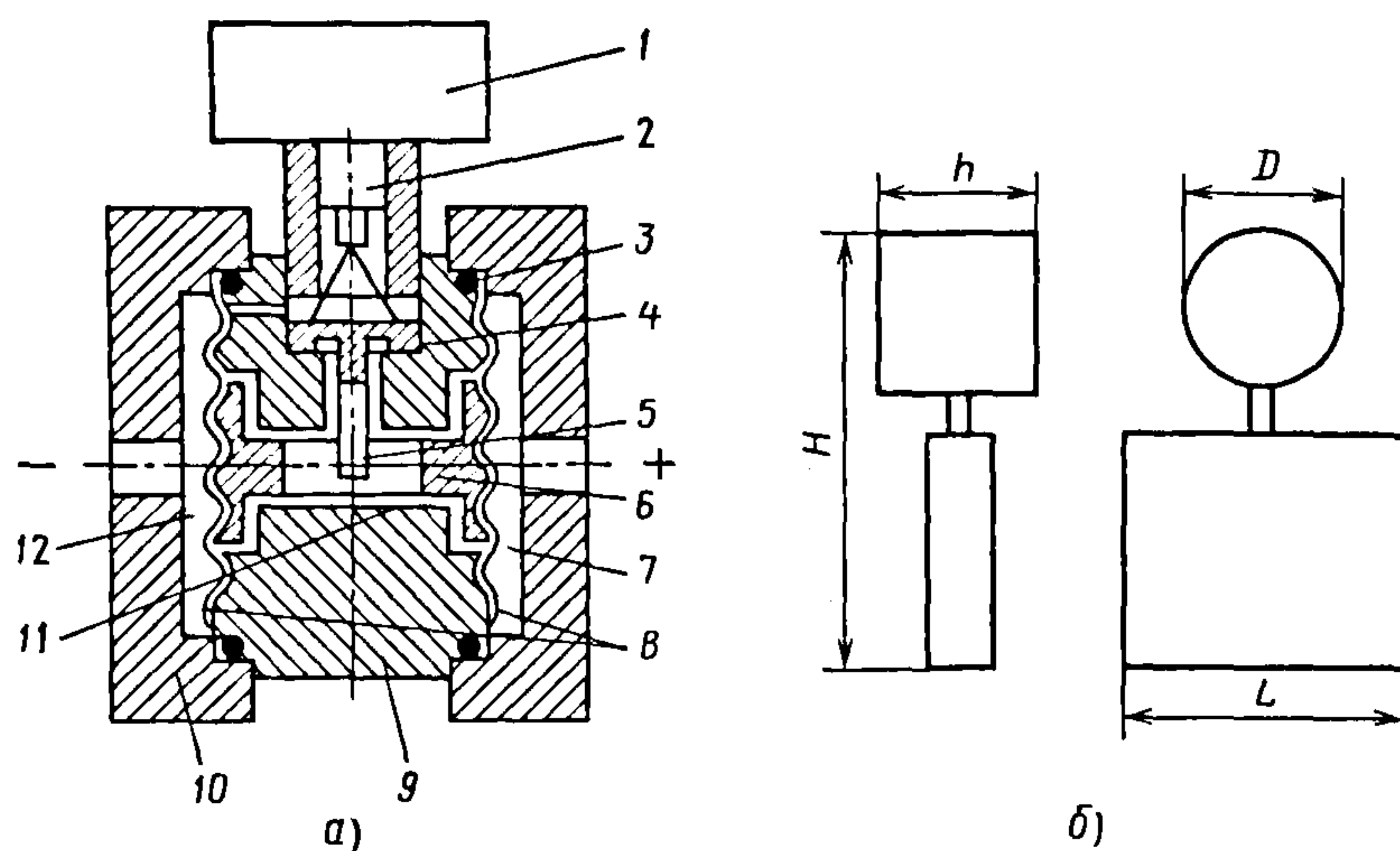


Рис. 14.6. Схема (а) и габаритный чертеж (б) преобразователя «Сапфир-22»

#### 14.6. Технические характеристики мембранных преобразователей типа «Сапфир-22»

Преобразователь	Модель	Верхний предел измерений давления, кПа	Класс точности	Масса, кг
«Сапфир-22ДА» (измерение абсолютного давления)	2020	2,5; 4,0	1,0	4,0
		6,0	0,5	
		10,0	0,25; 0,5	
	2030	6	0,5	5,0
		10 ; 16; 25; 40	0,25	
	2040	40; 60; 100; 160; 250;	0,25; 0,5	
«Сапфир-22ДВ» (измерение перепадов давления)	2210	0,25	1,0	8,0
		0,4; 0,6	0,5	
		1,0; 1,6; 2,5	0,25; 0,5	
	2220	2,5; 4,0; 6,0; 10,0	0,5	4,0
	2230	6,0; 10,0		5,0
		16	0,25	
		25; 40	0,25; 0,5	
	2240	40; 60; 100		

Примечание. Размеры преобразователей  $\leq 255 \times 182 \times 112$  мм. Предельные значения выходных сигналов 0...5; 0...20 мА или 4...20 мА постоянного тока.



Тензопреобразователь 4 мембранно-рычажного типа размещен внутри основания 9 в замкнутой полости 11, заполненной кремнийорганической жидкостью, и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 8. Последние приварены по наружному контуру к основанию 9 и соединены между собой центральным штоком 6, который связан с концом рычага тензопреобразователя 4 с помощью тяги 5. Фланцы 10 уплотнены прокладками 3.

Воздействие измеряемого параметра (большее давление подается в камеру 7, меньшее – в камеру 12) вызывает прогиб мембран 8, изгиб мембраны тензопреобразователя 4 и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронное устройство 1

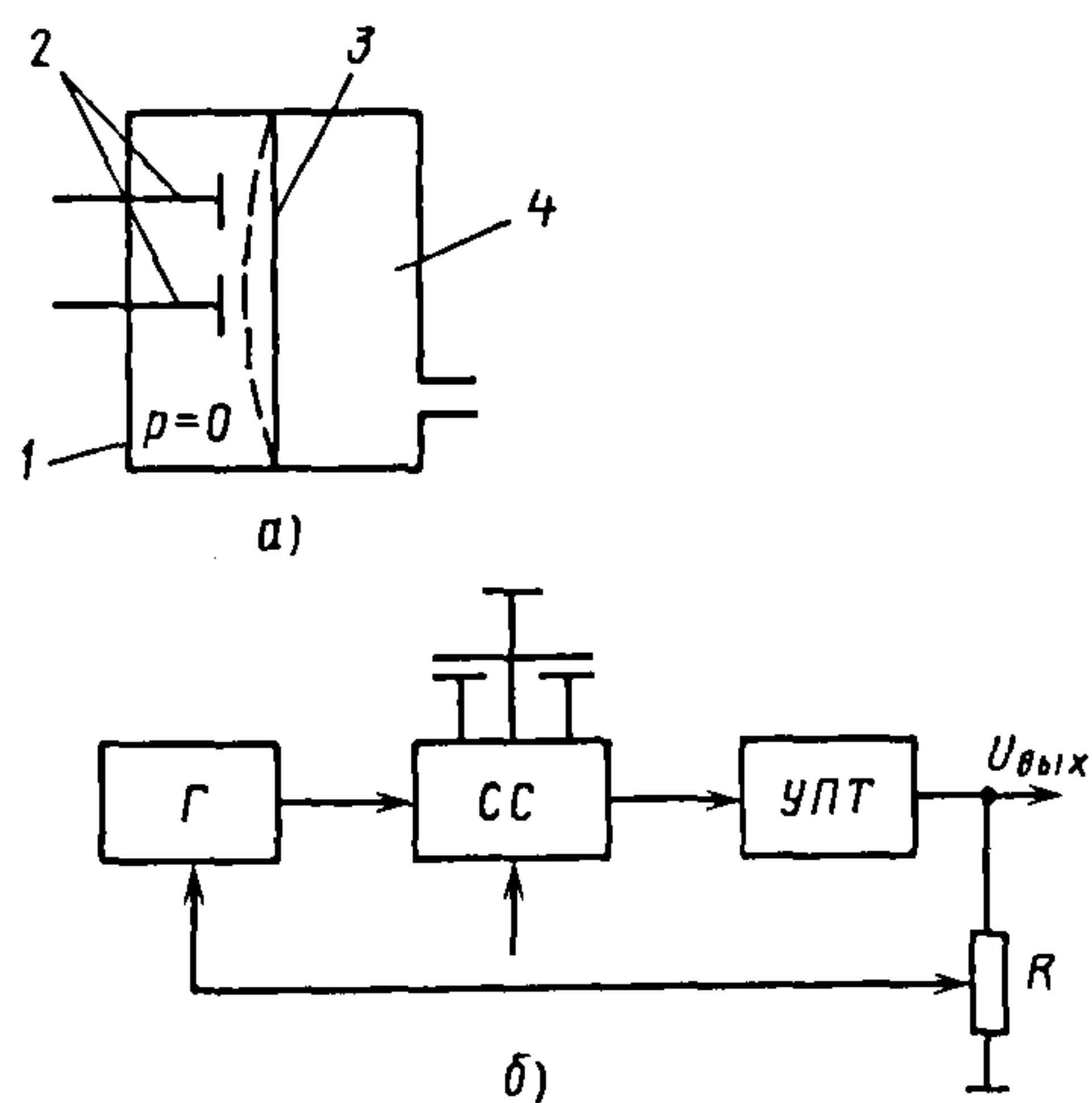


Рис. 14.7. Принципиальная схема мембранно-емкостного преобразователя давления (а) и структурная схема (б) его измерительного устройства:

1 – вакуумированная камера; 2 – обкладки конденсаторов; 3 – мембрана; 4 – измерительная камера;  $\Gamma$  – генератор переменного напряжения (30...50 кГц);  $CC$  – схема сравнения;  $УПТ$  – усилитель постоянного тока;  $R$  – регулятор нелинейности

по проводам через гермоввод 2. Датчики моделей 2210-2240 отличаются тем, что измеряемое давление подается в камеру 12, а камера 7 сообщается с атмосферой.

Наиболее распространен емкостный способ определения прогиба мембраны. Принципиальная схема преобразователя и схема измерения прогиба мембраны емкостным способом приведены на рис. 14.7.

Мембрана вместе с дополнительным неподвижным электродом образует обкладки электрического конденсатора, емкость которого зависит от измеряемого давления  $p$ . При незначительных прогибах относительное изменение емкости конденсатора прямо пропорционально давлению, что позволяет получить линейную зависимость выходного сигнала  $U_{вых}$  вакуумметра от давления.

Для уменьшения влияния окружающей температуры на дрейф нуля в вакуумированной камере устанавливают дополнительный электрод, располагаемый около наружной поверхности мембраны. При этом для определения давления измеряют разность емкостей двух конденсаторов.

Схема сравнения вырабатывает напряжение постоянного тока, пропорциональное разности измеряемых емкостей. Для получения линейной зависимости выходного сигнала от давления применяют регулятор нелинейности, создающий нелинейность характеристики измерительного устройства для обеспечения коррекции градуировочной характеристики преобразователя.

Мембранные вакуумметры емкостного типа обладают наивысшей чувствительностью по сравнению с деформационными вакуумметрами всех типов. Они позволяют измерять давление  $10^5 \dots 10^{-4}$  Па, причем одним преобразователем можно измерять давления, различающиеся на три-четыре порядка. Характеристики промышленных мембранных вакуумметров представлена в табл. 14.7

### 14.7. Характеристики промышленных деформационных мембранных вакуумметров

Вакуумметр	Диапазон измерений Па	Относительная погрешность измерения, %	Измерительный блок		Примечание
			Масса, кг	Габаритные размеры, мм	
ВДГ-1	$10 \dots 10^4$	10	10,0	$165 \times 230 \times 420$	Стрелочный; нет аналогового выходного сигнала
ВД-1	$1,3 \dots 1,3 \cdot 10^3$	5	5,8	$120 \times 158 \times 345$	Цифровой с одним каналом блокировки: аналоговый выход $0 \dots 10$ В; коррозионно-стойкий преобразователь
ВД-2	$1,3 \cdot 10^{-2} \dots 13,3$		4,0	$270 \times 120 \times 173$	
ПДД-1-10А	$1,3 \dots 1,3 \cdot 10^3$		1,0	$\varnothing 83 \times 212$	Аналоговый сигнал $0 \dots 10$ В на полный диапазон, пропорциональный измеряемому давлению. Питание от источника постоянного напряжения $\pm 15$ В. Нет отсчетного устройства
РДД-1 (реле)	$0,13 \dots 133$	—		$\varnothing 87 \times 235$	Возможность регулирования порога срабатывания

### 14.4. ТЕПЛОВЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления. Давление измеряют косвенным методом, т.е. измеряют какую-либо физическую величину, которая зависит от тепловой энергии, отводимой газом от чувствительного элемента вследствие теплопроводности. Вид зависимости этой физической величины от давления устанавливают экспериментально градуировкой вакуумметра по образцовому средству измерения. Градуировочные характеристики тепловых вакуумметров нелинейны.

Преобразователь давления теплового вакуумметра представляет собой баллон, внутри которого расположен нагреваемый электрическим током чувствительный элемент (обычно нить). По конструкции тепловые преобразователи подразделяют на термопарные и терморезисторные.

Существуют два способа измерения давления тепловыми вакуумметрами: при постоянной силе тока нагрева (накала)

чувствительного элемента и при постоянной температуре нити. Первый способ обеспечивает большую чувствительность прибора при низком давлении, второй — расширение диапазона измерений в сторону высокого давления.

Мерой давления при работе по методу постоянной температуры нити является сила тока нагрева, напряжение или мощность, подводимые к нити; при работе по методу постоянной силы тока — температура нити, которую определяют по ее сопротивлению (терморезисторные преобразователи), с помощью термопары (термопарные преобразователи), по изменению натяжения нити (струнные частотные тепловые преобразователи), изменению линейных размеров или угла изгиба чувствительного элемента (биметаллические реле).

Тепловые вакуумметры измеряют абсолютное давление газов и паров в диапазоне  $10^{-2} \dots 10^4$  Па. Они не выходят из строя при нарушениях герметичности до атмосферного давления в преобразователе (температура нити  $\leq 420$  К). Возмож-



ность измерения низкого давления ограничена влиянием побочного теплообмена, что обуславливает малое отношение мощности, отводимой от нити газом, к мощности, например, теплового излучения нити.

Нижний предел измерений может быть смещен на один-два порядка в область низкого давления повышением чувствительности прибора при охлаждении корпуса преобразователя до температуры жидкого азота. Верхний предел измерений ограничен давлением, при котором теплопроводность газа не зависит от давления (длина свободного пути молекул становится меньше расстояния между нагретым элементом и стенкой). Верх-

ний предел измерений можно увеличить вплоть до атмосферного давления использованием конвективной теплопередачи. Характеристики такого конвекционного вакуумметра сильно зависят от ориентации преобразователя в пространстве.

Зависимость теплопроводности от рода газа обуславливает зависимость от него показаний тепловых вакуумметров. Давление различных газов  $p_r$ , Па, рассчитывают по показаниям вакуумметра, отградуированного по воздуху (азоту), согласно формуле

$$p_r = p_v / q, \quad (14.1)$$

где  $p_v$  — показания вакуумметра;  $q$  — относительная чувствительность вакуумметра, зависящая от рода газа:

Газ . . . . .	Воздух	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
$q$ . . . . .	1,00	0,89	0,76	0,64	0,43	0,45	1,49	1,30
Газ . . . . .	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub> S	
$q$ . . . . .	1,03	1,06	1,64	1,67	1,16	1,26	1,41	

Для измерения давления паров воды используют градуировочные характеристики (рис. 14.8 и 14.9). Для газов, не указанных выше, относительную чувствительность вычисляют по формуле

$$q = \frac{\alpha_r (k_r + 1) (k_v - 1)}{\alpha_v (k_r - 1) (k_v + 1)} \sqrt{\frac{M_v}{M_r}},$$

где  $\alpha$  — коэффициент аккомодации;  $k$  — показатель адиабаты;  $M$  — молекулярная масса; индексы «г» и «в» соответствуют газу и воздуху.

Для смеси газов относительная чувствительность

$$q_{см} = c_1 q_1 + c_2 q_2 + c_3 q_3 + \dots, \quad (14.2)$$

где  $c_1, c_2, c_3, \dots$  — молярные доли компонентов смеси;  $q_1, q_2, q_3, \dots$  — коэффициенты относительной чувствительности соответствующих газов.

На точность измерений существенно влияют длина и диаметр нити, состояние поверхности чувствительного элемента (например, загрязнение парами масла) и температура корпуса. Вследствие некон-

тролируемости значений коэффициента аккомодации приборы этого типа не относятся к прецизионным.

Для снижения погрешности измерений тепловой вакуумметр подвергают калибровке при атмосферном и «нулевом» давлении (на один-два порядка меньше наименьшего измеряемого).

Точность измерений можно повысить струнным методом измерения температуры, как в вакуумметре ВТСО-1. Выходным сигналом вакуумметра является частота, зависящая от давления газа:

$$f = f_0 \sqrt{1 - K/\varphi(p)},$$

где  $f_0$  — частота собственных колебаний нити (струны) в магнитном поле при атмосферном давлении и силе тока накала, равной 0;  $K$  — постоянная;  $\varphi(p)$  — функция давления.

Важная эксплуатационная характеристика тепловых вакуумметров — быстроедействие. Постоянная времени теплового вакуумметра зависит в основном от постоянной времени преобразователя давления, характеризующей инерционность

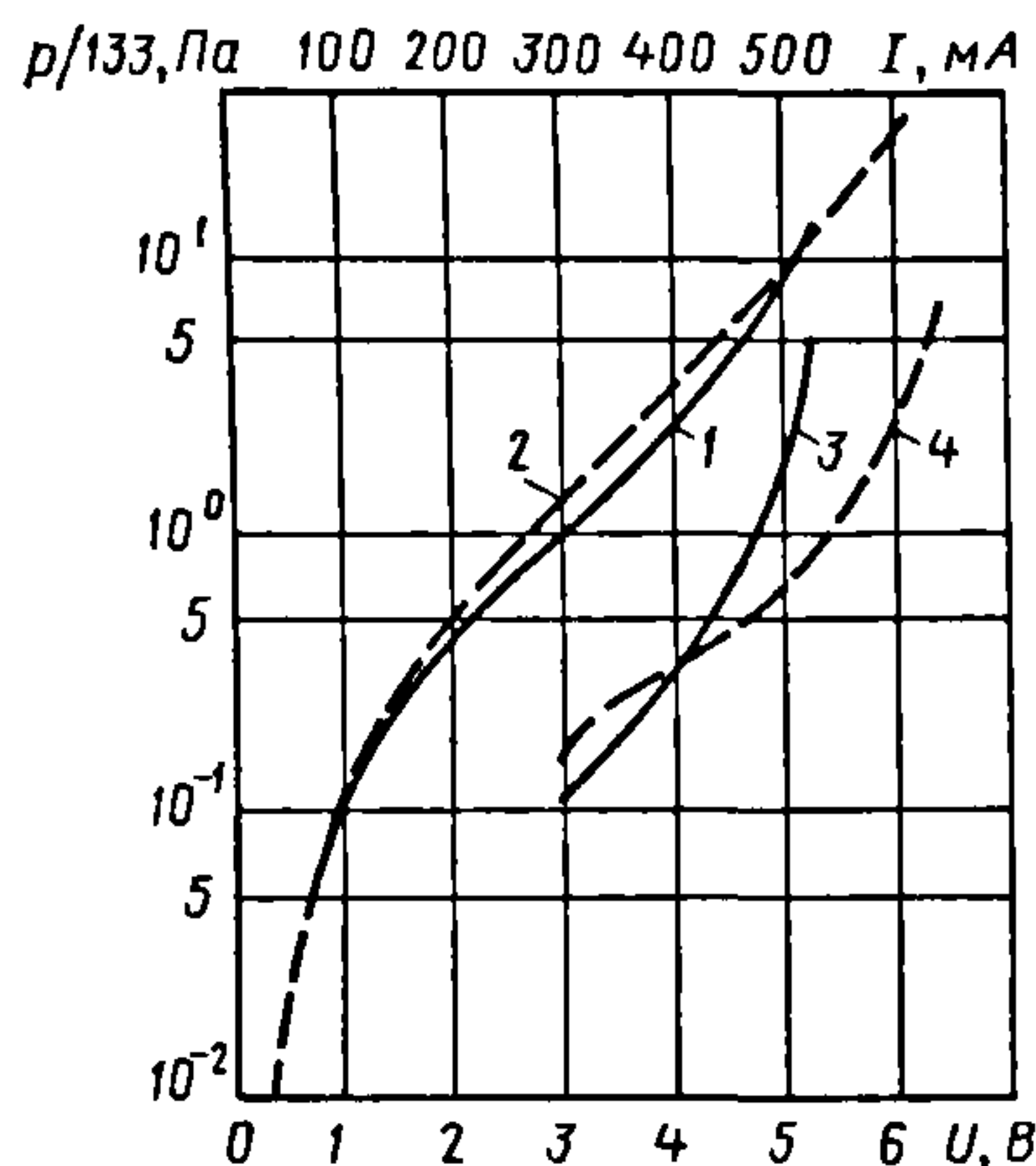


Рис. 14.8. Градуировочные характеристики преобразователей терморезисторного ПМТ-6 (кривые 1, 2) и термпарного ПМТ-2 (кривые 3, 4), работающих в режиме постоянной температуры ннтн: 1,3 – для паров воды; 2, 4 – для азота

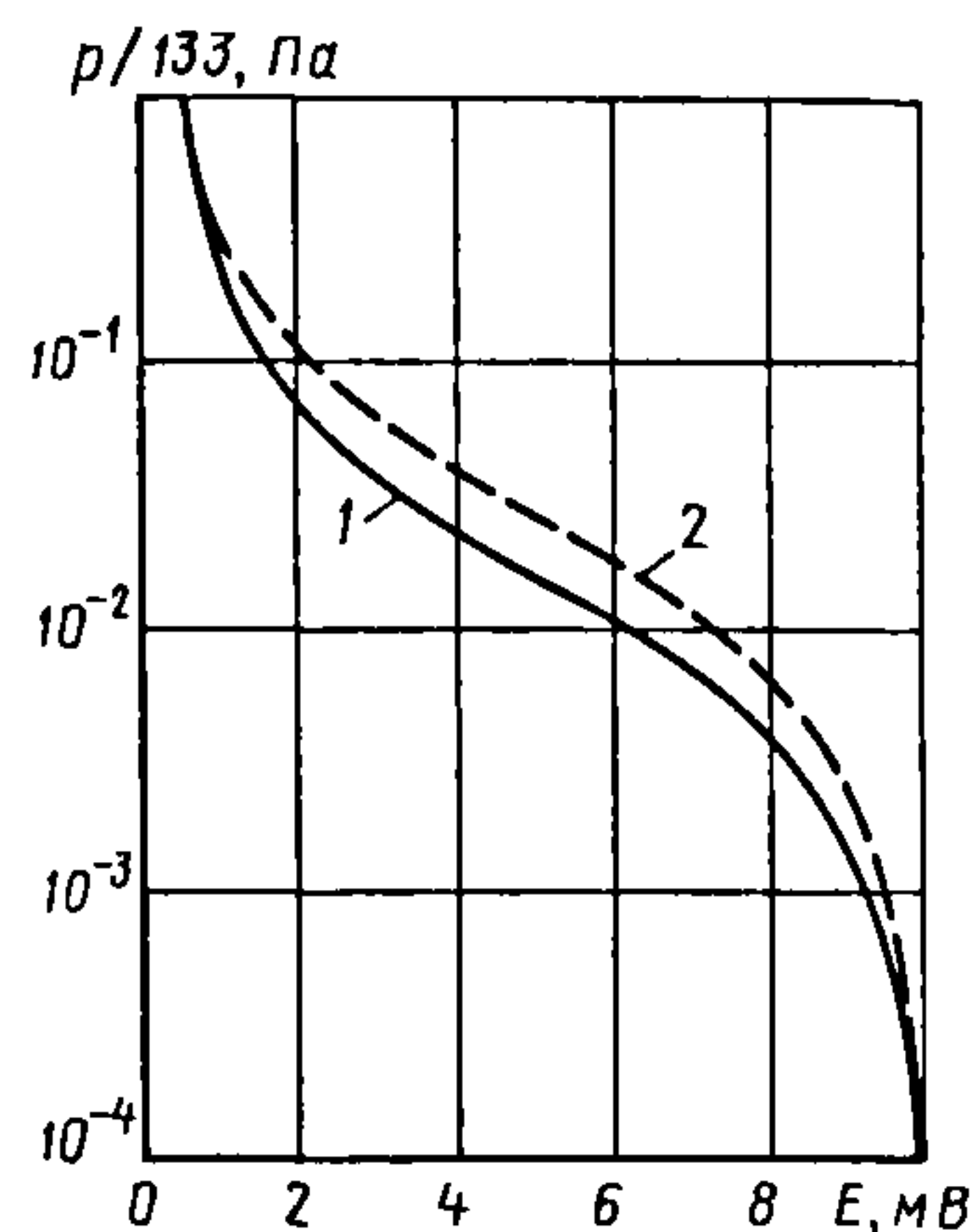


Рис. 14.9. Градуировочные характеристики термпарного преобразователя ПМТ-2, работающего в режиме постоянного тока: 1 – для паров воды; 2 – для азота

чувствительного элемента; на последнюю влияют начальное и конечное давления. Наибольшей инерционностью обладают термпарные преобразователи, работающие в режиме постоянного тока (2...4 с), наименьшей – преобразователи сопротив-

ления, работающие в режиме постоянной температуры (50...100 мс). При уменьшении давления инерционность увеличивается. Основные характеристики тепловых преобразователей давления и вакуумметров приведены в табл. 14.8 и 14.9.

#### 14.8. Основные характеристики тепловых преобразователей давления

Преобра- зователь	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм	D <sub>y</sub> , мм	Материал
ПМТ-6-3	2,6...3,9·10 <sup>3</sup>	-30...+50	Ø25×141	16	Металл
ПМТ-6-3Ф			Ø80×132	20	
ПМТ-6-3НХ			Ø30×140	16	
ПМТ-6-3Р			Ø25×156		
ПМТ-6-3М			Ø25×141		
ПМТ-6-3М-1			Ø25×133		
ПМТ-6-3С			Ø25×162		
ПДТ-20	4,0·10 <sup>-2</sup> ...10 10...1,3·10 <sup>3</sup>	±20 ±25	Ø35×265	10	Стекло С52-1
ПМТ-2	0,1...7,0·10 <sup>2</sup>	±20	Ø35×260		
ПМТ-16	3,0·10 <sup>-2</sup> ...13 13...1,3·10 <sup>3</sup>	±40 ±60	Ø33,5×285		
ПМТ-4М	0,1...7,0·10 <sup>2</sup>	±30	Ø32×108	16	Металл
ПДТ-18	6,0·10 <sup>-2</sup> ...1,0 1,0...4,0·10 <sup>3</sup>	-40...+60 -30...+40	Ø25×155		
ПДТ-8	1,3·10 <sup>-2</sup> ...6,7·10 <sup>2</sup>	±15	Ø24×110		
ПДТ-9	1,3·10 <sup>-3</sup> ...13	±20	Ø24×110		
ПДТСО-2-1	0,5...7,0·10 <sup>3</sup>	±10	Ø56×120		

Примечание. В обозначении преобразователя указан тип соединения: Ф – фланцевое; НХ – накладным хомутом; Р – резьбовое, остальные – штуцерное.



#### 14.9. Основные технические характеристики вакуумметров с тепловыми преобразователями

Вакуумметр	Преобразователь	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм
ВТ-3	ПМТ-2	$0,13 \dots 7 \cdot 10^2$	$\pm 30$	$320 \times 185 \times 150$
ВТ-2А-П	ПМТ-М	$0,13 \dots 3 \cdot 10^2$	—	$430 \times 220 \times 146$
ВТБ-1	Типа ПМТ-6-3	$2,6 \dots 3,9 \cdot 10^3$	$-40 \dots +60$	$200 \times 158 \times 319$
13ВТЗ-003				$100 \times 158 \times 206$
Реле РВТ-2М				$80 \times 158 \times 206$
РВТ-1		$1,3 \dots 3,9 \cdot 10^3$	$\pm 60$	$100 \times 158 \times 328$
РВБ-1	—	30 (срабатывание)	—	$76 \times 24 \times 24$
Образцовый ВТСО-1	ПДТСО-2-1	$0,5 \dots 7,0 \cdot 10^3$	$\pm 10$	$80 \times 150 \times 295$
Стрелочный ВТ-6	ПМТ-2	$0,1 \dots 1,33 \cdot 10^2$ $1,33 \cdot 10^2 \dots 7,0 \cdot 10^2$	$\pm 30$ $\pm 50$	$180 \times 160 \times 305$
Светоцифровой ВТБ-6	ПДТ-20	$4,0 \cdot 10^{-2} \dots 10,0$ $10,0 \dots 3,0 \cdot 10^3$	$\pm 25$ $\pm 30$	$120 \times 158 \times 470$
Цифровой ВТБ 2/3 -002	ПДТ-18	$6,0 \cdot 10^{-2} \dots 4,0 \cdot 10^3$	$-50 \dots +70$	$120 \times 158 \times 455$
ДВТ-3/0-001	ПМТ-6-3М	$1,0 \dots 4,0 \cdot 10^3$	$-50 \dots +100$	$74 \times 49 \times 52$
Цифровой УКВ-3/0-002				$212 \times 128 \times 490$
Цифровой ВТЦ-1	ПДТ-8, ПДТ-9	$1,3 \cdot 10^{-2} \dots 6,7 \cdot 10^1$ $1,3 \cdot 10^{-3} \dots 13,0$	$\pm 20$ $\pm 30$	$260 \times 110 \times 250$

Примечание. Вакуумметры и реле имеют аналоговый выход  $0 \dots 10$  В (кроме ВТ-3, ВТ-2А-П, ВТСО-1, РВБ-1).

#### 14.5. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ И ВЯЗКОСТНЫЙ ВАКУУММЕТРЫ

Приборы этого типа в настоящее время мало распространены из-за сложности конструкций и неудобств в работе. Основным их недостатком является необходимость применения в условиях низкого давления прецизионной системы подвески.

**Радиометрический вакуумметр.** В данном приборе используется радиометрический эффект. Между двумя пластинами, находящимися при разных температурах, возникают силы отталкивания. Они вызваны тем, что молекулы газа, ударяющиеся о более горячую поверхность, отскакивают от нее, получив большую кинетическую энергию, чем молекулы, ударяющиеся о более холодную поверхность.

Появляющееся при этом отталкивание пластин пропорционально давлению газа, если расстояние между пластинами меньше средней длины свободного пути молекул газа.

Диапазон давлений, измеряемых радиометрическими вакуумметрами, составляет  $1 \dots 10^{-6}$  Па ( $10^{-2} \dots 10^{-8}$  мм рт.ст.). Верхний предел измерений определяется давлением, при котором средняя длина свободного пути молекул сравнима с расстоянием между пластинами; нижний предел обусловлен соотношением между радиометрической силой и силой давления на холодную пластину инфракрасного излучения нагретой пластины.

Существует много конструктивных разновидностей радиометрического вакуумметра (Кнудсена, Вудро, Шредера, Хьюза и др.).

**Вязкостный (динамический) вакуумметр.** Принцип действия этого прибора основан на зависимости вязкости разреженного газа от давления. Эта зависимость существует в области давлений, при которых средняя длина свободного пути молекул больше или сравнима с размерами манометрического преобразователя и не зависит от рода газа

Диапазон давлений, измеряемых вязкостными вакуумметрами, составляет  $10^{-3} \dots 1$  Па.

Существует два типа вязкостных вакуумметров: колебательный и с вращающимся элементом. В колебательном вакуумметре мерой давления является время затухания в газе свободных колебаний какого-либо вибратора, например кварцевых нитей, закрепленных с одного или обоих концов или соединенных мембраной, и др.

В вакуумметре с вращающимся элементом момент силы от быстровращающегося элемента передается через газ к неподвижному элементу, подвешенному на чувствительной подвеске. Угол закручивания неподвижного элемента или, например, частота вращения подвижного элемента является мерой давления. В последнем случае замедление частоты вращения есть величина, зависящая от внутреннего трения газа. В качестве рабочих элементов используются диски; коаксиальные цилиндры с лопатками; стальной шарик, бесконтактно подвешенный в магнитном поле.

#### 14.6. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Принцип действия ионизационных вакуумметров основан на зависимости ионного тока, возникшего в результате ионизации молекул разреженного газа, от измеряемого давления.

По способу ионизации газа ионизационные вакуумметры подразделяют на три типа: электронные ионизационные, в которых ионизация газа осуществляется

электронами, ускоряемыми электрическим полем; радиоизотопные, где для ионизации газа применяют излучение радиоизотопных источников; магнитные электроразрядные, действие которых основано на зависимости тока электрического разряда в магнитном поле от измеряемого давления. Чувствительность ионизационных вакуумметров всех типов зависит от рода газа, давление которого измеряют.

**Электронные ионизационные вакуумметры.** Измерительный преобразователь давления электронного ионизационного вакуумметра представляет собой электронную лампу с тремя (не менее) электродами: катодом, эмитирующим электроны; анодом, ускоряющим эти электроны до достижения энергии, значительно превышающей энергию ионизации газа; коллектором ионов, образовавшихся при ионизации. Градуировочная характеристика вакуумметра линейная; ей соответствует уравнение

$$p = I_i / (I_e K) = I_i / S = C I_i, \quad (14.3)$$

где  $I_i$  – сила ионного тока на коллектор, А;  $I_e$  – сила электронного тока, А;  $K$  – приведенная чувствительность,  $\text{Па}^{-1}$ ;  $S$  – абсолютная чувствительность, А/Па;  $C$  – постоянная вакуумметра (преобразователя), Па/А.

Значения  $S$  или  $C$  определяют для данного газа экспериментально по результатам градуировки вакуумметра (преобразователя); данные по азоту приводят в паспорте.

С помощью ионизационных вакуумметров различных конструкций можно измерять давление в диапазоне  $300 \dots 10^{-11}$  Па. За минимальное измеряемое давление принимают давление, при котором сила фоновых токов составляет 10 % от силы ионного тока газовой фазы. Средняя быстрота откачки преобразователя при токе эмиссии 5 мА составляет  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , а при токе 0,5 мА –  $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Принципиальные схемы электронных ионизационных преобразователей даны на рис. 14.10.



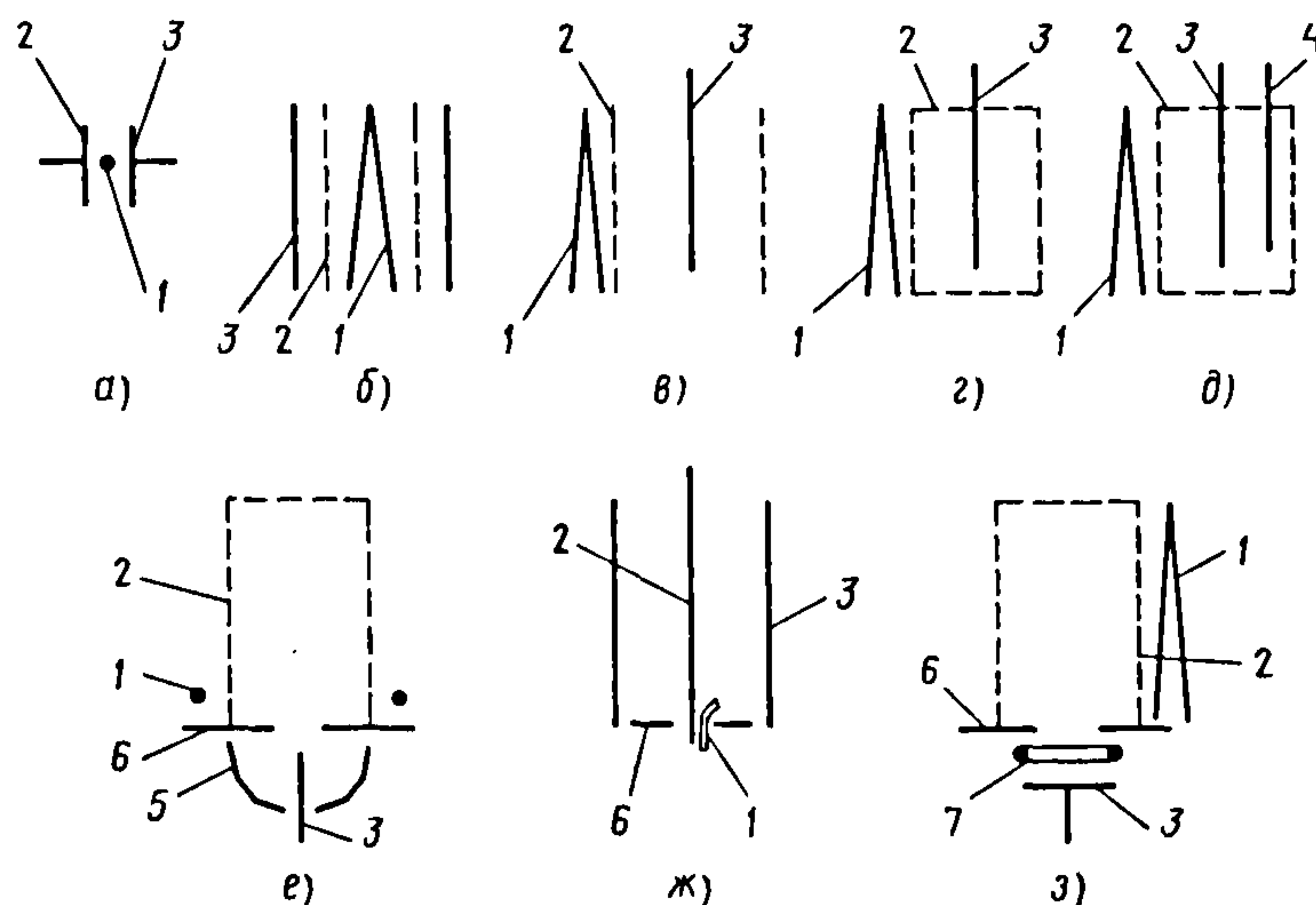


Рис. 14.10. Принципиальные схемы ионизационных преобразователей:

*а* – прямопролетный (высокого давления); *б* – с цилиндрическим коллектором; *в* – с осевым коллектором (Байарда–Альперта); *г* – с осевым коллектором и торцовыми сетками; *д* – с осевым коллектором и модулятором; *е* – экстракторный; *ж* – орбитронный; *з* – супрессорный;  
1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – модулятор; 5 – отражатель ионов; 6 – экран; 7 – супрессор

Давление различных газов вычисляют по показаниям вакуумметра с использованием формулы (14.3). Для вакуумметров с линейной градуировочной характеристикой  $q = S_r/S_v$ , где индексы «г» и «в» соответствуют газу и воздуху. Относительная чувствительность  $q$ , электронных ионизационных вакуумметров к одноатомным газам и парам по азоту, найденные экспериментально, приведены ниже:

Газ .....	He	Ne	Ar	Kr
$q$ , .....	0,19	0,33	1,37	1,91
Газ .....	Xe	Hg	Cd	N <sub>2</sub>
$q$ , .....	2,80	3,3	2,4	1,0

Относительные чувствительности по азоту электронных ионизационных вакуумметров к многоатомным газам и парам, а также к органическим соединениям, найденные экспериментально ( $q_e$ ) и рассчитанные ( $q_p$ ), приведены соответственно в табл. 14.10 и 14.11.

Кроме того, коэффициенты относительной чувствительности можно вычислить по формулам:

$$q_{p1} = Q_r / Q_{N_2} = \gamma; \quad (14.4)$$

$$q_{p2} = 4,06 \cdot 10^{-2} z \exp(7,88 \cdot 10^{-3} D_0 / z); \quad (14.5)$$

$$q_{p3} = \sum m_i r_i, \quad (14.6)$$

где  $Q_r$  и  $Q_{N_2}$  – полные абсолютные поперечные сечения ионизации соответственно газа и азота, см<sup>2</sup>;  $\gamma$  – относительное поперечное сечение ионизации;  $z$  – число электронов в молекуле газа (в нейтральном атоме число электронов равно атомному номеру);  $D_0$  – энергия диссоциации газообразных молекул на атомы при температуре 0 К, кДж/моль;  $m_i$  – число атомов одного рода, входящих в состав молекулы;  $r_i$  – относительное эффективное сечение ионизации данного атома.

### 14.10. Экспериментальная $q$ , и расчетная по формулам (14.4)–(14.6) относительная чувствительность электронных ионизационных вакуумметров к газам и парам

Коэффициент	Значение $q$ для							
	H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	CO <sub>2</sub>	NO	O <sub>2</sub>
$q_s$	0,44	0,45	0,64	1,10	1,02	1,60	1,15	0,87
$q_{p1}$	0,38	0,41	1,23	1,03	1,06	1,39	1,24	0,96
$q_{p2}$	0,44	0,46	1,02	0,83	1,03	1,58	0,87	0,83
$q_{p3}$	0,47	–	1,21	0,94	1,05	1,42	0,96	0,93

Коэффициент	Значение $q$ для						
	воздух	H <sub>2</sub> S	HCl	N <sub>2</sub> O	SF <sub>4</sub>	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
$q_s$	0,97	1,30	–	1,24	2,50	2,90	1,0
$q_{p1}$	0,75	2,03	1,61	1,30	2,41	–	
$q_{p2}$	0,97	1,00	0,88	1,38	–	2,92	
$q_{p3}$	0,88	2,46	1,82	1,46	3,45	4,25	

### 14.11. Экспериментальная $q$ , и расчетная по формулам (14.4)–(14.6) относительная чувствительность электронных ионизационных вакуумметров к органическим соединениям

Коэф- фициент	Значение $q$ для								
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
$q_s$	1,49	2,53	3,80	4,37	5,50	5,65	–		
$q_{p1}$	1,63	2,74	3,64	4,57	5,60	6,77	7,72	8,18	8,86
$q_{p2}$	1,50	2,50	3,50	4,51	5,54	6,60	7,58	8,60	9,60
$q_{p3}$	1,53	2,59	3,65	4,71	5,77	6,83	7,89	8,95	10,0

Значения  $r_i$  и  $D_0$  соответственно для атомов и молекул различных веществ при  $T = 0$  приведены ниже:

Атом . . . . .	N	O	H	C	F	Cl	Br	I	P	S	
$r_i$ . . . . .	0,500	0,464	0,236	0,588	0,243	1,589	2,204	3,050	2,050	1,990	
Молекула . . .	Br <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	CO	NO	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	HCl
$D_0$ . . . . .	190,1	238,9	154,8	148,7	1070,0	697,1	493,8	1109,3	942,0	431,9	427,3

Кроме того, значение  $D_0$  можно рассчитать по формуле

$$D_0 = \sum_{i=1}^m n_i E_{0i},$$

где  $m$  – число типов связей в молекуле;  $n_i$  – число связей данного типа в молекуле;  $E_{0i}$  – средняя энергия связи  $i$ -го типа, кДж/моль (табл. 14.12).

Результаты расчета относительной чувствительности  $q$  по формулам (14.4)–(14.6) приведены в табл. 14.10 и 14.11.

В соответствии с формулой (14.5) коэффициенты относительной чувствительности к парам вакуумных масел МФТ-1; ПФМС-2/5л; ФМ-1; 5Ф4Э равны соответственно 27,1; 30,6; 29,7 и 24,6. Коэффициенты относительной чувствительности для смеси газов рассчитывают по формуле (14.3). Основные характеристики промышленных вакуумметров и электронных ионизационных преобразователей приведены соответственно в табл. 14.13 и 14.14.



**14.12. Энергия простых и кратных ковалентных связей  
в различных химических условиях**

Соединения группы	Связь	$E_0$ , кДж/моль	Связь	$E_0$ , кДж/моль	Соединения группы	Связь	$E_0$ , кДж/моль
Парафины	C–C	331,8	C–H	331,8	CO <sub>2</sub>	C=O	799,1
Олефины	C=C	587,8		587,8	CO	C≡O	1070,0
Ацетиленовые	C≡C	823,1		823,1	H <sub>2</sub> O	H–O	458,7
Бензольное кольцо	C–C	487,1		487,1	Галоген- алкины	C–Cl C–F	318,0 486,6
Спирты	C–O	333,1	H–O	438,0	NO <sub>2</sub>	N=O	464,8
Альдегиды и кетоны	C–C	350,5	C=O	705,8	NH <sub>3</sub> , амины	N–H	385,0

**14.13. Основные характеристики промышленных вакуумметров**

Вакуумметр		Преобразо- ватель	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм			
ВИТ-2	(С)	ПМТ-2 ПМТ-4М	0,13...13	$\pm 60$ $-70...+250$	320×280×215			
		ПМИ-2 ПМИ-3-2 ПМИ-51	$2,4 \cdot 10^{-5}...0,13$ $2,6 \cdot 10^{-5}...1,3$ $1,0 \cdot 10^{-4}...1,0$	$\pm 30$				
		ПМТ-2 ПМТ-4М	0,13...13	—				
ВИТ-3		ПМИ-2 ПМИ-3-2 ПМИ-10-2	$2,4 \cdot 10^{-5}...0,13$ $2,6 \cdot 10^{-5}...1,3$ $2 \cdot 10^{-3}...1,3 \cdot 10^2$	$\pm 35$	485×230×360			
		ПМИ-51	$10^{-4}...1$	$\pm 30$				
		ВИ-12	ИМ-12 МИ-12-8	$10^{-7}...10^{-3}$ $7 \cdot 10^{-8}...10^{-3}$		$\pm 50$	448×340×287	
			ВИ-14	ИМ-12 МИ-12-8				$10^{-7}...10^{-3}$ $7 \cdot 10^{-8}...10^{-3}$
				ПМИ-27				$4 \cdot 10^{-8}...13$
РВИЦБ-1А		(Ц)	ПМИ-10-2	$2 \cdot 10^{-3}...1,3 \cdot 10^2$	—	100×158×230		
ВИО-1		(О)	ПМИ-39-2	$7 \cdot 10^{-9}...0,1$	$\pm(10...30)$	410×181×360 228×95×328 259×180×322		
ВИЦБ 2/7-002	(Ц)	ПМИ-51	$6,7 \cdot 10^{-5}...1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4}...1 \cdot 10^{-1}$ $1 \cdot 10^{-1}...1$ $1...10$	$\pm 40$ $\pm 35$ $\pm 60$ $\pm 40$	240×158×470			
ВИЦ 9/0-001			ПМИ-55	$7 \cdot 10^{-9}...1 \cdot 10^{-7}$ $7 \cdot 10^{-7}...1$		$\pm 55$ $\pm 25$	242×160×445	
ВПД-1			ПМК-1	$2 \cdot 10^{-8}...1 \cdot 10^{-7}$ $1 \cdot 10^{-7}...1 \cdot 10^{-2}$		$-50...+100$ $\pm 30$		366×177×420

Примечание. Тип отчетного устройства указан в скобках: (С) – стрелочный, (Ц) – цифровой; (О) – образцовый.

### 14.14. Основные характеристики ионизационных манометрических преобразователей

Преобра- зователь	$I_e$ , мА	$U_{в.к.}$ , В	$U_{и.к.}$ , В	$K$ , Па <sup>-1</sup>	Диапазон изме- рений, Па	Габаритные оазмеры, мм	$D_y$ , мм
ПМИ-10-2	0,1	130	-50	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3} \dots 130$	Ø 20×60	16 Ш
ПМИ-2	0,5	200		0,17	$2,4 \cdot 10^{-5} \dots 1,3$	Ø 32×280	10ПШ
ПМИ-3-2				0,15	$2,6 \cdot 10^{-5} \dots 1,3$	Ø 90×130	50 Ф
ИМ-12			-100	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	Ø 90×190	П
ПМИ-12-8				$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	Ø 90×150	50Ф
ПМИ-27	0,15	270	-30	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3} \dots 13$	Ø 90×130	
	5,0		0,15	$4 \cdot 10^{-8} \dots 1,3 \cdot 10^{-2}$			
ПМИ-39-2	0,5	200	-100	0,12	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1,3 \cdot 10^{-1}$	Ø 90×99	
	5,0				$6,5 \cdot 10^{-9} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$		
ПМИ-51	0,5		-50	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5} \dots 10$	Ø 35×175	10ПШ
ПМИ-55	0,5		-100	0,12	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1,0$	Ø 90×99	50Ф
	5,0	$7 \cdot 10^{-9} \dots 1,3 \cdot 10^{-3}$					

Условные обозначения:  $I_e$  – сила электронного тока;  $U_{а.к.}$ ,  $U_{и.к.}$  – напряжение между анодом и катодом, между ионным коллектором и катодом соответственно;  $K$  – константа преобразователя. Буквами обозначен тип соединения: П – паяное, Ф – фланцевое, Ш – штуцерное.

**Радиоизотопные вакуумметры.** В радиоизотопных вакуумметрах ионизация газа осуществляется  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицами, излучаемыми радиоактивными изотопами. Преобразователь давления содержит источник  $\alpha$ - или  $\beta$ -излучения, коллектор ионов и анод, находящийся под положительным потенциалом относительно коллектора, что обеспечивает попадание на коллектор образовавшихся ионов.

Эти вакуумметры имеют линейную градуировочную характеристику и позволяют измерять давление в диапазоне  $10^3 \dots 10^5$  Па с погрешностью до 5 %. Основные преимущества радио-изотопных вакуумметров – неперегорающий катод и высокая стабильность чувствительности.

Коэффициенты относительной чувствительности радиоизотопных вакуумметров к различным газам приведены ниже:

Газ	$N_2$	He	Ne	Ar	$H_2$
$q$	1,0	0,21	0,5	1,2	0,23
Газ	$CO_2$	$H_2O$	$(CH_3)_2CO$		
$q$	1,5	0,88	2,7		

**Магнитные электроразрядные вакуумметры.** Простейший магнитный электроразрядный преобразователь давления представляет собой помещенную в магнитное поле двухэлектродную систему (катод и анод). В системе возникает самостоятельный разряд при высоком напряжении между ее электродами. Принципиальные схемы преобразователей приведены на рис. 14.11.

В общем случае градуировочная характеристика имеет вид

$$I_i = Sp^n,$$

где  $I_i$  – сила измеряемого тока, А;  $S$  – абсолютная чувствительность, А/Па;  $n$  – показатель степени (в зависимости от типа преобразователя  $n = 0,9 \dots 1,7$ ).

Вакуумметры позволяют измерять давление в диапазоне  $10^{-12} \dots 10^2$  Па. Благодаря отсутствию накаливаемого катода значительно возрастает срок службы преобразователей. Выделяемая в них тепловая энергия (мощность) мала, что дает возможность применять их даже в криогенных системах.



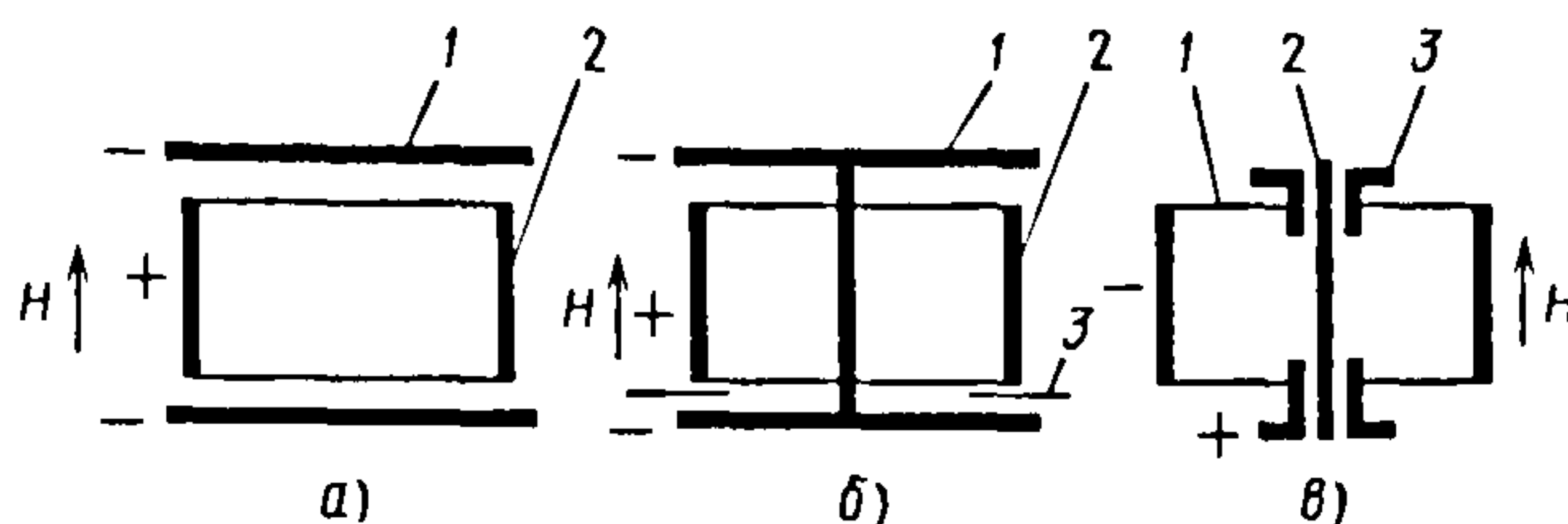


Рис. 14.11. Принципиальные схемы магнитных электроразрядных преобразователей давления:

а – Пеннинга; б – магнетронный; в – инверсно-магнетронный; 1 – катод; 2 – анод; 3 – экран;  $H$  – вектор напряженности магнитного поля

Недостатки преобразователей – неустойчивость разряда, обуславливающая высокую погрешность измерения и значительную быстроту откачки ( $0,3 \cdot 10^{-4} \dots 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ); плохая «зажигаемость» при малом давлении и зависимость ее от состояния поверхности электродов.

Газ . . . . .	$\text{N}_2$	He	Ne	Ar	Kr	Xe	$\text{H}_2$	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2\text{O}$
$q$ . . . . .	1,00	0,15	0,26	1,40	2,46	3,50	0,43	0,86	1,30	1,66
Газ . . . . .	NO	$\text{NH}_3$	$\text{H}_2\text{S}$	HCl	Циклогексан		$\text{C}_6\text{H}_{12}$	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	
$q$ . . . . .	1,17	1,11	2,20	1,65	6,40		6,73	6,60	7,60	

Значения относительной чувствительности  $q$  для магнитных электроразрядных и ионизационных электронных вакуумметров близки, поэтому при отсутствии необходимых данных по  $q$  для расчета давлений можно использовать значения, приведенные в табл. 14.10 и 14.11, либо формулы (14.4)–(14.6).

В табл. 14.15 и 14.16 приведены основные технические данные промышленных магнитных электроразрядных преобразователей и вакуумметров. С помощью

Давление различных газов определяют по формуле (14.1).

Экспериментальные значения коэффициента  $q$  относительной чувствительности магнитных электроразрядных вакуумметров приведены ниже:

вакуумметра-течеискателя ВТИ-1 можно не только измерять полное давление, но и индцировать парциальное давление пробного газа (фреона-12 или гексафторида серы) с чувствительностью до  $10^{-3} \%$  от полного давления, что позволяет выявлять течи, пропускающие поток пробного газа до  $10^{-10} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ .

В табл. 14.1. представлен рабочий диапазон давлений для ряда вакуумметров с используемыми манометрическими преобразователями давления.

#### 14.15. Технические характеристики магнитных электроразрядных преобразователей

Преобразователь	$U_{\text{в.к.}}$ , кВ	$B$ , Тл	Диапазон измерений, Па	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Соединение с вакуумной системой
ПММ-22	2,0	0,44	$1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3$	$\varnothing 90 \times 80$	1,3	Фланцевое ( $D_y = 50 \text{ мм}$ )
ПММ-28	2,5	0,045	$1,3 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^2$	$\varnothing 78 \times 118$	0,6	Фланцевое ( $D_y = 20 \text{ мм}$ )
ПММ-32-1		0,11	$1,3 \cdot 10^{-7} \dots 1,3$	$\varnothing 90 \times 85$	0,9	Фланцевое ( $D_y = 50 \text{ мм}$ )

Окончание табл. 14.15

Преобразователь	$U_{a,k}$ , кВ	$B$ , Тл	Диапазон измерений, Па	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Соединение с вакуумной системой
ПММ-38	2,5	0,125	$1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3$	$\varnothing 90 \times 85$	0,8	Фланцевое ( $D_y = 50$ мм)
ПММ-42		0,11	$10^{-5} \dots 0,1$	$150 \times 150 \times 150$	2,0	
ПММ-44		0,094	$1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3$	$\varnothing 24 \times 83$	0,1	Штуцерное ( $D_y = 16$ мм)
ПММ-46	5,5	0,18	$2 \cdot 10^{-11} \dots 0,13$	$95 \times 98 \times 106$	1,8	Фланцевое ( $D_y = 50$ мм)

Условные обозначения:  $U_{a,k}$  – напряжение между анодом и катодом;  $B$  – магнитная индукция.

#### 14.16. Технические характеристики магнитных электроразрядных вакуумметров

Вакуумметр		Преобразователь	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм
РВМ-1М	(С)	ПММ-22	$10^{-4} \dots 1$	$\pm 60$	100×158×315
ВЭМБ-1		ПММ-28	$10^{-3} \dots 10^2$		245×177×310
ВМБ-8		ПММ-32-1	$10^{-7} \dots 1$	−40...+80	240×158×335
ВМБ-10		ПММ-38	$10^{-4} \dots 1$	$\pm 60$	240×158×388
ВМБ-11	(СЦ)	ПММ-46	$10^{-8} \dots 0,1$	−40...+80	120×158×395
ВМБ-12		ПММ-44	$10^{-4} \dots 1$	−50...+80	80×158×395
ВМБ-14		ПММ-32-1	$10^{-7} \dots 1$	−40...+80	80×158×467
ВМЦБ-12	(Ц)		$10^{-6} \dots 0,1$	−50...+100	100×158×230
ВМБ-1/8-001	(СЦ)	ПММ-46	$10^{-8} \dots 0,1$	−40...+80	120×158×463
ВТИ-1	(С)	ПММ-42	$10^{-5} \dots 0,1$	$\pm 60$	240×158×336
ВМБ-16	(Ц)	ПММ-46	$2 \cdot 10^{-11} \dots 7 \cdot 10^{-9}$	−40...+80	320×158×480
			$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	−55...+130	
ДВЭ-0/7-007	(−)	ПММ-32-1	$2 \cdot 10^{-7} \dots 1$	−50...+100	56×72×156
УКВ-3/7-001	(Ц)	ПММ-32-1	$2 \cdot 10^{-7} \dots 1$	−50...+100	212×128×490
		ПМТ-6-3	$1 \dots 4 \cdot 10^3$		
ВТМ-2		ПММ-32-1	$1 \cdot 10^{-6} \dots 1,3 \cdot 10^{-1}$	−35...+60	360×180×400
		ПМТ-6-3	$1,3 \cdot 10^{-1} \dots 1,3;$ $1,3 \dots 3,9 \cdot 10^3$	−45...+85 −35...+60	

Примечание. Вакуумметры и реле имеют аналоговый выход  $0 \dots 10$  В (кроме ВТ-3, ВТ-2А-П, ВТСО-1, РВБ-1). Тип отсчетного устройства указан в скобках: (С) – стрелочный; (СЦ) – светоцифровой; (Ц) – цифровой; (–) – без отсчетного устройства.



# Глава 15

## МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ

---

### 15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Задача масс-спектрометрии – определение химического состава и парциальных давлений остаточных газов в откачиваемых сосудах [1, 41]. Анализ включает ряд последовательных операций:

- снижение давления анализируемого газа до  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па;
- превращение молекул газа в положительные ионы электронной бомбардировкой;
- формирование ионного пучка заданной энергии в электростатическом поле;
- разделение ионного пучка по массам;
- улавливание и регистрация ионов, что выполняется отдельно для каждой массовой составляющей ионного пучка;
- расшифровку масс-спектра.

Масс-спектрометры состоят из двух основных частей: *анализатора* и *измерительного блока*. Анализаторы масс-спектрометров различают по способам разделения ионов по массе или массовому числу. Массовое число иона  $M/z_i$  определяется отношением молекулярной массы иона  $M_i$ , выраженной в атомных единицах массы (1 а.е.м. = 1/12 массы атома основного изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ ), к его заряду  $z_i e$ , выраженному числом  $z_i$  элементарных зарядов  $e$ . В основном при ионизации газа

медленными электронами образуются ионы с одинарным положительным зарядом  $z_i = 1$ , массовое число которых равно молекулярной массе.

В масс-спектрометрическом преобразователе после разделения по массовым числам ионы определенной массы, на которую настроен масс-спектрометр, попадают на коллектор и создают в его цепи ток, сила которого пропорциональна парциальному давлению данного газа. Эту силу тока регистрирует измерительный блок. Давление в камере преобразователя во избежание рассеяния ионов из-за столкновений с частицами остаточного газа должно быть  $\leq 10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па.

Для получения масс-спектра анализируемого газа анализатор поочередно настраивают на ионы с различными массовыми числами и регистрируют их прохождение через коллектор в виде последовательного ряда пиков. Развертку масс-спектра получают изменением параметров полей или энергии ионов. По способу разделения ионов в преобразователе масс-спектрометры делят на статические и динамические. В статических масс-спектрометрах для разделения ионов используют постоянные электрические или магнитные поля, в динамических – изменяющиеся во времени электрические поля (табл. 15.1).

## 15.1. Классификация масс-спектрометров

Масс-спектрометрия		Принцип разделения ионов	Область применения
Группа	Тип		
Статические	Панорамный (фар-витрон)	В продольном электростатическом поле с параболическим распределением потенциала	Качественный анализ газов (индикаторный прибор)
	С магнитным отклонением	В однородном поперечном магнитном поле	Высокоточный количественный анализ состава газовой среды в высоковакуумных установках
Динамические	Омега-тронный	В радиочастотном электрическом и постоянном магнитном взаимно-перпендикулярных полях	Измерение парциальных давлений (преимущественно легких газов), анализ физико-химических процессов в высоком вакууме
	Квадрупольный	В высокочастотном электрическом поле анализатора, образованного четырьмя параллельными электродами	Измерение парциальных давлений в широком диапазоне масс, контроль и управление технологическими процессами
	Монополярный	В высокочастотном электрическом поле анализатора, образованного двумя электродами	
	Время-пролетный	По времени пребывания в пространстве дрейфа, свободном от электрических и магнитных полей	Исследование газовой кинетики с контролем газовых процессов длительностью до нескольких микросекунд
	Радиочастотный	В радиочастотном продольном электрическом поле	Газовый анализ в промышленных установках, анализ молекулярных потоков пара в установках вакуумного нанесения пленок

Основные параметры масс-спектрометров:

– разрешающая способность, определяемая отношением массового числа иона  $M_i/z_i$  к наименьшему различаемому изменению массового числа  $\Delta M_i/z_i$ , т.е.  $\rho = M_i/\Delta M_i$  (ширина пика измеряется на уровне 10...50 % от высоты пика);

– диапазон анализируемых масс (обычно 2...200, нижний предел соответствует водороду, верхний – ртути);

– чувствительность, А/Па, определяемая отношением изменения ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению парциального давления газа и зависящая от рода газа;

– порог чувствительности – наименьшее определяемое парциальное давление газа;

– максимальное рабочее давление, при котором отклонение от линейной зависимости между силой ионного тока и



соответствующим парциальным давлением (вследствие рассеяния ионов в преобразователе с повышением давления) достигает предельно допускаемого значения (обычно 10 %).

Для проведения количественного анализа масс-спектрометр предварительно градуируют по каждому компоненту смеси. Пробный газ вводят в стандартный объем, из которого он поступает в источник ионов. Давление в этом объеме измеряют обычным манометрическим преобразователем. Определяют главную линию спектра, соответствующую данному компоненту, и устанавливают по ней чувствительность прибора. Затем находят отношение интенсивностей всех линий спектра данного газа к интенсивности главной линии.

Имея спектры чистых газов, по интенсивности масс-спектра смеси можно определить состав и парциальное давление компонентов смеси.

Расшифровка масс-спектра затруднена по многим причинам. Основные из них:

- доминирование в спектрах однозарядных ионов, наряду с которыми имеются и двухзарядные  $z_i = 2$ ; массовое число последних вдвое меньше их молекулярной массы (например,  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ar}^{++}$ );
- наличие компонентов, состоящих из нескольких изотопов и дающих пики интенсивности отдельных изотопов в их количественном соотношении;
- частичная диссоциация при ионизации молекул под действием электронного луча и накаливаемого катода сложных молекул на простые, дающие в спектре свои пики ионов (например,  $\text{CO}_2$  — пики

$\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{O}^+$  и  $\text{O}_2^+$ ); или большое число «осколочных» пиков (для спектров органических соединений), по которым можно составить лишь приближенное представление об исходном анализируемом продукте; иногда различным веществам соответствуют пики с одним и тем же массовым числом (например, массовое число 16 соответствует  $\text{CH}_2^+$  и  $\text{O}^+$ ).

Для высоковакуумных герметичных систем нехарактерно присутствие кислорода; кислород преимущественно дает соединения  $\text{CO}$  (массовое число 28) и  $\text{CO}_2$  (массовое число 44). Признак натекания воздуха через течи — параллельный рост пиков азота (массовое число 28), кислорода (массовое число 32) и аргона (массовое число 40).

Идентифицировать вещества можно только с учетом характерного наличия дополнительных сопутствующих пиков, поскольку в масс-спектрах всех соединений при неизменной энергии ионизирующих электронов соотношение пиков примерно постоянно и практически не зависит от типа масс-спектрометра.

В табл. 15.2 приведены ориентировочные спектральные характеристики некоторых газов и паров, наиболее часто применяемых в вакуумной технике, в табл. 15.3 — технические данные измерителей парциальных давлений и масс-анализаторов, выпускавшихся отечественной промышленностью до 1990-х гг. XX века и эксплуатируемых до настоящего времени, табл. 15.4 — данные нескольких современных масс-спектрометров.

## 15.2. Спектральные характеристики некоторых газов и паров

Газ	Ион	Массовое число	Относительная высота пика	Газ	Ион	Массовое число	Относительная высота пика	
H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2	1,00	CO <sub>2</sub>	C <sup>+</sup>	12	0,04	
	H	1	0,06		CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	16	1,00
	H <sub>3</sub> <sup>+</sup> и HD <sup>+</sup>	3	0,01			CH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	15	0,80
He	He <sup>+</sup>	4	1,00			CH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	14	0,14
Ne	Ne <sup>+</sup>	20				CH <sup>+</sup>	13	0,06
		22	0,01			C <sup>+</sup>	12	0,02
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	28	1,00	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	26	1,00	
	N <sub>2</sub> <sup>2+</sup> и N <sup>+</sup>	14	0,08		C <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	25	0,20	
	( <sup>14</sup> N <sup>15</sup> N) <sup>+</sup>	29	0,01		O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	24	0,05	
O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	32	1,00		CH <sup>+</sup>	13	0,04	
	O <sub>2</sub> <sup>2+</sup> и O <sup>+</sup>	16	0,10		H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2	0,04	
Kr	Kr <sup>+</sup>	84	1,00	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>*</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>+</sup>	28	1,00	
		86	0,33		C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	27	0,50	
		82	0,20		C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	26	0,50	
		83		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>+</sup>	28	1,00	
	Kr <sup>2+</sup>	42	0,19		C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	27	0,28	
		43	0,06		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> <sup>+</sup>	30	0,26	
		41	0,04		C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> <sup>+</sup>	29	0,20	
		41,5			C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	26	0,18	
Hg	Hg <sup>+</sup>	200	1,00	C <sub>2</sub> H <sup>++</sup> и CH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	15	0,03		
	Hg <sup>2+</sup>	100	0,5...0,7		C <sub>2</sub> H <sup>+</sup> ; CH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	25; 14	0	
Ar	Ar <sup>+</sup>	40	1,00	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>++</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> <sup>+</sup>	29	1,00	
	Ar <sup>2+</sup>	20	0,15		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>+</sup>	28	0,60	
	<sup>36</sup> Ar <sup>+</sup>	36	0,004		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> <sup>+</sup>	44	0,45	
H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	18	1,00		C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	27	0,40	
	OH <sup>+</sup>	17	0,30		C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> <sup>+</sup>	43	0,31	
	O <sup>+</sup>	16	0,02		C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	39	0,20	
	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2	0,01	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> <sup>+</sup>	41	0,16		
CO	CO <sup>+</sup>	28	1,00	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sup>***</sup>	—	31	1,00	
	O <sup>+</sup>	16	0,13		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sup>+</sup>	46	0,24	
	C <sup>+</sup>	12	0,03	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	—	43	1,00	
	<sup>13</sup> CO <sup>+</sup>	29	0,01		C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sup>+</sup>	58	0,36	
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	44	1,00	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	—	31	1,00	
	CO <sup>+</sup>	28	0,12		C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	74	0,28	
	O <sup>+</sup>	16	0,08					

\* Массовые числа 25; 29; 14; 24; 13; 12 дают пики 0,1...0,01.

\*\* Массовые числа 6; 38; 37; 15; 30; 14 дают пики 0,1...0,01.

\*\*\* Большое число других пиков.



### 15.3. Технические данные измерителей парциальных давлений и анализаторов масс

Прибор		Порог чувствительности, Па	Разрешающая способность	Диапазон регистрируемых массовых чисел ионов, $M_i/z_i$	Рабочий диапазон давлений, Па
Наименование	Марка				
Омегатрон	ИПДО-1	$3 \cdot 10^{-8}$	20	2...100	$10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-8}$
	ИПДО-2	$5 \cdot 10^{-9}$	35	1...250	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-9}$
Радиочастотный масс-спектрометр	МХ-4301	$10^{-8}$	25	1...100	$10^{-3} \dots 10^{-8}$
	МХ-6401	$5 \cdot 10^{-7}$	50	1...4; 12...56	$10^{-2} \dots 10^{-7}$
Импульсный времяпролетный масс-анализатор (хроно-трон)	РМС-2М		45	2...12; 10...60; 40...200	$10^{-3} \dots 10^{-7}$
Квадрупольный масс-спектрометр			МСХ-3А	$10^{-7}$	
	МСХ-2М	$10^{-10}$	100		
	МСХ-4	$10^{-8}$	$\geq 100$	1...600	$10^{-3} \dots 10^{-8}$
	УАВ.Э-100/2-006	$10^{-9}$	100	2...100	$10^{-3} \dots 10^{-7}$
Радиочастотный однополярный масс-спектрометр	ЭФМ-1	$10^{-7}$	50	1...50 12...100	$10^{-1} \dots 10^{-7}$
	КМ-2		300	2...300	$10^{-3} \dots 10^{-7}$
Линейный резонансный масс-анализатор (фарви-трон)	МХ-7301	$10^{-8}$	200*	1...200	$10^{-2} \dots 10^{-8}$
	АПДМ-1	$10^{-11}$	400	1...400	$5 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-12}$
	АПДМ-2	$10^{-7}$	20	2...200	$10^{-3} \dots 10^{-7}$
Статический масс-спектрометр	МХ-1304		100	1...120	$10^5 \dots 10^{-7}$
	МХ-1306		800	2...450; 4...900	
	МСД-1	$10^{-8}$	60	2...150	$10^{-3} \dots 10^{-8}$

\* В области 70 а.е.м.

### 15.4. Данные современных масс-спектрометров

Название масс-спектрометра	Диапазон массовых чисел $M/z_i$	Разрешение	Габаритные размеры, см	Масса, кг	Диапазон давлений
Element2 (США)	0...260	>10 000	141×174×88	—	—
Trace GC Ultra (США)	2...1023	До 2500	—		
ЭМГ-20-7 (Россия)	1...200	>200			$10^{-4}$ Па
ProLine (Международная группа компаний Endress+Hauser)	1...300	—	36×61×40		14...140 кПа

Окончание табл. 15.4

Название масс-спектрометра	Диапазон массовых чисел $M/z_i$	Разрешение	Габаритные размеры, см	Масса, кг	Диапазон давлений
Trace MS Plus (США)	2...1023	2500	—	—	—
Trace DSQ (США)	1...1050	—	44×33×68	45	
Clarus 600 (США)	1...1200		—	—	
Finnigan focus dsq (США)	1...1050		44×68×33	45	
«Кристалл МС» (Россия)			—	—	Диапазон установки давления газа-носителя от 10 до 400 кПа с дискретностью установки 0,1 кПа
ФТИАН-5 (Россия)	1...1000	500	—	—	Остаточное давление в камере анализатора $\sim 10^{-10}$ мм рт. ст.
Dimaxion (США)	1...300	0,5 а.е.м на 10 %			11,4×22,9×13,3
Finnigan MAT 235 (США)	1...150	200	101×135×136	680,0	Для изотопного анализа
Delta Plus xp (США)	1...70	100	87×93×85	300,0	—

## 15.2. СТАТИЧЕСКИЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ

В магнитном масс-спектрометре (рис 15.1) анализируемый газ ионизируется в ионном источнике 2 пучком медленных

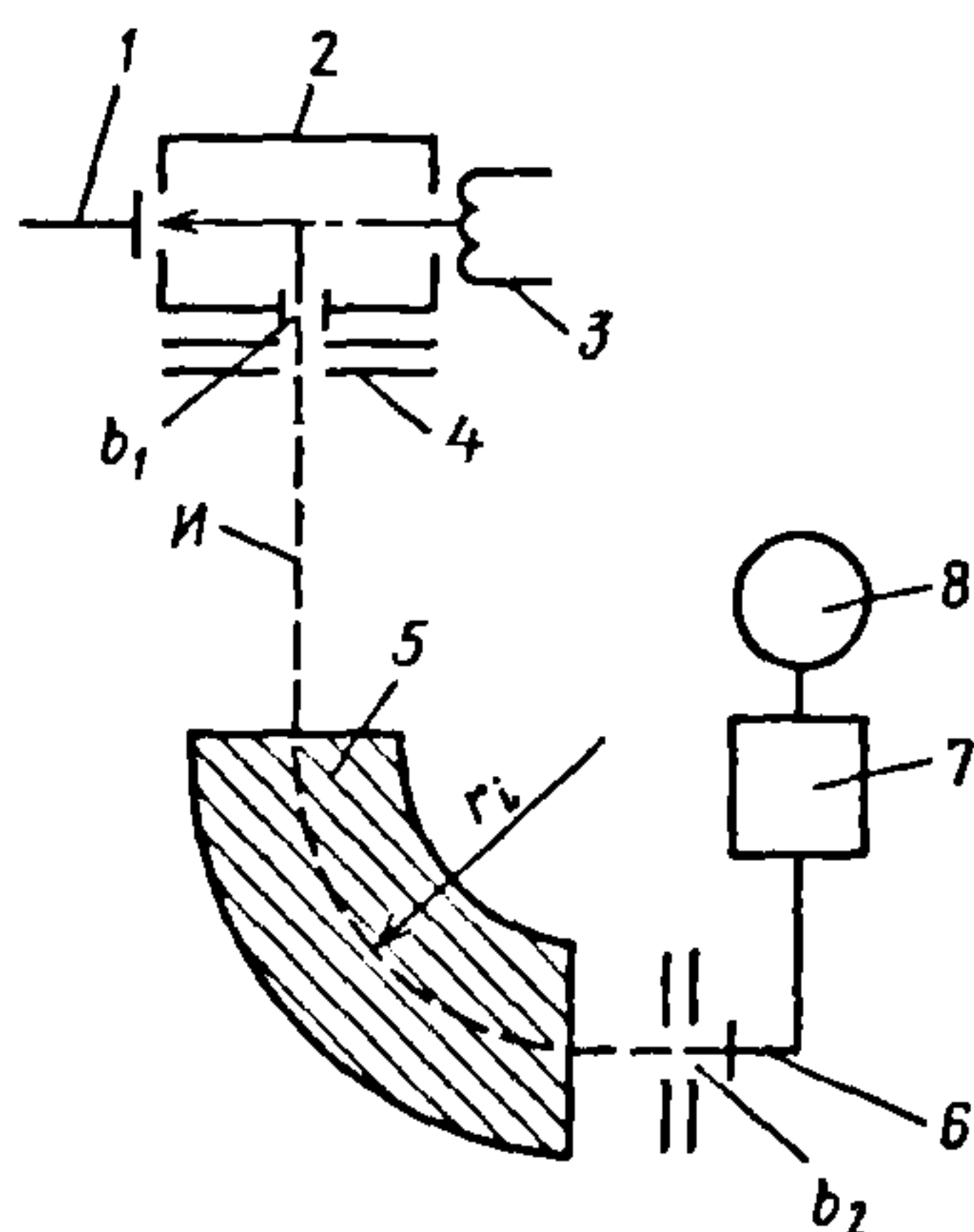


Рис. 15.1. Принципиальная схема магнитного масс-спектрометра

электронов, эмитируемых накалимым катодом 3 и нейтрализуемых на коллекторе 1. Ионы И вытягиваются из ионизатора через узкую выходную щель, ускоряются и дополнительно фокусируются полем электрических линз 4.

Пучок моноэнергетических ионов, имеющих разные скорости в соответствии с их массой  $M_i$  и зарядом  $z_i$ , попадает в зону действия поперечного магнитного поля магнита 5 и, изменив направление движения под влиянием силы Лоренца, поступает через выходную щель на коллектор 6 ионов различных масс.

Далее ионный ток коллектора проходит через усилитель 7 и подается на регистрирующий прибор 8. Обычно угол разворота газоаналитических масс-спектрометров 90; 120 или 180°.



Массовые числа ионов связаны с параметрами анализатора уравнением

$$M_i / z_i = 4,82 \cdot 10^7 r_i^2 B^2 / U, \quad (15.1)$$

где  $r_i$  – радиус траектории иона в магнитном поле, м;  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $U$  – ускоряющее напряжение в источнике ионов, В.

Анализ уравнения (15.1) показывает, что возможны два способа развертки масс-спектра: магнитный (изменением  $B$ ) и электростатический (изменением  $U$ ).

Разрешающая способность магнитных масс-спектрометров

$$\rho = r_i / [b_1 + b_2 + \sigma(b_3)],$$

где  $b_1$  – ширина щели на выходе из источника ионов;  $b_2$  – то же, перед коллектором ионов;  $\sigma(b_3)$  – суммарное расширение ионного пучка в плоскости щели шириной  $b_2$  в результате абберации.

Панорамный масс-спектрометр (фарвитрон) – рис. 15.2, а – служит для качественной оценки состава остаточных газов. Анализируемый газ ионизируется эмитируемыми накалившимся катодом 1 электронами, проходящими через диафрагму-модулятор 2 и ускоряемыми полем сетки 3. Ионы, образовавшиеся в анализаторе при прохождении электронов, ускоряются параболическим полем, образованным электродами 4 и 5, и под воздействием этого поля совершают колебания между сеткой 3 и сигнальным электродом 7, имеющими нулевые потенциалы. На электрод 6 подается максимальный отрицательный потенциал  $U$  (рис. 15.2, б). Каждый вид ионов наводит на сигнальном электроде 7 напряжение собственной частоты. Анализ ионов по массам заключается в измерении частот сигнальных напряжений узкополосным усилителем. Частота колебаний ионов, кГц,

$$f_i = 9,8 K_a \sqrt{\frac{U z_i}{M_i}}$$

где  $K_a$  – коэффициент, определяемый геометрией анализатора.

Частота колебаний ионов не зависит от места их возникновения. Для получения

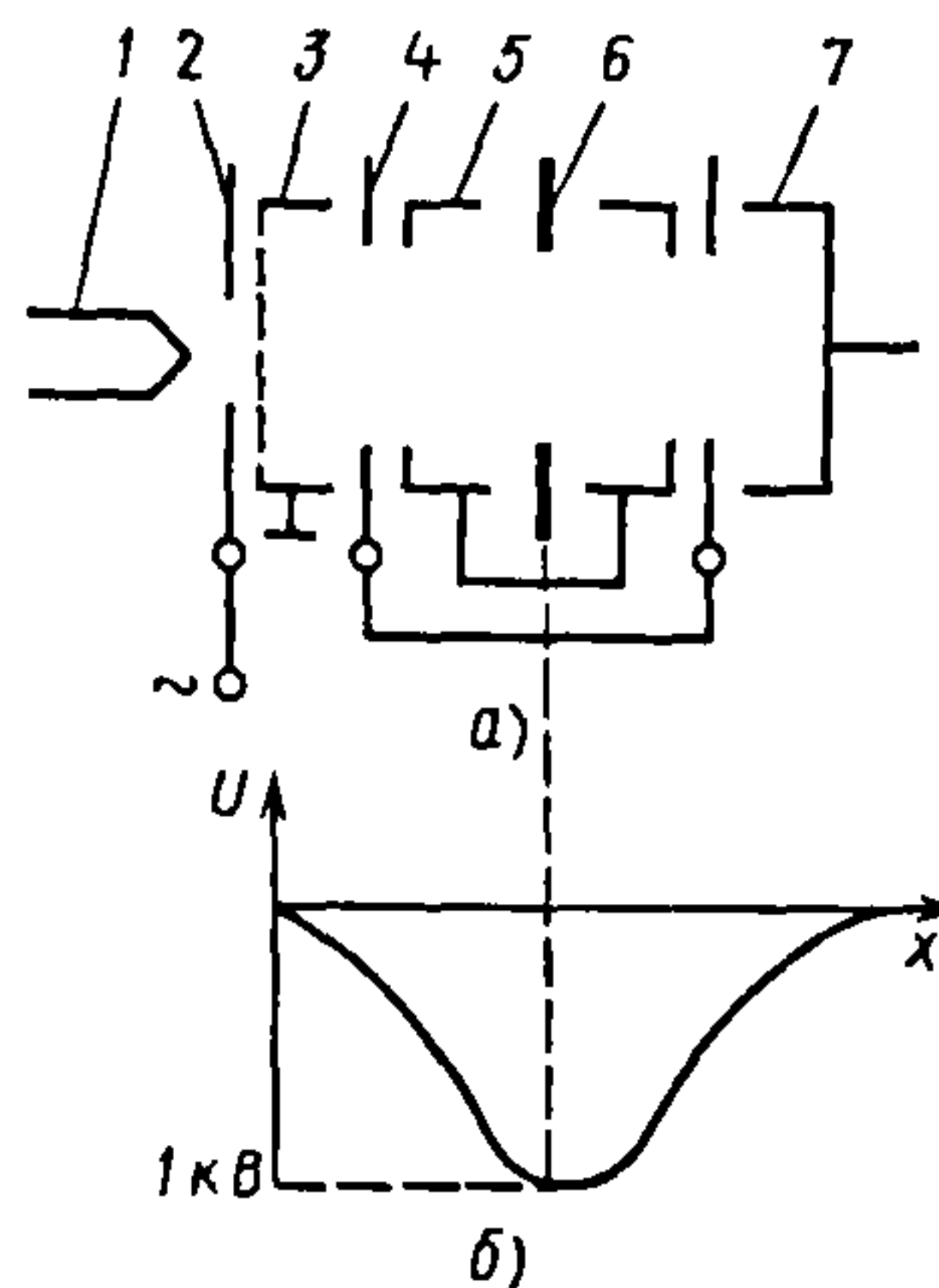


Рис. 15.2. Принципиальная схема анализатора панорамного масс-спектрометра

развертки масс-спектра в панорамном масс-спектрометре изменяют резонансную частоту диафрагмы-модулятора 2.

### 15.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ

Омегатронный масс-спектрометр (омегатрон) – рис. 15.3 – один из самых распространенных. Электроны, эмитированные катодом 5 накала, проходя через отверстия в улавливающих пластинах 6,

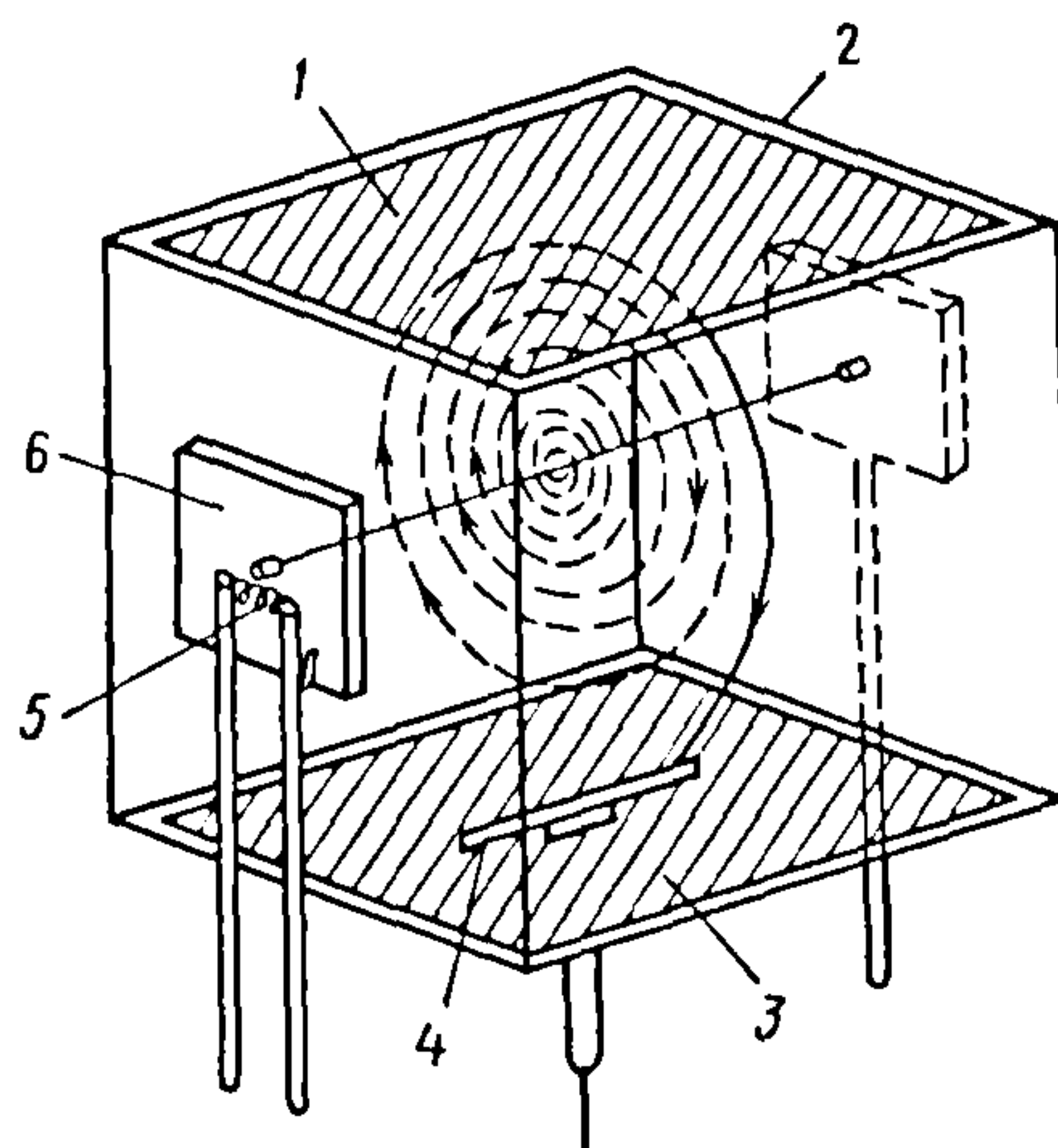


Рис. 15.3. Принципиальная схема анализатора омегатронного масс-спектрометра

попадают на коллектор ионов. Узкий пучок электронов, проходя через камеру 2 анализатора, ионизирует находящиеся там молекулы газа.

Ионы с различными массами подвергаются одновременному воздействию взаимно-перпендикулярных полей: радиочастотного электрического [напряженностью  $|E| = E \sin \omega t$ , приложенного между пластинами 1 и 3], и постоянного магнитного поля индукцией  $B$  от внешнего магнита (на рисунке не показан).

Ионы, для которых частота кругового движения в данном магнитном поле совпадает с частотой приложенного высокочастотного напряжения, попадают в резонанс с этим полем, ускоряются им и, двигаясь по раскручивающейся спирали, достигают коллектора 4 ионов. Силу ионного тока резонансных ионов регистрирует измерительный прибор.

Ионы с другими массами вращаются вокруг электронного пучка, то приближаясь к нему, то удаляясь от него. Пространственный заряд, образуемый нерезонансными ионами, постепенно рассеивается и рекомбинирует на пластинах диэлектрика.

Развертку масс-спектра в омегатроне получают изменением частоты высокочастотного напряжения. Резонансная частота, МГц, связана с массовым числом иона соотношением

$$f = \frac{15,3B}{M_i / z_i}.$$

Разрешающая способность омегатрона обратно пропорциональна массе иона  $m_i$ :

$$\rho = \frac{eB^2 r_0}{2Em_i},$$

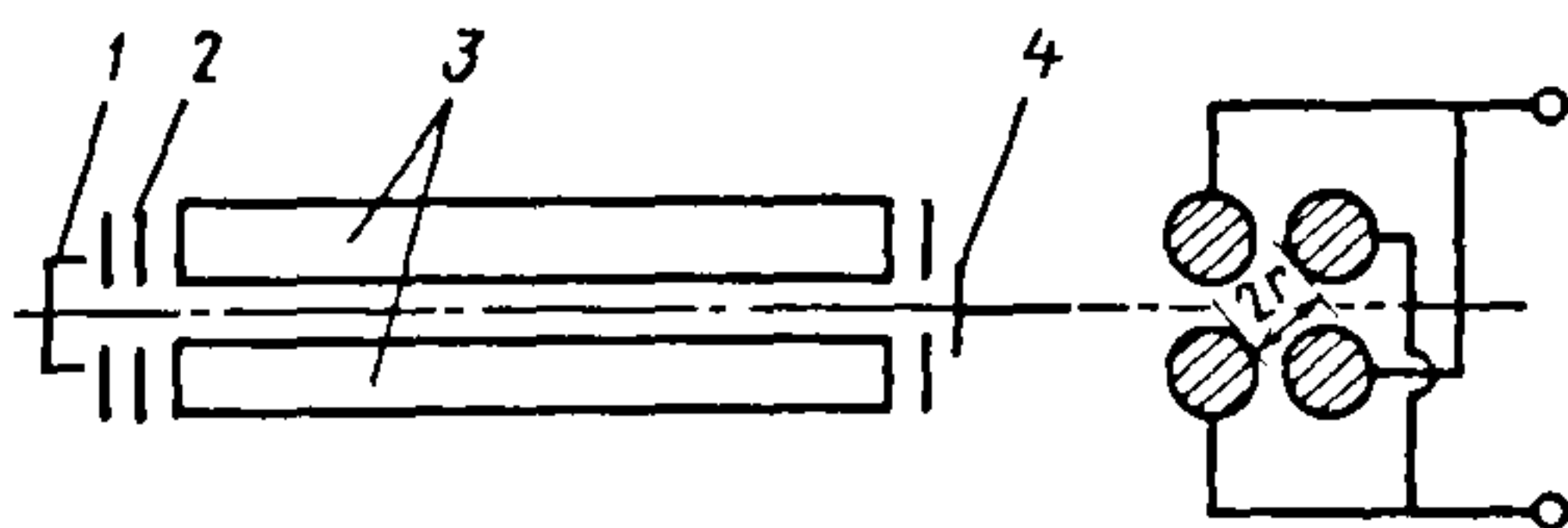


Рис. 15.4. Принципиальная схема анализатора квадрупольного масс-спектрометра

где  $r_0$  — расстояние от коллектора ионов до оси электронного пучка.

С увеличением массового числа разрешающая способность уменьшается, поэтому омегатрон может анализировать с достаточной точностью только легкие газы.

Квадрупольный масс-спектрометр обладает высокими разрешающей способностью и чувствительностью. Его преимущество — отсутствие магнитных полей. Принципиальная схема анализатора (без корпуса) приведена на рис 15.4.

Исследуемый газ ионизируется пучком электронов, эмитируемых катодом накала и проходящих к коллектору электронов в коробке ионизатора 1. Из ионизатора ионы поступают через диафрагму 2 в анализатор, представляющий собой высокочастотный электрический квадруполь, образованный четырьмя параллельными стержнями (электродами) 3 круглого сечения.

Противолежщие электроды попарно соединены, и между ними приложено высокочастотное напряжение  $U_+ + U_- \cos(\omega t)$ , где  $U_+$  и  $U_-$  — напряжение соответственно постоянного и переменного тока. Ион, движущийся вдоль оси стержней, раскачивается высокочастотным полем. Амплитуда колебаний ионов зависит от их массовых чисел и напряжений на стержнях.

Траектории ионов могут быть устойчивыми и неустойчивыми. Ионы с устойчивыми траекториями (амплитуда их колебаний меньше расстояния  $r_0$  от центральной оси квадруполя до стержня) проходят через анализатор и попадают на коллектор 4, создавая в цепи коллектора ток, сила которого пропорциональна парциальному давлению.

По мере продвижения ионов с неустойчивыми траекториями вдоль анализатора амплитуда их увеличивается. Сталкиваясь с электродами, ионы нейтрализуются.

Для получения развертки масс-спектра изменяют напряжения на элект-



тродах ионизатора. Массовые числа ионов, имеющих устойчивые траектории, связаны с параметрами поля соотношением

$$M_i / z_i = 1,39 \cdot 10^{-5} U_- / (f^2 r_0^2),$$

где  $f$  – частота, МГц.

Разрешающая способность квадрупольного масс-спектрометра

$$\rho = 0,75 / (1 - \gamma / \gamma_{\max}),$$

где  $\gamma = U / U_-$  – отношение, определяющее диапазон масс ионов с устойчивыми траекториями  $\gamma_{\max} = 0,168$ .

Точность определения  $\gamma$  должна быть очень высокой, поскольку эта характеристика определяет разрешающую способность масс-спектрометра.

Монополярный масс-спектрометр представляет собой модификацию квадрупольного, его преобразователь – один квадрант квадруполь (рис. 15.5). Преобразователь состоит из круглого стержня 1 и угловой пластины 2, которая находится под потенциалом земли. На стержень 1 подается высокочастотное напряжение  $U_- + U_- \cos(\omega t)$ .

Ионы из источника проходят в зазор между электродами. Для ионов, проходящих через монополярный анализатор,

$$M_i / z_i = 9,8 \cdot 10^{-6} U_- / (q r_0^2 f^2),$$

где  $q$  – параметр, в первом приближении равный  $4\gamma$  (для монополярных масс-спектрометров  $\gamma = 0,5 \dots 1,4$ ).

Разрешающая способность монополярного масс-спектрометра

$$\rho = \frac{q^2 L^2 f^2 M_i}{4 U_{\text{уск}} z_i},$$

где  $L$  – длина анализатора, м;  $U_{\text{уск}}$  – ускоряющее напряжение ионов в источнике, В.

Времяпролетный масс-спектрометр (хронотрон) – рис. 15.6 – является наиболее быстродействующим. Камера ионизации 3 имеет катод накала 1, управляющий электрод 2 и коллектор 5 ионов. В ионном источнике длительность ионизирующего электронного импульса порядка 0,1 мкс. После прекращения ионизации образовавшиеся ионы выталкиваются в ускоряющую

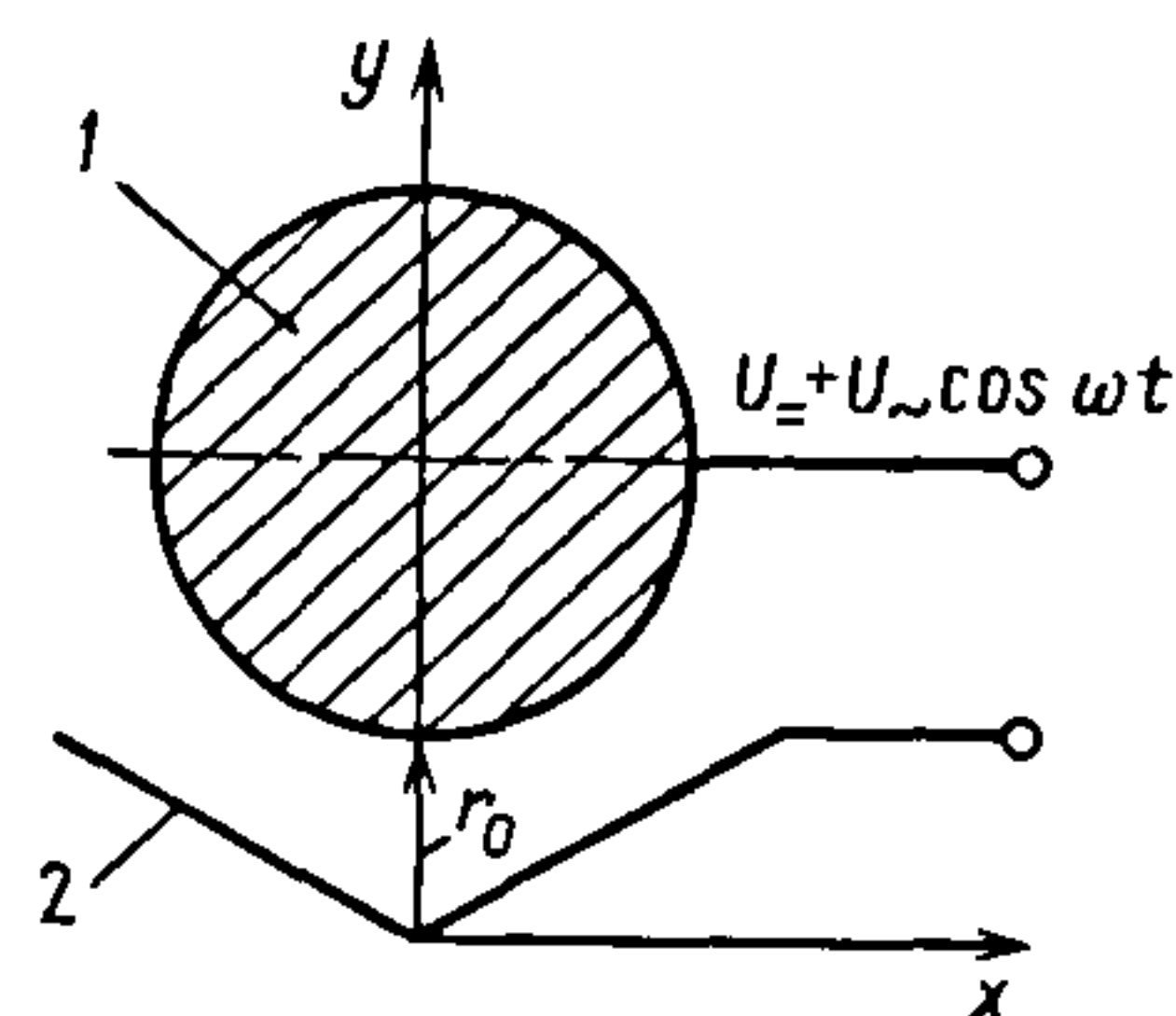


Рис. 15.5. Принципиальная схема анализатора монополярного масс-спектрометра

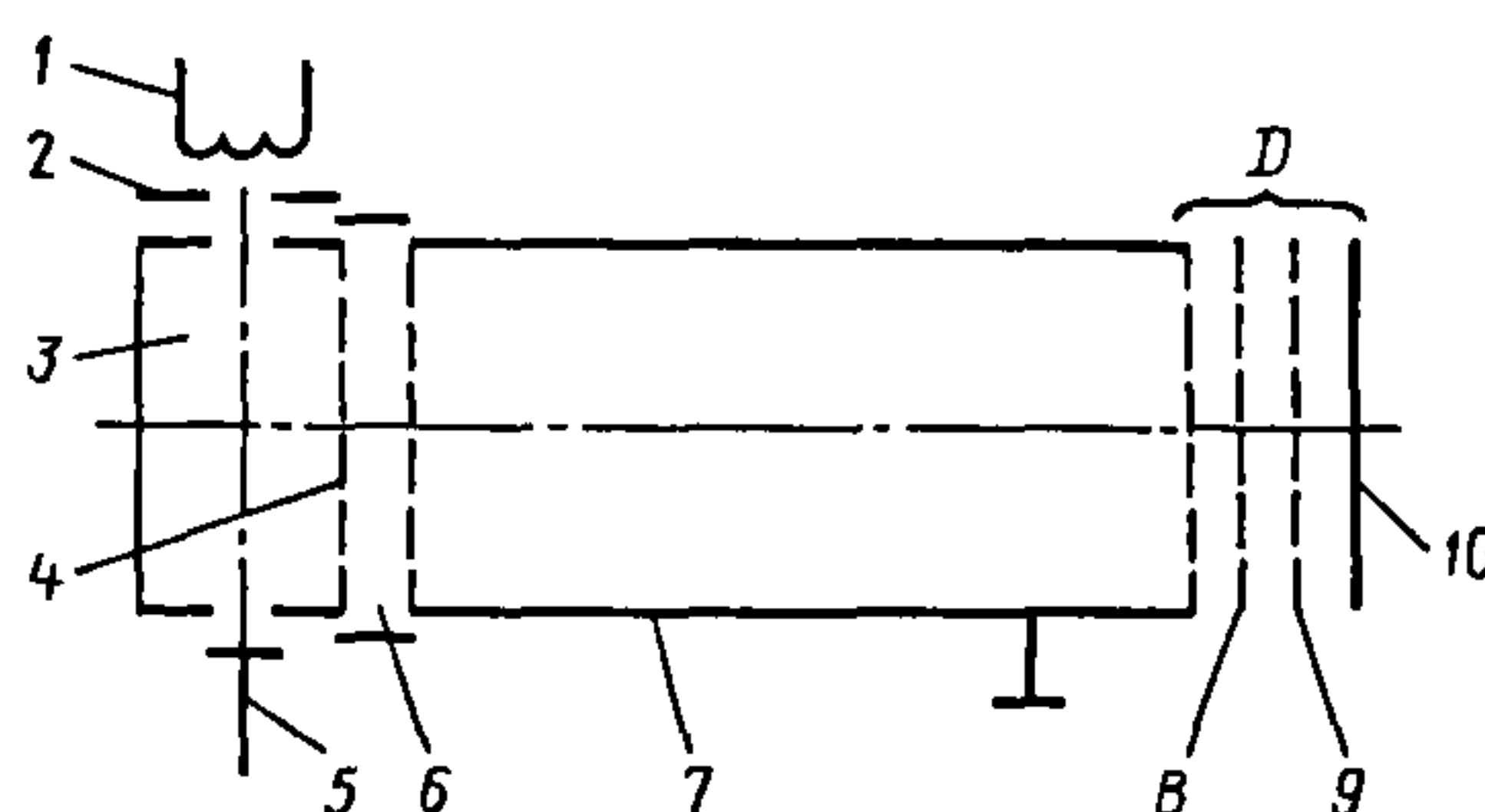


Рис. 15.6. Принципиальная схема анализатора времяпролетного масс-спектрометра

камеру 6 при подаче на выталкивающий электрод 4 импульса напряжения той же длительности.

Под действием ускоряющего напряжения  $U_{\text{уск}}$  ионы приобретают одинаковые энергии. Анализатором ионов служит камера дрейфа 7, свободная от полей. В ней ионы по инерции движутся к коллектору 10. Скорость движения отдельных ионов зависит от их энергий и массовых чисел, поэтому при пролете от источника до коллектора ионы разделяются на группы в соответствии с их массовыми числами. Время пролета ионов от источника до детектора  $D$

$$t_i = L_d \sqrt{\frac{m_i}{2 z_i e U_{\text{уск}}}},$$

где  $L_d$  – длина камеры дрейфа.

Попав на коллектор, группы ионов создают в его цепи ток, сила которого пропорциональна парциальному давлению. Перед коллектором ионов обычно

устанавливают систему сеток, ближайшая из которых к коллектору 9 является антидинатронной. Супрессорная сетка 8 не пропускает на коллектор ионы рассеяния, энергия которых меньше энергии ионов в пакете.

Разрешающая способность прибора

$$\rho = \frac{0,5t_i}{\Delta t_i},$$

где  $\Delta t_i$  – временная характеристика ионного пакета с отношением  $M_i/z_i$ , определяемая пространственной шириной пакета, разбросом начальных скоростей ионов, влиянием поля объемного заряда пакетов ионов и др.

Преимущество радиочастотного масс-спектрометра (рис. 15.7) – отсутствие ограничения площадей поперечных сечений ионного пучка и выходного отверстия.

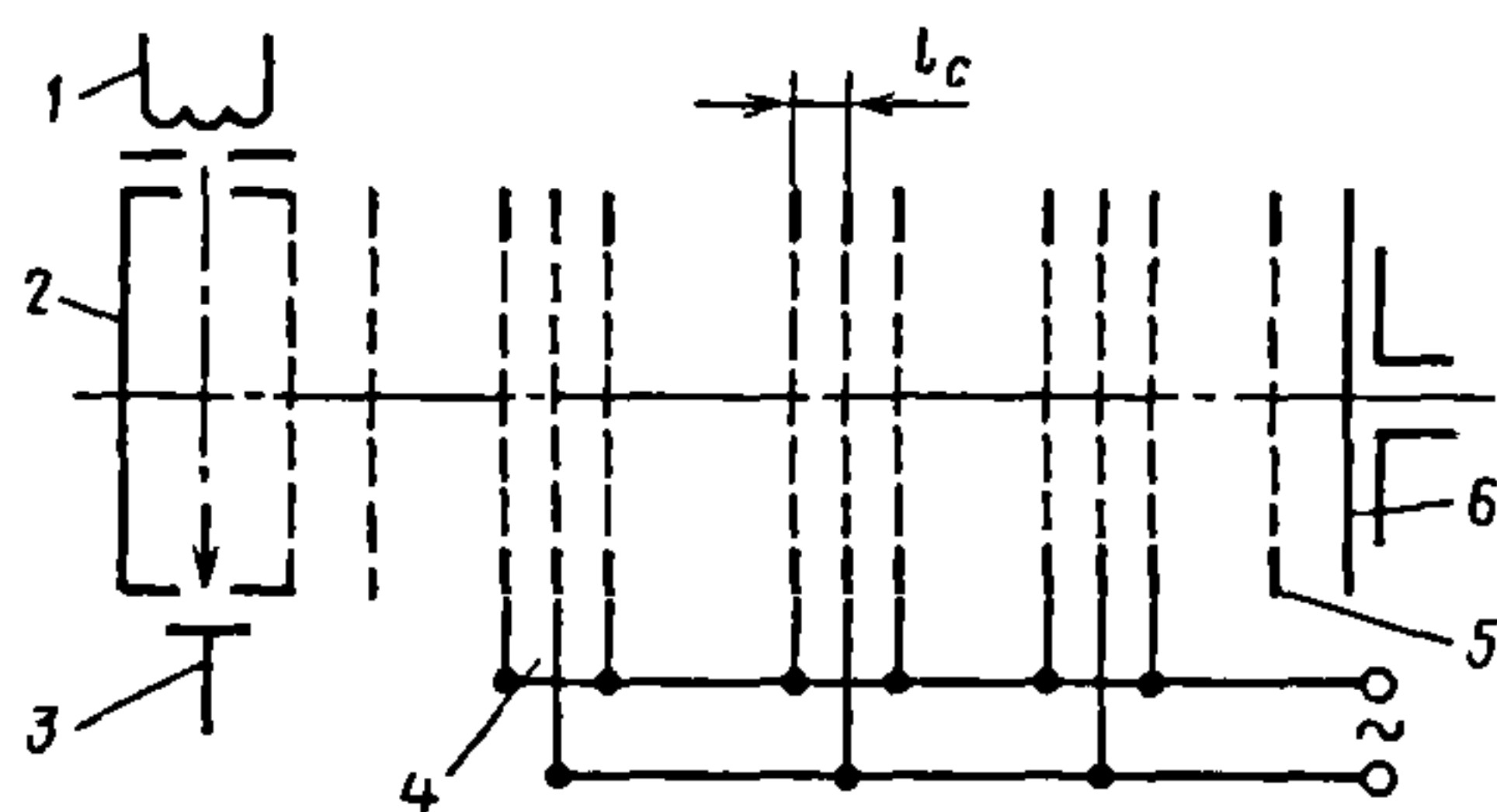


Рис. 15.7. Принципиальная схема анализатора радиочастотного масс-спектрометра

Электроны, эмитированные катодом накала 1, ионизируют газ в камере 2 и попадают на коллектор 3 электронов. Ионы ускоряются напряжением  $U_{\text{уск}}$  в направлении анализатора масс-спектрометра, который представляет собой несколько трехсетчатых каскадов 4, расположенных на определенном расстоянии один от другого.

Между крайней и центральной сетками каждого каскада приложено высокочастотное напряжение, в зависимости от которого часть ионов при движении получает энергию и соответствующее дополнительное ускорение, а другая часть отдает энергию и тормозится. Перед коллектором 6 ионов установлены тормозящие сетки 5, через которые проходят только ионы с максимальной энергией. Сила тока коллектора пропорциональна парциальному давлению. Массовое число ионов, получающих максимальный прирост энергии, связано с параметрами анализатора соотношением

$$\frac{M}{z_i} = \frac{KU_{\text{уск}}}{l_c^2 f^2},$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $l_c$  – расстояние между сетками в каскаде.

Для получения развертки масс-спектра в радиочастотном масс-спектрометре изменяют ускоряющее напряжение или частоту.



## Глава 16

# ИСПЫТАНИЯ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

---

### 16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Испытания на герметичность проводят для определения степени герметичности вакуумной аппаратуры (установок) и их элементов, а также выявления отдельных течей (течеискание).

Методы течеискания относятся к методам контроля пробными веществами и основаны на регистрации протекающих через течи пробных веществ. В зависимости от рода пробного вещества методы испытаний на герметичность подразделяют на две группы: *газовые* и *жидкостные*.

Метод испытаний выбирают в зависимости от назначения изделий, их конструктивно-технологических особенностей, требований к степени герметичности, а также технико-экономических характеристик испытаний. При этом метод должен обеспечивать проведение испытаний в условиях, соответствующих действующим на предприятии требованиям к технике безопасности и промышленной санитарии.

Степень герметичности вакуумных систем и их элементов характеризуется потоком воздуха через все имеющиеся в них течи (через суммарную течь), выявленным при испытаниях и приведенным к нормальным условиям. Если при испытаниях натекание или утечка не зафиксиро-

ваны, можно утверждать, что вакуумная система или ее элементы герметичны в пределах порога чувствительности проведенных испытаний. Для определения степени негерметичности нормальными считают условия перетекания воздуха при температуре  $(295 \pm 5)$  К из атмосферы в объем, откачанный до давления  $< 10$  Па, при атмосферном давлении  $(10^5 \pm 4 \cdot 10^3)$  Па.

Для систем, находящихся под постоянной откачкой, параметрами, определяющими герметичность, являются необходимое равновесное давление и эффективная быстрота откачки. Для изолированных вакуумных систем требования к герметичности определяются их объемом и допускаемым возрастанием давления во времени.

В связи с неопределенностью размеров и формы течей для оценки потоков через них следует применять моделирование: течи типа пор представляют в виде прямых каналов круглого сечения, течи типа щелей и трещин – в форме каналов прямоугольного сечения.

Режим перетекания газов через течи в вакуумных системах в зависимости от размеров и формы течей, природы газа, температуры и среднего давления в канале течей может быть молекулярным, вязкостным и молекулярно-вязкостным.

Поток следует рассчитывать по следующим формулам:

для молекулярного течения через канал круглого сечения

$$Q_{м.к} = \frac{2\pi r^3}{3l} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \cdot (p_1 - p_2) = \frac{2\pi r^3 \bar{v}}{3l} (p_1 - p_2); \quad (16.1)$$

для молекулярного течения через канал щелевидного сечения:

$$Q_{м.щ} = \frac{2hb^2}{3l} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} (p_1 - p_2) = \frac{2hb^2 \bar{v}}{3l} (p_1 - p_2); \quad (16.2)$$

для вязкостного течения через канал круглого сечения

$$Q_{вз.к} = \frac{\pi r^4}{16\eta l} (p_1^2 - p_2^2); \quad (16.3)$$

для вязкостного течения через канал щелевидного сечения

$$Q_{вз.щ} = \frac{hb^3}{24\eta l} (p_1^2 - p_2^2). \quad (16.4)$$

В формулах (16.1)–(16.4):  $Q$  – поток, Па·м<sup>3</sup>/с;  $r$  – радиус канала круглого сечения, м;  $l$  – длина канала, м;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К;  $M$  – молярная масса газа, кг/моль;  $p_1$  и  $p_2$  – давление соответственно на входе в канал и выходе из него, Па;  $\bar{v}$  – средняя тепловая скорость движения молекул газа, м/с;  $h$  и  $b$  – длинная и короткая стороны щелевидного сечения, м;  $\eta$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

Для молекулярно-вязкостного течения через каналы круглого и щелевидного сечений можно рекомендовать упрощенную формулу

$$Q = Q_{вз} + Q_{м}. \quad (16.5)$$

Если известен поток через течь в нормальных условиях, то поток через течь

в условиях, отличных от нормальных, определяют по следующим формулам: при вязкостном режиме течения

$$B_{вз} = Q_{вз} \frac{\eta_{п}}{\eta_{в}} \frac{p_a^2}{p_1^2 - p_2^2}. \quad (16.6)$$

При молекулярном режиме течения

$$B_{м} = Q_{м} \sqrt{\frac{M_{п}}{M_{в}}} \cdot \frac{p_a}{p_1 - p_2}, \quad (16.7)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление, Па; индексы «п» и «в» соответствуют произвольному газу и воздуху.

Соотношение между определяющим размером канала течи и потоком через нее в общем случае молекулярно-вязкостного режима течения характеризует зависимость (рис. 16.1), построенную с использованием выражений для безразмерного потока и безразмерного радиуса (или «раскрытия» щели). Основные исходные уравнения имеют вид

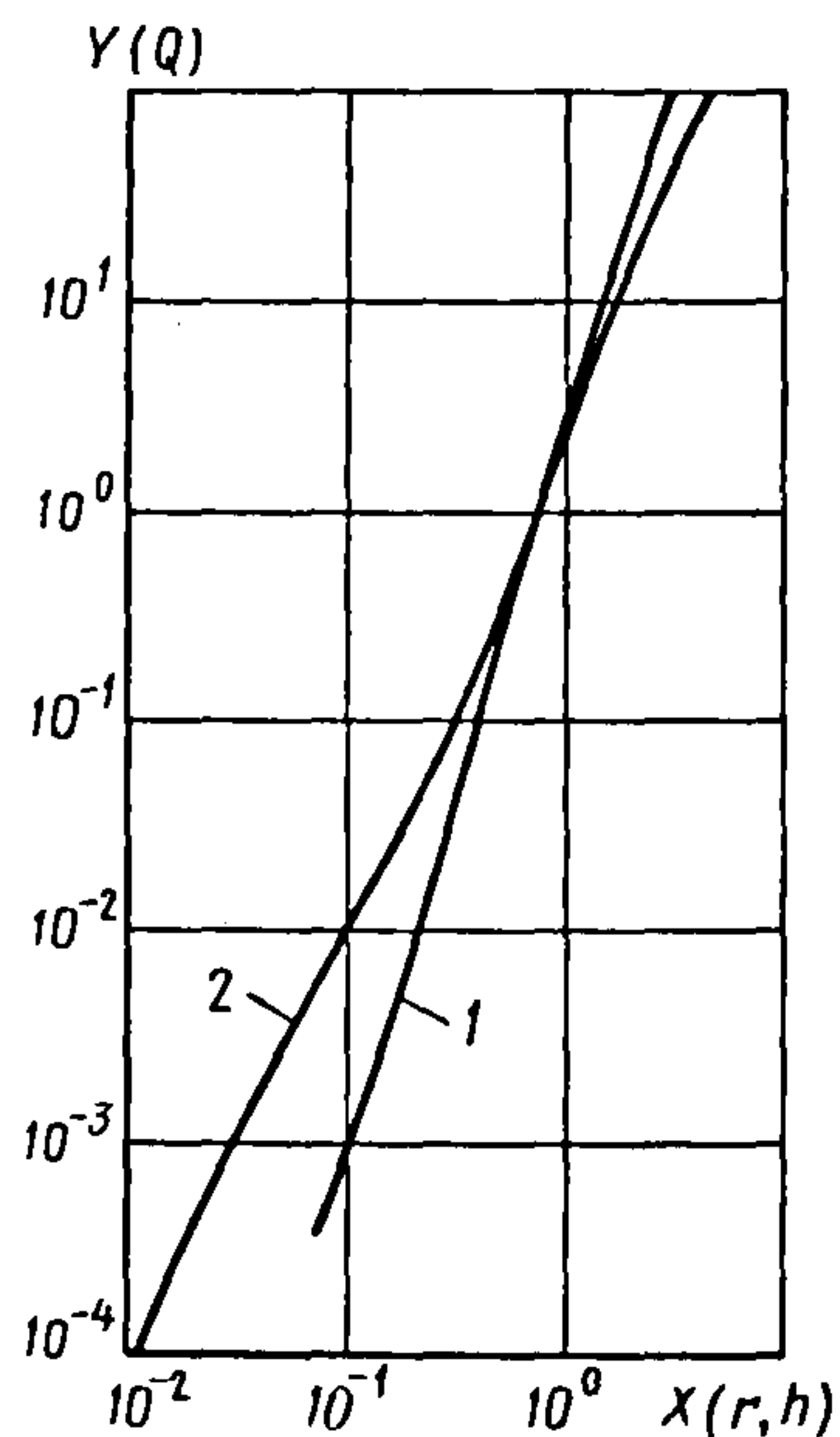


Рис. 16.1. Зависимость  $Y(Q)$  от  $X(r, h)$  для каналов круглого сечения (кривая 1) и щелевидных (кривая 2)



$$\left. \begin{aligned} Q_k &= \alpha_k r^4 + \beta_k r^3; \\ Q_{щ} &= \alpha_{щ} b^3 + \beta_{щ} b^2, \end{aligned} \right\} \quad (16.8)$$

$$\text{где } \alpha_k = \frac{\pi(p_1^2 - p_2^2)}{16\eta l}; \quad \alpha_{щ} = \frac{h(p_1^2 - p_2^2)}{24\eta l};$$

$$\beta_k = \frac{2\pi}{3l} \bar{v}(p_1 - p_2); \quad \beta_{щ} = \frac{2h}{3l} \bar{v}(p_1 - p_2).$$

Для каналов круглого и щелевидного сечений:

безразмерный поток

$$Y_k = Q_k \alpha_k^3 / \beta_k^4; \quad Y_{щ} = Q_{щ} \alpha_{щ}^2 / \beta_{щ}^3; \quad (16.9)$$

относительный определяющий размер

$$X_k = r \alpha_k / \beta_k; \quad X_{щ} = b \alpha_{щ} / \beta_{щ}. \quad (16.10)$$

В табл. 16.1 приведены данные к определению потока  $V$  газа через течь в

**16.1. Данные к определению потока  $V$  газа через течь в молекулярно-вязкостном режиме**

$z$	$r, \text{ м}$	$b, \text{ м}$
$1,3 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-10}$
$6,7 \cdot 10^{-12}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$
$1,3 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$
$6,7 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
$1,3 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
$6,7 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$
$1,3 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$
$6,7 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
$1,3 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$
$6,7 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$
$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
$6,7 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$
$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$
$6,7 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-6}$
$6,7 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
0,1	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
0,67	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
1,3	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$

молекулярно-вязкостном режиме при различных определяющих размерах  $r$  круглого канала или  $b$  (при различных  $h/l$ ) щелевидного канала.

Соотношения между потоком газа через течь и ее определяющими размерами при заданных значениях  $l$  и  $l/h$  (при  $l \gg r, h$ ):  $z = Bl$  для круглого канала радиусом  $r$ ;  $z = Bl/h$  для трещин с раскрытием  $b$ .

Верхней границей существования молекулярного режима течения ориентировочно можно считать: для круглых течей  $10^{-8}$  Па·м<sup>3</sup>/с, для щелевидных  $10^{-4}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Течение в нормальных условиях ориентировочно принимают чисто вязкостным при  $B_k \gg 10^{-4}$  Па·м<sup>3</sup>/с и  $B_{щ} \gg 1$  Па·м<sup>3</sup>/с.

Допускаемый поток натекания в систему:

при необходимости достижения равновесного давления  $p$  в процессе откачки с эффективной быстротой  $S_0$

$$Q_{\text{доп}} \leq k_3 p S_0 / n_k^2; \quad (16.11)$$

при ограничении измерения давления  $\Delta p$  в объеме  $V$ , изолируемом от откачной системы на время  $\Delta t$ ,

$$Q_{\text{доп}} \leq k_3 U \Delta p / \Delta t, \quad (16.12)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса по степени герметичности, вводимый для учета возможного влияния газовыделения на установившееся давление;  $n_k$  — критическая концентрация компонента в натекающей газовой смеси (при определяющей роли общего газового потока  $n_k = 1$ );  $U$  — проводимость системы.

Исходя из допускаемых потоков натекания в вакуумные системы, следует установить допускаемые потоки натекания их отдельных элементов, подлежащих независимой проверке.

Если возможны пористость отливок и наличие течей в листовом материале, из которого изготовлены оболочки проверяемых элементов, допускаемый поток

$$Q_{\text{доп.эл}} \leq Q_{\text{доп}} F_{\text{эл}} / F, \quad (16.13)$$

где  $F_{эл}$  и  $F$  – площади поверхностей соответственно элемента и вакуумной системы,  $m^2$ .

Если все течи находятся в разборных или сварных соединениях, то

$$Q_{доп.эл} \leq Q_{доп} l_{эл} / l, \quad (16.14)$$

где  $l_{эл}$  и  $l$  – длины сварных соединений соответственно элемента и системы, м.

В вакуумных системах, подлежащих контролю на герметичность, необходимо обеспечить доступ пробного газа ко всем поверхностям оболочек, отделяющим вакуумный объем от атмосферы; сварным швам; разборным и неразборным уплотнениям, а также предусмотреть возможность свободного прохождения пробного газа к контролируемым участкам поверхности и от них к теченскателю.

В сложных вакуумных системах предусматривают секционирование системы в процессе течеискания для быстрого нахождения участка с течью.

Конструкция вакуумной системы должна исключать образование внутренних течей, которые могут стать источниками длительного поступления воздуха в вакуумную систему, а также плохо откачиваемых полостей; в последних может задерживаться пробный газ, вызывающий повышенный уровень фоновой сигнала течеискателя. В местах явного образования полостей (например, за резьбовым соединением внутренних деталей, за их сопряжением и др.) следует предусматривать прорезы или проточки, обеспечивающие их эффективную откачку.

Вакуумную систему снабжают штуцерами, фланцами и другими деталями для присоединения вакуумных насосов, преобразователей вакуумметров и течеискателей (необходимых для контроля герметичности), а также вспомогательного оборудования (чехлов, вакуумных присосок, разъемных камер и др.).

При выборе режима испытаний следует иметь в виду, что в многослойных сварных швах возможно образование сложных течей Б с промежуточными по-

лостями А, увеличивающими время прохождения пробного газа (рис. 16.2, а). Возможно также образование внутренних течей В в полость за первым герметизирующим швом. Испытание многослойных швов упрощается, если они выполнены со сквозными, по возможности секционированными каналами Г за герметизирующим швом (рис. 16.2, б).

Выведенные через штуцера секции такого канала можно откачивать, контролируя изменение давления в вакуумной системе, или продувать через них пробный газ. Варианты выполнения швов со сквозными каналами приведены на рис. 16.2, б и в.

Перед испытанием вакуумных систем и их элементов, длительное время хранившихся на воздухе, необходимо подготовить их к испытаниям – освободить течи от влаги. Для удаления воды из течей с потоком натекания  $< 10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>/с систему прогревают в условиях вакуума при температуре  $> 623$  К. Поверхности

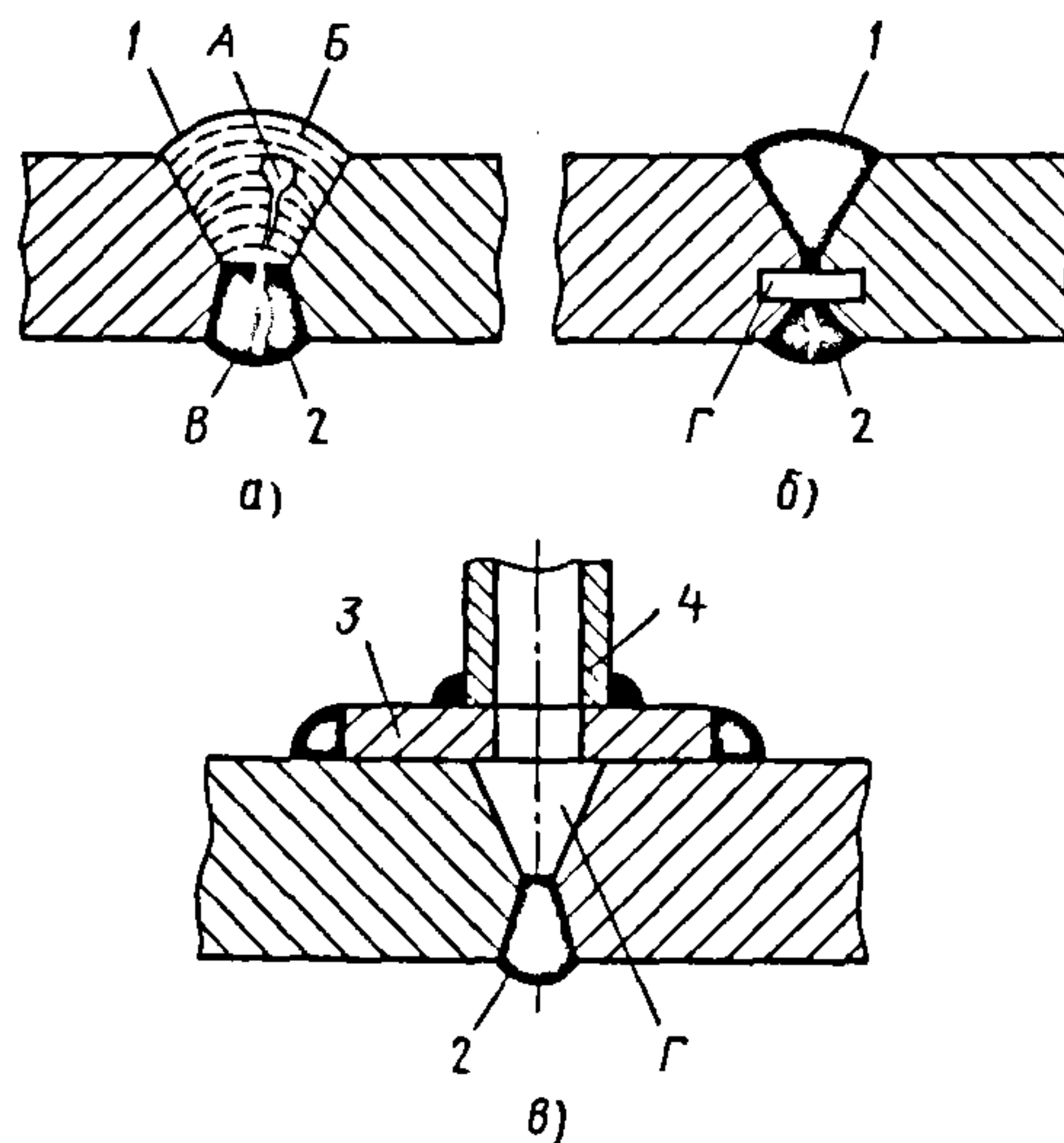


Рис. 16.2. Многослойные сварные швы:

а – с течью; б – со сквозным швом; в – со сквозным каналом и штуцером; 1 – силовые слои шва; 2 – герметизирующие слои шва; 3 – дополнительная планка или обечайка; 4 – штуцер



непрогреваемых вакуумных систем следует промывать летучей жидкостью с малым поверхностным напряжением, например ацетоном, с последующим прогревом. Из течей с потоком натекания  $> 10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>/с воду удаляют в процессе откачки (без прогрева).

Перед испытаниями на герметичность поверхность оборудования должна быть тщательно промыта и обезжирена растворителями, рекомендуемыми для вакуумных систем, и просушена для освобождения каналов течей от растворителей.

Если программой испытаний предусмотрены испытания на вибростенде или испытания на прочность (сжатие, растяжение, тепловые удары, неравномерные нагрев, охлаждение и др.), проверка на герметичность должна быть заключительным этапом испытаний.

Испытания следует проводить в три этапа, каждый раз выбирая метод и способ, позволяющие решать конкретную задачу этапа. Цель первого этапа (предварительных испытаний) – оценка общей герметичности испытуемого объекта, второго – поиск течей, который проводят при установлении факта негерметичности, третьего (заключительного) – проверка соответствия степени герметичности вакуумной системы техническим требованиям (выполняют при испытаниях вакуумных систем или сборочных единиц).

Этап поиска течей рекомендуется разбивать на два подэтапа:

- выделения негерметичных участков контролируемой вакуумной системы с помощью чехлов, охватывающих отдельные участки системы, или секционированием вакуумной системы с поочередной подачей пробного газа на отдельные участки (для обеспечения оперативности испытаний крупногабаритных систем выделенный негерметичный участок желательно разделить на более мелкие для локализации течей; при этом сокращается время испытаний и снижается вероятность пропуска течей);

- уточнения места расположения течей обдувом тонкой струей или с помощью щупа.

После устранения выявленных течей описанную часть испытаний повторяют до тех пор, пока на предварительных испытаниях не будет установлено, что система герметична.

Классификация основных методов контроля герметичности вакуумных систем и их элементов, а также способов испытаний приведена в табл. 16.2.

Основные параметры течеискателей, находящихся в эксплуатации по настоящее время, приведены в табл. 16.3. В табл. 16.4–16.5 даны характеристики современных отечественных и зарубежных гелиевых и галоидных течеискателей.

## 16.2. Классификация методов контроля на герметичность и способов испытаний

Метод		Этап испытаний	Область применения
контроля	испытаний		
Манометрический	–	Первый – третий	Все виды испытаний вакуумных систем
Масс-спектрометрический	С использованием вакуумных присосок	Второй	Поиск течей в незамкнутых или газонаполненных элементах вакуумных систем
	Накопление в вакууме	Третий	Контроль малогабаритных вакуумных систем и их элементов
	Обдув; применение гелиевых чехлов (камер)	Первый – третий	Испытания непрерывно откачиваемых объектов
	Использование барокамеры	Первый, третий	Испытания элементов вакуумных систем, работающих при избыточном давлении

Окончание табл. 16.2

Метод		Этап испытаний	Область применения
контроля	испытаний		
Масс-спектрометрический	Накопление пробного газа в атмосферном чехле	Первый – третий	Испытания газонаполненных или незамкнутых элементов при невозможности проведения вакуумных испытаний
	Применение щупа	Второй, третий	При использовании способа накопления при атмосферном давлении
Катарометрический	Использование щупа и опрессовка объекта	Второй	Контроль газонаполненных систем и элементов
Аммиачный			Контроль вакуумных систем с низкими требованиями к степени герметичности
Галогенный	–	Первый, второй	Контроль герметичности вакуумных систем со стеклянными элементами
Высокочастотного разряда		Первый	Контроль систем, работающих при избыточном давлении
Пузырьковый		Второй	Поиск места течи; определение структуры течей в элементах вакуумных систем
Люминесцентный и цветной			

## 16.3. Основные параметры советских течеискателей, эксплуатируемых до сих пор

Тип прибора	Принцип действия	Порог чувствительности (по пробному газу), Па·м <sup>3</sup> /с	Пробный газ	Питание	Потребляемая мощность, Вт	Габаритные размеры, мм, не более	Масса, кг, не более
ПТИ-6	Масс-спектрометрический	$5 \cdot 10^{-11}$	Гелий	Трехфазная сеть; 220/380 В; 50 Гц	1100	600×780×1250	250
ПТИ-7 (ПТИ-7М)		$5 \cdot 10^{-12}$				1470×675×620	215
ПТИ-10		$5 \cdot 10^{-13}$				1245×550×1325	260
СТИ-8		$5 \cdot 10^{-15}$					
СТИ-11							
ГТИ-3 (ГТИ-3А)	Галогенный	$2 \cdot 10^{-7}$	Фреон и другие галогены	220 В; 50 Гц	230	315×230×300	9
ВАГТИ-4		$2 \cdot 10^{-7}^*$ ; $5 \cdot 10^{-9}^{**}$			180	388×245×300	18
БГТИ-5		$7 \cdot 10^{-7}$		12 аккумуляторов КНГК-10	–	286×203×135 (зарядное устройство); 296×293×135 (измерительный блок)	6
ГТИ-6		$10^{-7}^*$ ; $10^{-9}^{**}$		220 В; 50 Гц	75	360×160×200	10
ТП7101	Катарометрический	$2 \cdot 10^{-6}$	Гелий, фреон, диоксид углерода	127/220 В; 50 Гц	–	124×162×78 (стабилизатор) 164×136×62 (преобразователь)	3,5
И043-009	Искровой	–	–	220 В; 50 Гц	60	250×210×200	3

\* Для атмосферного преобразователя.

\*\* Для вакуумного преобразователя.



16.4. Характеристики современных гелиевых теченскаателей

Тип прибора	Порог чувствительности, Па·м <sup>3</sup> /с	Скорость форвакуумной откачки, м <sup>3</sup> /ч	Время выхода на режим после включения, мин	Время отклика, с	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Модели для поиска течи с мощностью щупа	ASM 142 S (Alcatel, Франция)	—	< 3	< 1	550×345×430	56
	ASM 102 S	—		0,3	480×440×165	21
Портативные гелиевые теченскаатели	ASM 122 D (безмасляный)	1,6	< 5	—	510×343×428	56
	ASM 142 D	1			550×345×430	45
	ASM 142	10			430×295×370	Теченскаателя 29; транспортной тележки 21
	ASM 182 TD+	25			600×450×460	96
Безмасляные теченскаатели	ASM 192 T2D+	50	—	0,3	660×730×885	185
	ASM 180 T	20			600×410×450	80
	ASM 181 T	40			600×730×885	125
	ASM 181 T2	—			—	155
Мощные высокочувствительные гелиевые теченскаатели	ASM 1002 (тестовая станция)	20	—	0,3	690×930×1200	190
	—	—			Откачного модуля: 470×250×130	Откачного модуля: 10,7
	—	Дополительно требуется форвакуумный насос			Панели управления: 480×134×100	Панели управления: 2,9
	ASI 20 MD	5·10 <sup>-11</sup>			Блоков электроники: 480×134×300	Блоков электроники: 7,2

Продолжение табл. 16.4

Тип прибора	Порог чувствительности, Па·м <sup>3</sup> /с	Скорость форвакуумной откачки, м <sup>3</sup> /ч	Время выхода на режим после включения, мин	Время отклика, с	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Переносной гелиевый теченскатель	ТИЗ-1 «Гелин»	10 <sup>-7</sup>	10	5	301×252×170	5
	ПТИ-10	7·10 <sup>-13</sup>	15	1	1400×675×620	170
	ТИИ-22	10 <sup>-12</sup> ... 10 <sup>-1</sup>	5	< 1	580×672×1525 (с тележкой)	Без тележки: 60, с тележкой: 150
	ТИИ-20	7·10 <sup>-12</sup> ... 10 <sup>-2</sup>	5	1	580×672×1525	145
	ТИИ-30	< 7·10 <sup>-12</sup>	15	< 1	932×514×530	69
Гелиевый масс-спектрометрический теченскатель с турбомолекулярным насосом	ТИИ-14	7·10 <sup>-12</sup>	—	—	Вакуумной системы: 398×667×470 Регистрирующего устройства: 580×672×1525	Регистрирующего устройства: 20 Вакуумной системы: 75
	ТИИ-14М	7·10 <sup>-12</sup> ... 10 <sup>-1</sup>	5	—	580×672×1525	150
	«Varian 979» (США)	10 <sup>-3</sup> ... 10 <sup>-9</sup>	—	0,5	—	23 нетто — основной блок; 63 — на универсальной тележке с насосом 200 л/мин
Мобильные гелиевые масс-спектрометрические теченскатели	«Varian 959»	1·10 <sup>-9</sup>	дополнительно требуется форвакуумный насос	—	—	23 (без форвакуумного насоса)
	HelitTest GEN	—	—	—	—	—
	HelitTest CHEM (Varian, США)	5·10 <sup>-6</sup>	3	2	530×175×580 Диаметр: 255, высота: 255	20 12
Портативные гелиевые масс-спектрометрические теченскатели	990dCLDII (Varian, США)	—	—	—	—	—
Компонентные гелиевые масс-спектрометрические теченскатели	—	—	—	—	—	—



Окончание табл. 16.4

Тип прибора	Порог чувствительности, Па·м <sup>3</sup> /с	Скорость форвакуумной откачки, м <sup>3</sup> /ч	Время выхода на режим после включения, мин	Время отклика, с	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Стационарные автоматические гелиевые масс-спектрометрические течейскаатели	«Varian 947/948»	12	—	< 2	—	200
	«Varian 960»	1·10 <sup>-12</sup>				
Полиостю автоматический, компактный, переносной гелиевый течейскаатель (Shimadzu, Япония)	MSE-2000A. Предлагаются модификации с ротационным или безмасляным диафрагменным насосом	3,6	—	—	—	45
С использованием «детектора на основе ион-селективного насоса»	«Helling PDH-4» (Helling GMBH, Германия)	5·10 <sup>-7</sup>	3	2	170×136×290	2,6

16.5. Характеристики современных галоидных течейскаателей

Модель	Чувствительность, м <sup>3</sup> ·Па/с	Постоянная времени, с	Размеры, мм	Масса, кг
GAS CHECK R	1·10 <sup>-9</sup>	1	380×60×50	0,55
ПЕ-ХТРА, ПТЕ-ХТВА (ПТЕ, Бельгия)	< 14 г в год (0/5oz) для всех хладагентов, предельная: < 3 г в год (0,1 oz) для всех галоидных хладагентов		229×65×65	
БГТИ-7 БГТИ-7/1	(2,6...5,3)10 <sup>-7</sup>	< 3	Регистрирующего устройства в футляре 190×330×350; выносного шупа 51×134×173	Регистрирующего устройства в футляре 12,7; выносного шупа 0,7
ГТИ-6	(0,9...1,6)10 <sup>-7</sup>	< 1,5	Регистрирующего блока 390×240×220; выносного шупа 218×150×46; вакуумного датчика 115×90	Регистрирующего блока 10; выносного шупа с кабелем 1,3; вакуумного датчика 1,2
ТИ2-8 ТИ2-8/1			Регистрирующего устройства в футляре 309×328×93; выносного шупа 211×150×46	Регистрирующего устройства 6,6; выносного шупа 1,3

## 16.2. МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

С помощью вакуумметра можно определить суммарный поток натекания через течи в систему и обнаружить места течей. Завышенные показания вакуумметра по сравнению с расчетными или полученными ранее свидетельствуют о наличии течей в системе, если при заливке жидкого азота в охлаждаемые ловушки давление практически не меняется.

Для выявления суммарного потока натекания через течи необходимо отсоединить испытываемую систему от средств откачки и по показаниям вакуумметра, снятым через определенные промежутки времени, построить зависимость (рис. 16.3, кривая 2) давления от времени, определяемую суммарным потоком газовыделения внутренними поверхностями системы и потоком натекания через течи. Суммарный поток зависит от угла наклона касательной 1 к кривой 2 в ее начальной точке, поток натекания — от угла наклона прямолинейного участка кривой 2 к оси абсцисс.

Для определения потока натекания следует:

- зафиксировать момент времени  $t$ , в который начинается близкое к линейному изменение давления (при этом устанавливается равновесный поток газовыделения и дальнейшее повышение давления в системе происходит только вследствие натекания через течи);

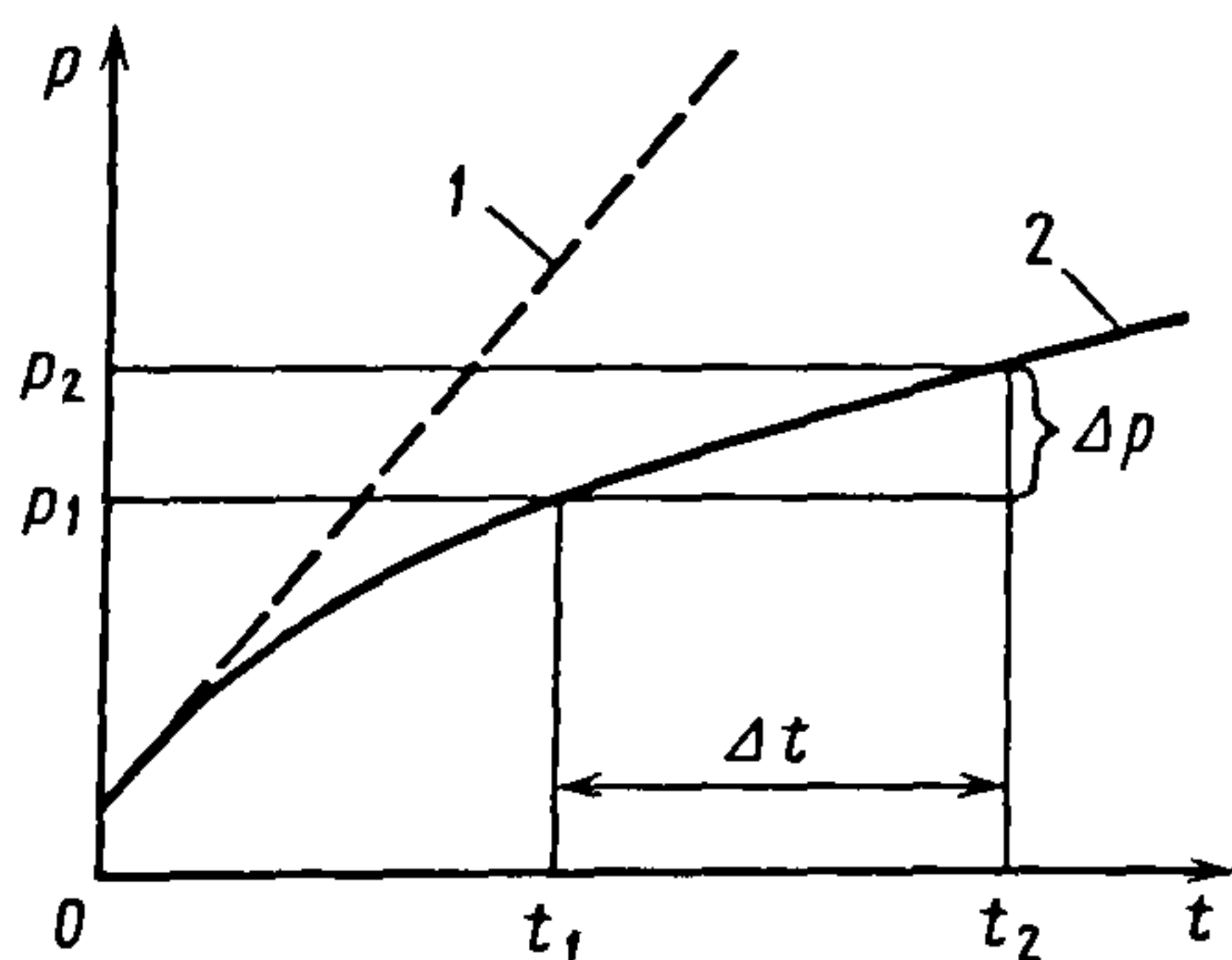


Рис. 16.3. Зависимость давления в изолированной вакуумной системе от времени

- измерить давление  $p_1$  в вакуумной системе, соответствующее моменту времени  $t_1$ ;

- выждать время наблюдения  $\Delta t$  и измерить давление  $p_2$ , отвечающее моменту времени  $t_2$ ;

- определить изменение давления  $\Delta p$  за время наблюдения  $\Delta t$  и суммарный поток натекания

$$Q = V \Delta p / \Delta t, \quad (16.15)$$

где  $V$  — объем проверяемой системы,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta t$  — время наблюдения, с.

В системах с большим газовыделением манометрический преобразователь целесообразно подсоединить через охлаждаемую ловушку, применение которой повышает эффективность поглощения продуктов газовыделения и позволяет уменьшить время выхода на линейный участок характеристики (см. рис. 16.3). При измерениях уровень жидкого азота в ловушке должен быть постоянным.

При испытаниях газонаполненных систем испытуемый элемент помещают в вакуумную камеру, в которую подают воздух под избыточным давлением. О степени негерметичности судят по изменению показаний манометрических преобразователей вакуумной камеры при известном изменении избыточного давления в элементе. Место течи определяют по изменению показаний вакуумметра при подаче на отдельные участки поверхности пробного вещества.

Наиболее чувствительны к течи неабсолютные манометрические преобразователи, показания которых зависят от рода газа. Для получения количественной оценки обнаруживаемых течей предварительной градуировкой манометрического преобразователя устанавливают его чувствительность по воздуху  $k_a$  и пробному газу  $k_n$ .

При работе с неабсолютным манометрическим преобразователем изменение его сигнала вследствие замены потока воздуха через течи потоком пробного ве-



щества может быть обусловлено тремя факторами:

- различными скоростями натекания воздуха и пробного вещества через течи;
- разными значениями быстроты откачки воздуха и пробного вещества насосами испытываемой системы;
- неодинаковыми чувствительностями манометрического преобразователя к воздуху и пробному веществу.

Рекомендуется использовать пробное вещество, по которому все три фактора действуют в одном направлении, вызывая увеличение или уменьшение показаний вакуумметра, т.е. чтобы удовлетворялось неравенство

$$k_n S_b Q_n / (k_n S_n Q_b) \gg 1 \quad (16.16)$$

или

$$k_n S_b Q_n / (k_n S_n Q_b) \ll 1, \quad (16.17)$$

где  $S_b$  и  $S_n$  – быстрота действия насоса при откачке соответственно воздуха и пробного вещества, м<sup>3</sup>/с;  $Q_b$  и  $Q_n$  – поток через течь соответственно воздуха и пробного вещества, Па·м<sup>3</sup>/с;  $k_b$  и  $k_n$  – коэффициенты чувствительности манометрических преобразователей соответственно к воздуху и пробному веществу, А/Па.

При использовании манометрического преобразователя с линейной характеристикой испытания второго этапа можно проводить с количественной оценкой обнаруживаемых течей. Для этого необходимо:

- снять показания  $p_1$  манометрического преобразователя, отградуированного по воздуху, до подачи пробного вещества на течь;
- обдуть пробным газом или смочить пробной жидкостью предполагаемые места течи и снять показания вакуумметра  $p_2$  при вновь установившемся давлении;
- определить изменение давления  $\Delta p = p_2 - p_1$  по воздушному эквиваленту и рассчитать поток газа через течь, вызвавший реакцию вакуумметра:

для молекулярного режима

$$B_m = v S_n \Delta p / (\delta v - \beta); \quad (16.18)$$

для вязкостного режима

$$B_{вз} = \xi S_n \Delta p / (\delta \xi - \beta), \quad (16.19)$$

где  $v = M_n/M_b$  – отношение молярных масс пробного вещества и воздуха;  $\delta = S_n/S_b$  – отношение эффективных быстрот действия по пробному веществу и воздуху;  $\beta = k_n/k_b$  – коэффициент относительной чувствительности манометрического преобразователя по пробному веществу;  $\xi = \eta_n/\eta_b$  – отношение динамических вязкостей пробного вещества и воздуха.

Если в испытываемой системе применено селективное средство откачки с  $S_n = 0$ , то обнаруженный поток газа через течь оценивают по формуле

$$B = V \Delta p_n / (\Delta t \beta), \quad (16.20)$$

где  $\Delta p_n$  – изменение давления пробного вещества за время  $\Delta t$ .

При испытании вакуумных систем жидкие пробные вещества рекомендуется применять лишь в тех случаях, когда требуется обнаружить поток газа через течь  $B \geq 10^{-5}$  Па·м<sup>3</sup>/с; в этом случае сигнал о течи больше, чем при работе с пробным газом.

Экспериментально установлено, что реакция вакуумметра на пары ацетона почти на три порядка превышает реакцию на гелий.

Манометрический метод испытания на герметичность широко применяют, так как практически в каждой вакуумной установке есть по крайней мере один из наиболее распространенных вакуумметров, который можно использовать для выявления и поиска течей. Это позволяет проводить испытания без применения дополнительного оборудования.

### 16.3. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Масс-спектрометрический метод основан на принципе ионизации газов и паров с последующим разделением образовавшихся ионов в магнитных и электрических полях. Этот метод наиболее чувствительный и универсальный. Разнообра-

ние объектов исследования по объему и рабочим характеристикам обуславливает разнообразие способов реализации метода: с применением обдува и гелиевых чехлов (камер), щупа, барокамеры, вакуумных присосок, метода накопления.

Перед началом испытаний масс-спектрометрические течеискатели градуируют с помощью диффузионной гелиевой течи типа «Гелит» в соответствии с инструкцией по эксплуатации, прилагаемой к каждому образцу течи. Градуировкой определяют цену деления шкалы выходного прибора течеискателя:

$$S_Q = Q_{He} / (\alpha_{He} - \alpha_{\phi}), \quad (16.21)$$

где  $Q_{He}$  – поток гелия от течи «Гелит»,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ ;  $\alpha_{He}$  – установившийся сигнал течеискателя при измерении гелиевой течи, мВ;  $\alpha_{\phi}$  – сигнал течеискателя, обусловленный фоном гелия, мВ.

Предельные возможности течеискателя характеризуются порогом чувствительности, т.е. минимальным потоком пробного газа, регистрируемым течеискателем:

$$Q_{\min} = 2\Delta\alpha_{\phi} S_Q, \quad (16.22)$$

где  $\Delta\alpha_{\phi}$  – минимальная амплитуда флуктуаций фонового сигнала, мВ.

Вакуумные системы и отдельные элементы испытывают по одной из трех схем, показанных на рис. 16.4, в зависимости от суммарного газового потока  $Q_{\Sigma}$ ,

предварительно рассчитанного или найденного экспериментально. По первому варианту (рис. 16.4, а), как правило, испытывают отдельные элементы вакуумных систем, суммарный газовый поток которых не превышает предельно допускаемого потока течеискателя  $Q_{\text{доп}}$ .

Вспомогательный механический насос 4 отключают сразу после достижения форвакуума в системе и соединительных коммуникациях. Если суммарный газовый поток  $Q_{\Sigma}$  проверяемого элемента превышает предельно допускаемый поток течеискателя  $Q_{\text{доп}}$ , испытания проводят с работающим механическим насосом. Дроссельный клапан 2 течеискателя 3 открывается до получения максимально допускаемого давления в анализаторе  $p_{\text{доп}} = 0,02 \text{ Па}$ .

Минимальные размеры обнаруживаемой течи при испытании со вспомогательным механическим насосом зависят от давления в проверяемом элементе, предельного остаточного давления механического насоса и уровня фонового сигнала, определяемого противодиффузией гелия из окружающей атмосферы через механический насос. Проверяемый элемент присоединяют к входному фланцу течеискателя непосредственно или с помощью соединительных трубок с достаточно высокой проводимостью по гелию ( $\geq 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

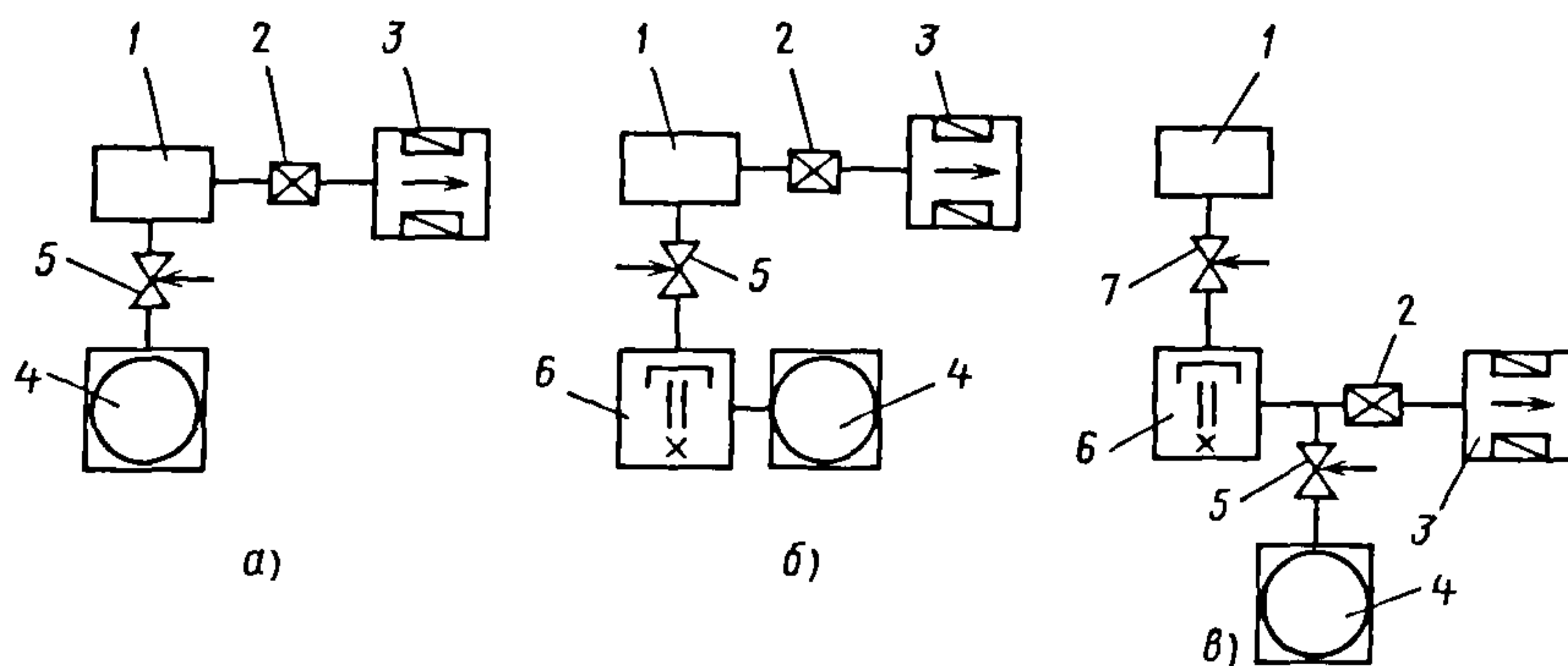


Рис. 16.4. Схемы испытаний на герметичность:

1 – испытуемая система; 2 – дроссельный клапан; 3 – течеискатель;  
4 – вспомогательный механический насос; 5, 7 – клапаны; 6 – пароструйный насос



Применение второго варианта (рис. 16.4, б) целесообразно в двух случаях: при испытаниях элементов вакуумной системы или объемов с большими потоками газовой выделения и натекания, когда объем отбираемого в течеискатель газа достаточен для создания в анализаторе предельно допускаемого давления  $p_{\text{доп}}$  при соединении течеискателя с высоковакуумной системой; при большом и нестабильном фоновом сигнале, создаваемом механическим насосом (если этот сигнал нельзя устранить).

Схема, приведенная на рис. 16.4, в, позволяет получить наиболее высокую чувствительность в широких пределах изменения объема, различных потоках газовой выделения проверяемыми элементами и системами в целом, а также при разной длительности подачи гелия. Схема обеспечивает возможность максимального отбора газа в течеискатель, малое время установления сигнала и, следовательно, наибольшую чувствительность (если поступление газов из форвакуумной линии приводит к увеличению фонового сигнала).

До тех пор пока через течеискатель проходит предельно допускаемый поток, минимальные размеры обнаруживаемой течи не зависят от числа параллельных линий откачки и лимитируются суммарным газовым потоком испытываемой вакуумной системы. Чувствительность максимальна в условиях, когда весь газовый поток линии, к которой подсоединен течеискатель, меньше или равен максимально допускаемому потоку через течеискатель, а механический насос этой линии отключен. При испытании больших объемов следует сводить к минимуму объем форвакуумной линии, к которой присоединен течеискатель, а также применять пароструйные насосы с большой скоростью действия.

Испытания на герметичность вакуумных систем можно проводить посредством масс-спектрометрических анализаторов парциального давления, устанавливаемых наряду с манометрическими преобразователями на высоковакуумных сис-

темах. С их помощью можно оценить общую степень негерметичности по содержанию кислорода в остаточных газах системы. Места течей определяют по изменению пиков масс-спектра, соответствующих выбранному пробному газу. Наименьшие размеры обнаруживаемой течи при таких испытаниях сравнительно велики вследствие значительной скорости действия пароструйных насосов. В качестве пробных веществ целесообразно использовать аргон и гелий.

Способы обдува и гелиевых чехлов (камер) применяют при испытаниях непрерывно откачиваемых вакуумных систем: первый – для обнаружения мест течей, второй – для определения степени негерметичности оболочки проверяемой системы или ее элемента, оперативного выявления негерметичных участков и течей сложной конфигурации, повышения чувствительности испытаний систем с большой постоянной времени откачки.

Гелиевую камеру обычно используют для испытаний малогабаритных систем; при контроле крупногабаритных систем камеру можно заменить полиэтиленовым чехлом. Способ гелиевых чехлов или камер дает более объективные и точные результаты (поток натекания – через течи), чем способ обдува. При обдуве больше сказывается разбавление гелия воздухом, временные характеристики течей и испытаний, невозможность выявления течей из-за быстрого перемещения обдувателя над отдельными участками испытываемой поверхности или случайного пропуска этих участков. Для проведения испытаний течеискатель соединяют с испытываемой системой по одной из схем, показанных на рис. 16.4.

Испытания по первому варианту (рис. 16.4, а) осуществляют в следующем порядке. Откачивают систему и все соединительные коммуникации вспомогательным насосом 4; при достижении в системе давления  $< 10$  Па плавно открывают дроссельный клапан 2, устанавливая в течеискателе рабочее давление  $p_{\text{раб}} < p_{\text{доп}}$ ; включают течеискатель 3 и приступают к поиску течей; по мере обнаружения и уст-



ранения течей плавно открывают дроссельный клапан 2.

После полного его открытия перекрывают клапан 5, отделяющий механический насос, если давление в теченскателе не начнет превышать предельно допустимого, при котором обеспечивается обнаружение течи с минимальными размерами. Иногда полное открытие дроссельного клапана невозможно из-за высокого предельного остаточного давления механического насоса; тогда перекрывают механический насос. Если давление при этом не уменьшается, то насос не является причиной повышения давления и его следует подключить вновь.

Испытания по схемам, показанным на рис. 16.4, б, в, проводят в следующем порядке. Откачивают механическим насосом 4 систему 1, в том числе патрубок, соединяющий ее с теченскателем 3. Если в системе удастся получить давление меньше предельного выпускного давления пароструйного насоса 6, включают последний. В противном случае откачку системы проводят только механическим насосом 4; плавно открывая дроссельный

клапан 2 теченскателя, устанавливают в системе теченскателя 3 рабочее давление; включают катод и приступают к поиску течей.

Если после устранения ряда течей давление в системе снизится настолько, что можно будет включить пароструйный насос 6, его включают и продолжают испытания после достижения в системе высокого вакуума.

По мере обнаружения и устранения течей плавно открывают дроссельный клапан 2 теченскателя. Если при полностью открытом дроссельном клапане давление в теченскателе 3 ниже рабочего, то для увеличения чувствительности теченскателя при работе по схеме, показанной на рис. 16.4, в, перекрывают трубопровод к механическому насосу 4 системы (давление при этом не должно превышать рабочего), закрыв клапан 5, и стремятся работать на более чувствительных шкалах теченскателя компенсацией фоновых сигналов.

Для уточнения места течи следует использовать способы, препятствующие попаданию гелия в течи, расположенные на участках поверхности, смежных с обдуваемыми. Эффективно создание у обдувателя воздушной струи, смещающей поток гелия в одном направлении. При этом ступенчатое перемещение обдувателя позволяет точнее установить место течи.

Если градуировку выполняют с помощью течи «Гелит», поток гелия через обнаруженную течь

$$Q = S_Q (\alpha - \alpha_{\phi}) c_{\text{He}}, \quad (16.23)$$

где  $\alpha$  — сигнал теченскателя;  $c_{\text{He}}$  — концентрация гелия в смеси газов, подаваемой на течь.

Способ вакуумных присосок применяют при контроле герметичных листовых заготовок для вакуумных систем и их незамкнутых, а также газонаполненных элементов.

При испытаниях вакуумные присоски устанавливают на проверяемые участки поверхности, с противоположной стороны которых подают гелий (рис. 16.5).

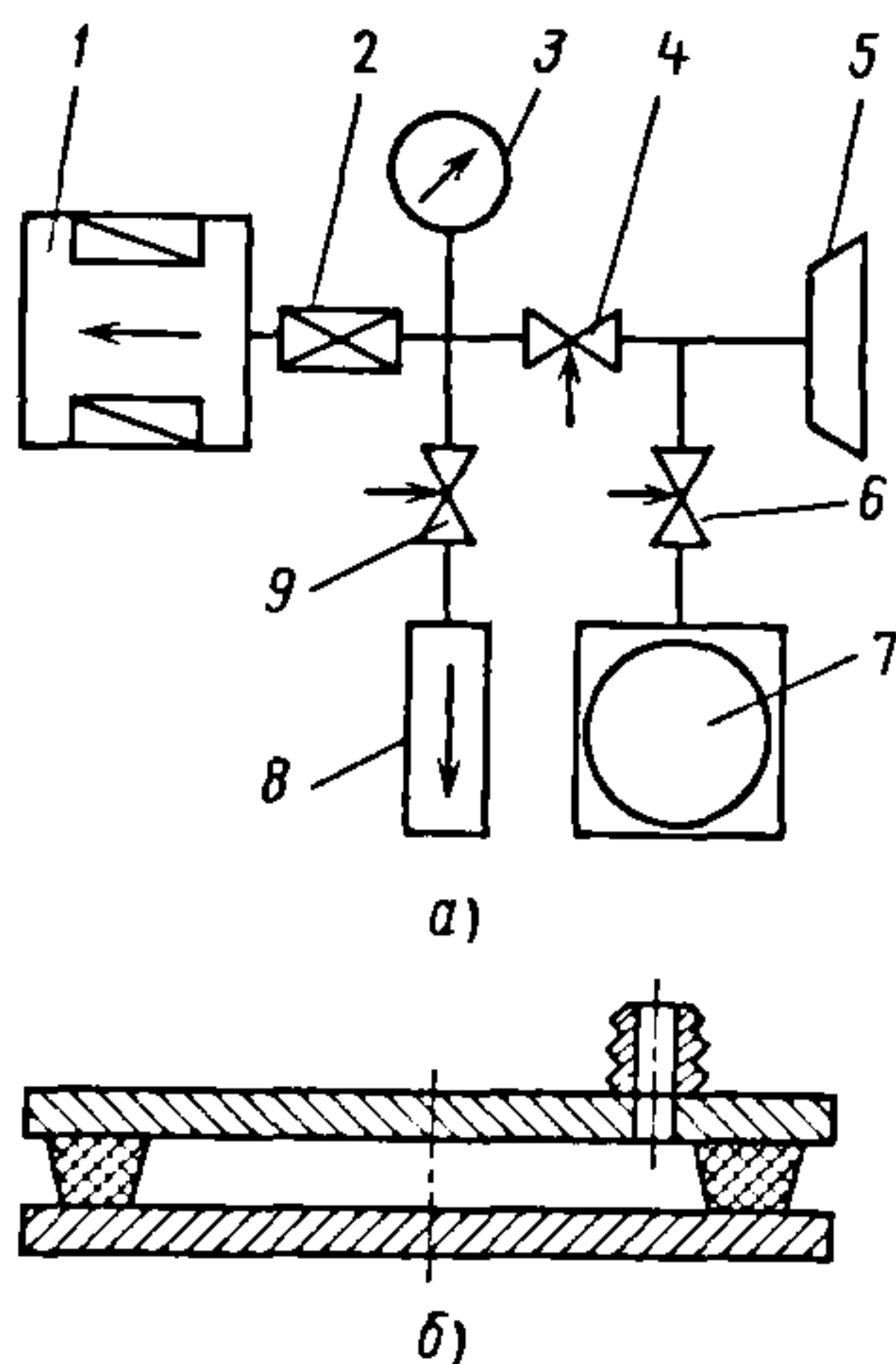


Рис. 16.5. Схема испытаний на герметичность с помощью вакуумных присосок: а — схема установки (1 — теченскатель; 2 — дроссельный клапан теченскателя; 3 — манометрический преобразователь; 4, 6, 9 — клапаны; 5 — вакуумная присоска; 7 — механический вакуумный насос; 8 — течь «Гелит»); б — присоска



При проверке незамкнутых элементов (например, сварных швов обечаек) гелий можно подавать с помощью полиэтиленового чехла, наклеенного на поверхность липкой лентой. Присоску предварительно откачивают механическим насосом и соединяют с течеискателем специальным штуцером.

При использовании присосок испытания рекомендуется проводить в такой последовательности. По течи «Гелит», установленной на входе течеискателя, следует:

- определить цену деления  $S_Q$ ;
- установить присоску на заведомо герметичном участке проверяемой поверхности;
- открыть клапан 6 (при этом дроссельный клапан 2 течеискателя открыт, клапан 4 закрыт), зафиксировать момент начала откачки и откачать присоску до давления, не превышающего 7 Па;
- перекрыть клапан 6 и открыть клапан 4;
- через заданное время после начала откачки присоски несколько раз определить фоновый сигнал  $\alpha_\phi$ , переуплотняя присоску, и подсчитать разброс фоновых сигналов  $\Delta\alpha_\phi$  и значение  $Q_{\min}$  по формуле (16.22);
- установить присоску на проверяемом участке и, выполнив те же операции, что и при определении  $\alpha_\phi$ , зафиксировать сигнал течеискателя  $\alpha$ .

Если  $\alpha - \alpha_\phi < (2...3)\Delta\alpha_\phi$ , проверяемый участок надо считать герметичным в пределах чувствительности, определяемой значением  $Q_{\min}$ .

При малом разбросе фонового сигнала  $\Delta\alpha_\phi$  можно повысить чувствительность испытаний компенсацией фонового сигнала  $\alpha_\phi$  и переводом измерений на более чувствительную шкалу. Разброс  $\Delta\alpha_\phi$  не должен превышать 10...20 % по выбранной шкале.

Измерения проводят следующим образом. Включают компенсационную схе-

му течеискателя и при одновременном переключении шкалы плавным изменением компенсирующего напряжения уменьшают показания выходного прибора так, чтобы стрелка установилась на расстоянии 1/3 от начала отсчета выбранной для измерения шкалы. Измеряют скомпенсированные показания выходного прибора течеискателя  $\alpha_k$ . Затем переключатель шкал переводят в исходное положение и тумблером исключают компенсацию (положение потенциометра схемы компенсации при этом не должно меняться).

После уплотнения присоски на контролируемом участке (через заданное после начала откачки время) измеряют сигнал выходного прибора течеискателя. Если  $\alpha \approx \Delta\alpha_\phi$ , необходимо тумблером перевести измерение на более чувствительную шкалу. Если отклонение полученного сигнала от  $\alpha_k$  не превышает  $(2...3)\Delta\alpha_\phi$ , течь отсутствует.

Способ барокамеры применяют для проверки герметичности элементов вакуумных систем, работающих при избыточном давлении.

Во время испытаний элемент помещают в откачиваемую барокамеру. Внутреннюю полость элемента заполняют гелием или смесью, содержащей гелий. Течеискатель подсоединяют к барокамере (см. рис. 16.4, б, в) и, отградуировав систему, определяют значения  $S_Q$  и  $Q_{\min}$  по формулам (16.21) и (16.22). Порядок испытаний аналогичен описанному для способа обдува гелиевых чехлов (см. рис. 16.4, б, в).

Испытания с накоплением пробного газа проводят в следующем порядке. С помощью течи «Гелит», установленной на барокамере, определяют цену деления выходного прибора течеискателя по объему гелия в системе испытания. Для этого при подсоединенных течи и сорбционном насосе отключают пароструйный насос и вычисляют цену деления шкалы выходного прибора течеискателя,  $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{мВ}$ :

$$S_Q = Q_{\text{He}} \Delta t / (\alpha_{\text{He}} - \alpha_\phi). \quad (16.24)$$

Затем перекрывают течь «Гелит», откачивают барокамеру пароструйным насосом до установившегося давления, отключают пароструйный насос, определяют фоновый сигнал течеискателя  $\alpha_f$  через фиксированное время  $\Delta t$  после отключения пароструйного насоса, подсоединяют пароструйный насос, заполняют внутреннюю полость изделия гелием или смесью с концентрацией гелия  $c_{He}$ , отключают пароструйный насос, определяют сигнал течеискателя через то же время  $\Delta t$ . Суммарный поток гелия

$$Q = S_Q \frac{\alpha - \alpha_f}{\Delta t} \frac{1}{c_{He}}. \quad (16.25)$$

Способ щупа применяют для обнаружения мест течей в элементах вакуумных систем, работающих под избыточным давлением, а также для определения степени негерметичности этих элементов при испытаниях способом накопления гелия в чехле при атмосферном давлении. Испытания способом щупа проводят при заполнении испытуемого элемента гелием (или смесью гелия с балластным газом) до максимально допустимого давления.

Щуп 1 (рис. 16.6) представляет собой устройство, проводимость которого обеспечивает прохождение через него потока  $2 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2}$  Па·м<sup>3</sup>/с; оптимальный поток  $(2 \dots 5) \cdot 10^{-3}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Расстояние между всасывающим соплом щупа и входом в вакуумный объем должно быть минимальным.

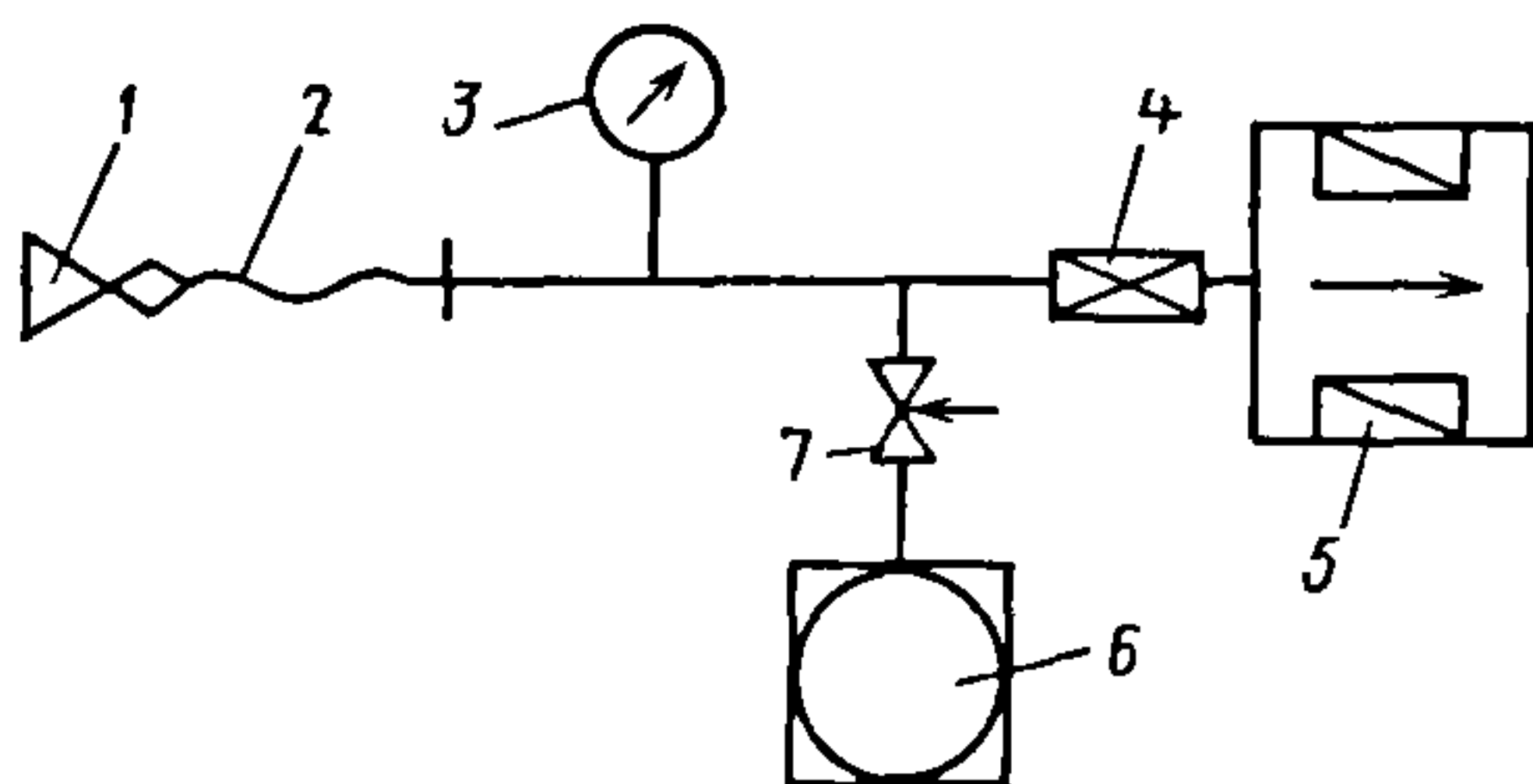


Рис. 16.6. Схема испытаний на герметичность способом щупа:  
1 — щуп; 2 — гибкий трубопровод; 3 — манометрический преобразователь; 4 — дроссельный клапан течеискателя; 5 — течеискатель; 6 — механический вакуумный насос; 7 — клапан

Гибкий трубопровод 2 должен быть герметичным и обладать предельно малым газовыделением и «памятью» по гелию. Длина трубопровода также должна быть минимальной, но достаточной для исследования наиболее удаленных участков системы. Рекомендуются трубопроводы, состоящие из металлических трубок с короткими резиновыми вставками.

Щуп с гибким трубопроводом можно заменить капиллярным зондом, представляющим собой длинный гибкий капилляр из коррозионно-стойкой стали с распределенным вакуумным сопротивлением. Капилляр длиной 4...5 мм, диаметром 0,1...0,2 мм создает рабочий поток газа  $(4 \dots 6) \cdot 10^{-3}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Капиллярный зонд не требует регулирования и обеспечивает высокую стабильность газового потока.

Испытания способом щупа проводят в следующем порядке. Заполняют испытуемое изделие гелием до давления, максимально допустимого для данного изделия. Присоединяют щуп с трубопроводом 2 (или капиллярный зонд) ко входу течеискателя 5, механическим насосом 6 через клапан 7 откачивают систему трубопроводов, клапан 7 оставляют открытым. Регулируют щуп на оптимальную проводимость. Поток регулируют, например, по сигналу манометрического преобразователя на входе течеискателя; потоку  $(2 \dots 5) \cdot 10^{-3}$  Па·м<sup>3</sup>/с соответствует давление 7...30 Па.

Открывают входной клапан течеискателя так, чтобы давление в анализаторе составляло 0,01 Па; проверяют чувствительность течеискателя, поднося всасывающее сопло щупа или свободный конец капиллярного зонда к диффузионной течи типа «Гелит», закрытой пробкой со сквозным отверстием диаметром 0,1...0,2 мм (можно использовать пробку, которой комплектуется течь «Гелит»); компенсируют фоновый сигнал на удобную для работы шкалу. Перемещая щуп вдоль поверхности испытуемого изделия, заполненного гелиевой смесью, определяют место течи. По мере приближения к месту



течи поток газа, всасываемого щупом, обогащается гелием, что индицируется течеискателем.

Минимальный обнаруживаемый поток через течь вычисляют по формулам (16.21) и (16.22). При градуировке щуп подносят к отверстию в пробке течи «Гелит» на расстояние  $\sim 0,2$  мм. Чувствительность в значительной мере зависит от скорости перемещения и расположения щупа относительно течи. В связи с тем что при градуировке и испытаниях трудно добиться идентичности условий, зарегистрированный поток через течи можно оценить лишь ориентировочно.

Поток газа через течь в зависимости от давления в испытуемом элементе можно оценить по формуле (16.6). Для повышения точности получаемых результатов испытания целесообразно проводить с помощью насадки, идентичной по профилю обследуемой поверхности, чтобы большая часть гелиевого облака захватывалась щупом. Точное расположение места течи рекомендуется находить посредством зонда с иглой.

Герметичность всего элемента системы или его отдельной части можно проверить, собрав вытекающий через течи гелий в полиэтиленовый чехол, содержащий атмосферный воздух. Степень герметичности определяют по повышению концентрации гелия в чехле, измеряемой с помощью щупа в начале и конце испытания.

Этот способ основан на накоплении пробного газа, проникающего через течи, в сосуде, изолированном от откачной системы, и последующем перепуске накопленного гелия в течеискатель после откачки всех остальных газов сорбционным насосом. Такой способ позволяет обнаружить с помощью течеискателей типа ПТИ потоки до  $10^{-14}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

Испытания по способу накопления с применением сорбционного насоса можно осуществить, например, с использованием простейшей установки (рис. 16.7). Она позволяет проводить накопление пробного газа в нескольких испытуемых элементах

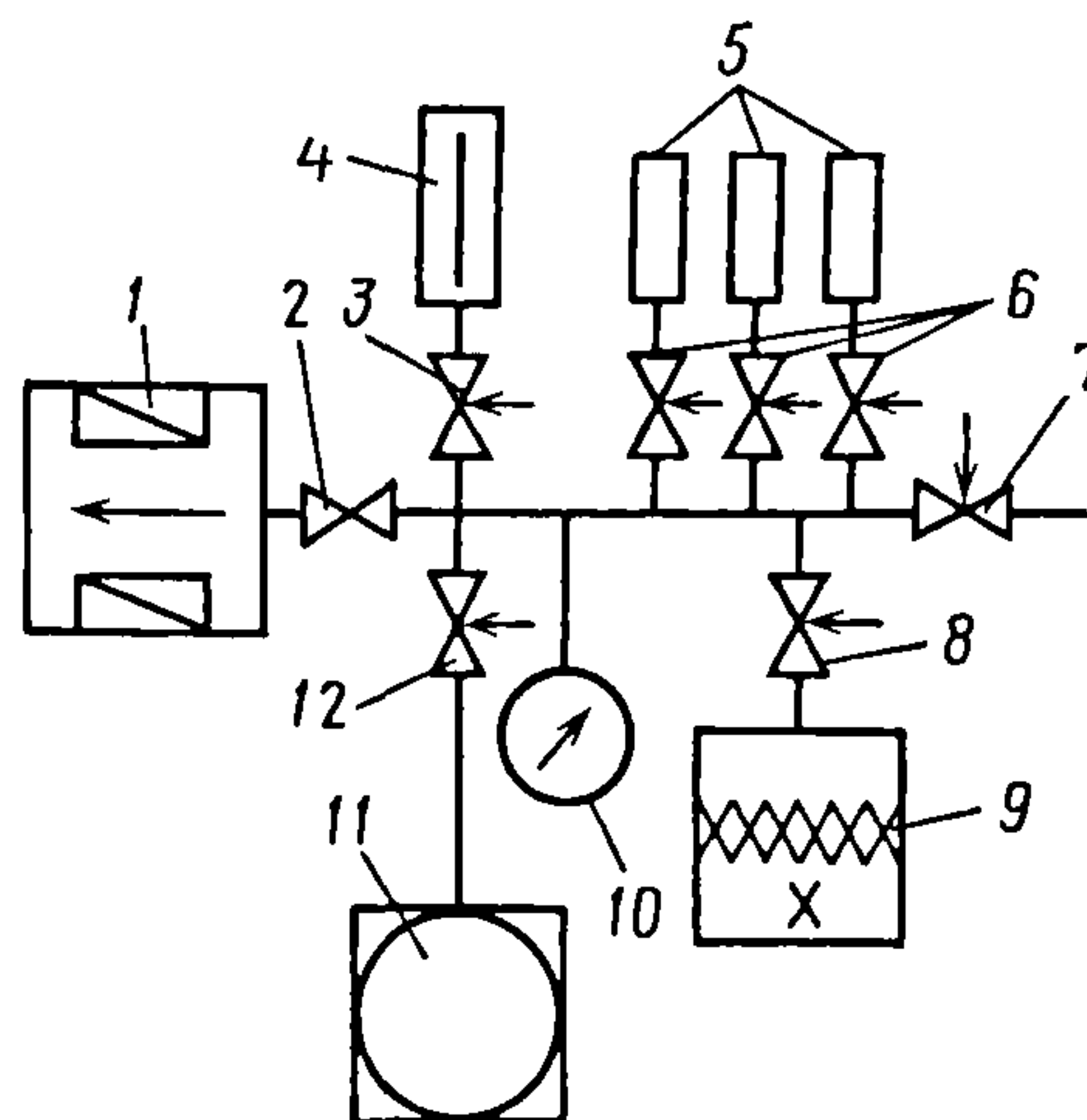


Рис. 16.7. Схема испытаний на герметичность способом накопления с применением сорбционного цеолитового насоса:

1 - течеискатель; 2, 3, 6-8, 12 - клапаны; 4 - гелиевая течь; 5 - испытуемые изделия; 9 - насос; 10 - манометрический преобразователь; 11 - механический форвакуумный насос

одновременно либо заменять или откачивать одни элементы, в то время как в других проходит накопление.

Минимальный обнаруживаемый поток через течь определяется значением и стабильностью фоновых гелиевых потоков в испытуемой системе. Для уменьшения этих потоков в соединениях системы применяют металлические уплотнения. В части системы, которую лишь на короткое время отделяют от средств откачки, можно устанавливать резиновые уплотнения. Для присоединения к течеискателю проверяемых деталей и сборочных единиц следует использовать специальные быстроразъемные приспособления, обеспечивающие высокую степень герметичности при малом газовыделении.

Испытания по способу накопления проводят в следующем порядке (см. рис. 16.7). Открывают клапаны 3, 6, 8, 12 и откачивают систему форвакуумным насосом 11 (клапан 2 закрыт); закрыв клапан 12 и открыв клапан 2, откачивают систему высоковакуумным насосом, если

объем проверяемого объекта велик. Охлаждают сорбционный насос 9 жидким азотом, закрывают гелиевую течь 4 клапаном 3, а затем клапаны 6 и осуществляют накопление фонового гелия в испытуемых изделиях 5 в течение времени  $\Delta t$ . Закрывают клапан 2; кратковременным открытием клапанов 6 перепускают накопленный газ в объем насоса 9, открывают клапан 2, перепускают накопленный фоновый гелий в течеискатель 1, зафиксировав максимальный сигнал  $\alpha_{\text{ф}}$ , и закрывают клапан 2.

Из-за возможной нестабильности фонового сигнала такой опыт рекомендуется повторить несколько раз и определить среднее значение  $\alpha_{\text{ф}}$  и  $\Delta\alpha_{\text{ф}}$ . Течь можно обнаружить, если вызываемый ею сигнал удовлетворяет условию

$$\alpha \geq \alpha_{\text{ф}} + 2\Delta\alpha_{\text{ф}}. \quad (16.26)$$

Далее на изделие надевают чехол (полиэтиленовый или резиновый) и заполняют его гелием. Выполнив те же операции, что и при определении  $\alpha_{\text{ф}}$ , фиксируют максимальный сигнал  $\alpha$  течеискателя, определяют цену деления  $S_Q$  течеискателя с помощью гелиевой течи 4. Последнюю операцию выполняют в определенной последовательности: накапливают гелий в течи (все клапаны установки закрыты), открывают клапаны 6 и 8 и кратковременным открытием клапана 3 перепускают накопленный гелий в насос 9 (клапаны 6 открыты для сохранения одинаковых условий испытаний и градуировки), открывают клапан 2 и, перепустив накопленный гелий в течеискатель, регистрируют фоновый сигнал  $\alpha_{\text{не}}$  течеискателя от течи. Определяют цену деления выходного прибора течеискателя по уравнению (16.24), а поток гелия, вытекающего в изделие, — по формуле (16.25).

#### 16.4. ГАЛОГЕННЫЙ МЕТОД

Галогенный метод основан на свойстве накаливаемой пластины в присутствии галогенов или галогенсодержащих веществ (фреона, хлорнда метила и др.) резко увеличивать эмиссию положительных ионов, регистрируемых течеискателем. Галогенные течеискатели имеют анализаторы двух типов: вакуумный и атмосферный. Течеискатели с вакуумными анализаторами применяют для контроля вакуумных систем с относительно низкими требованиями к герметичности, течеискатели с атмосферными газоанализаторами — для контроля газонаполненных систем, работающих в вакууме и допускающих опрессовку галогенсодержащим газом.

При испытаниях вакуумный анализатор рекомендуют присоединять к высоковакуумной части системы. При таком расположении анализатора минимальный обнаруживаемый поток газа через течь уменьшается, поскольку повышается стабильность температуры эмиттера (колебания форвакуумного давления приводят к нестабильности этой температуры) и, соответственно силы фонового тока, исключаются эффекты сорбции фреона на переходных коммуникациях и снижается степень загрязнения анализатора.

Контроль герметичности систем галогенным течеискателем с атмосферным анализатором следует проводить способом, аналогичным способу щупа.

Поток газа через течь, зависящий от давления опрессовки и концентрации галогена в контролируемой системе, вычисляют по формуле (16.6) для вязкостного режима течения газа.

Помещение, в котором проводят испытания галогенным течеискателем, должно быть оборудовано системой приточно-вытяжной вентиляции. Содержание галогенов в атмосфере помещения не должно превышать  $10^{-4}\%$ .

Течеискатели следует градуировать в соответствии с инструкцией по эксплуатации.



### 16.5. КАТАРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Катарометрический метод применяют при атмосферных испытаниях и для обнаружения течей в газонаполненных системах с допускаемым потоком натекания  $Q_{\text{доп}} \leq 10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

Катарометрический течеискатель реагирует на изменение теплопроводности газовой смеси при добавлении к воздуху пробных газов, отличающихся по

теплопроводности от воздуха. При этом благодаря применению компенсационной схемы течеискатель нечувствителен к общему уровню фона пробных газов.

В качестве пробных можно использовать газы, существенно отличающиеся по теплопроводности от воздуха. Ниже приведены относительные теплопроводности некоторых газов (индексы «г» и «в» соответствуют газу и воздуху):

Газ .....	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Ar	He	Фреон-12	N <sub>2</sub>	Фреон-22
$\lambda_r/\lambda_v$ .....	0,674	1,015	1,318	0,674	6,040	7,300	7,130	9,300

Испытания на герметичность катарометрическим методом проводят в следующем порядке. Заполняют испытываемую систему пробным газом под избыточным давлением, перемещают анализатор течеискателя вдоль контролируемой поверхности. Приближение его к месту течи сопровождается попаданием в течеискатель пробного газа и изменением теплопроводности газовой смеси. При этом меняются температура и электрическое сопротивление нагретой нити анализатора, что регистрирует выходной прибор течеискателя.

### 16.6. МЕТОД ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

Метод высокочастотного разряда основан на возбуждении высокочастотного разряда при давлении  $10^3 \dots 10^1$  Па·м<sup>3</sup>/с в вакуумных системах, имеющих стеклянные участки.

Контроль герметичности необходимо проводить в следующем порядке:

- подготовить к работе искровой течеискатель в соответствии с техническим описанием и паспортом, прикосновением электрода течеискателя к контролируемой стеклянной поверхности или металлическому стержню, впаянному в стекло;
- возбудить высокочастотный электрический разряд в вакууме;
- для обнаружения течей в стеклянных оболочках вакуумных систем пере-

мещать электрод вдоль контролируемой поверхности откачанной вакуумной системы и следить за характером и цветом искрового разряда.

Цвет свечения разряда зависит от состава газовой смеси; газовой выделению соответствует серый цвет, натекание воздуха вызывает лилово-красное свечение. Если поток воздуха через течь заменить парами ацетона, бензина, эфира или диоксида углерода, цвет свечения из лилово-красного станет серым.

В процессе перемещения электрода над стеклянной оболочкой при отсутствии в ней течей на конце электрода появляется пучок искр, направление которых не связано с какими-либо фиксированными точками поверхности системы. При приближении электрода к месту течи разряд формируется в тонкий и яркий пучок, направленный на течь.

В процессе контроля герметичности методом высокочастотного разряда возможен пробой стеклянной стенки контролируемого элемента. Для исключения пробоя не следует задерживать электрод с высокочастотным разрядом над каким-либо участком стеклянной поверхности.

### 16.7. ПУЗЫРЬКОВЫЙ МЕТОД

Пузырьковый метод применяют на этапе предварительных испытаний отдельных элементов прогреваемых вакуумных систем, способных выдерживать избыточное давление. Испытания прово-

дят в следующем порядке. Испытуемый объект заполняют воздухом или пробным газом под избыточным давлением, погружают объект в жидкость или смачивают его поверхность мыльным раствором. Наличие течи определяют по пузырькам, появляющимся на наружной поверхности объекта. Поток газа, вытекающего через течь,

$$Q = 0,4n_p D_p^3 p_a / \Delta t, \quad (16.27)$$

где  $n_p$  — число пузырьков, проявившихся за время наблюдения  $\Delta t$ ;  $D_p$  — диаметр пузырьков.

Так, при диаметре наименьшего подающегося наблюдению пузырька 0,5 мм и частоте появления пузырьков  $n_p/\Delta t = 1/30 \text{ с}^{-1}$  минимальный регистрируемый поток натекания составит  $10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ . По окончании испытаний объект извлекают из жидкости и просушивают, сохраняя в нем давление пробного газа или воздуха.

Порог чувствительности можно увеличить повышением давления в испытуемом объекте или откачкой газа над испытуемой жидкостью.

### 16.8. АММИАЧНЫЙ МЕТОД

Аммиачный метод основан на химическом взаимодействии аммиака, проникающего через течи, с индикаторным веществом, нанесенным на поверхность испытуемого объекта. Испытания с помощью аммиачного метода проводят в следующем порядке. Испытуемую систему заполняют аммиаком в виде аммиачно-воздушной смеси под избыточным давлением; на участки поверхности с предполагаемой течью накладывают бинт, смоченный нитратом ртути. Для повышения точности результатов испытаний рекомендуется применять индикатор метиловый красный.

Место течи определяют по образующимся на бинте пятнам. Минимальный

обнаруживаемый поток аммиака составляет  $10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ .

### 16.9. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД

Люминесцентный метод применяют в основном при отработке технологии герметизации для визуального наблюдения «устья» течей, а при изготовлении шлифов с разрезом по месту течи — для исследования структуры каналов течей.

Сущность метода заключается в том, что испытуемый объект полностью или частично погружают в раствор люминофора в органической жидкости так, чтобы он не попал во внутреннюю полость. При наличии течи под действием капиллярных сил раствор втягивается внутрь течи и через некоторое время проходит на ее противоположную сторону, где по мере испарения растворителя скапливается подсохший люминофор.

Обследуя поверхность испытуемого изделия в ультрафиолетовом излучении (ртутно-кварцевая лампа), можно обнаружить места течей в виде светящихся точек и линий. Этим методом можно индигировать течи до  $10^{-6} \dots 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ . При наблюдении используют линзы для фокусировки ультрафиолетового излучения, что увеличивает площадь видимой поверхности светящегося сигнала и его яркость.

Необходимо выбирать люминофор, цвет свечения которого исключает появление ложных сигналов. В качестве растворителей используют трихлорэтилен, бензол и тетрахлорид углерода. При испытаниях люминесцентным методом следует соблюдать правила работы с этим раствором.

Главное преимущество метода — отсутствие необходимости в откачке испытуемых объектов.



## Глава 17

# ИСПЫТАНИЯ ВАКУУМНЫХ МАШИН

### 17.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

После изготовления и ремонта, а также в процессе эксплуатации насосов и агрегатов их подвергают испытаниям для оценки пригодности к эксплуатации.

Основные параметры вакуумных насосов и агрегатов, подлежащих испытаниям: предельное остаточное давление, быстрота действия (кроме адсорбционных насосов), наибольшее выпускное давление (для пароструйных насосов), максимальные давление запуска и рабочее давление (для геттерных насосов), наибольшее отношение давлений (для двухроторных насосов), максимальный откачиваемый объем в диапазоне рабочих давлений (для адсорбционных насосов).

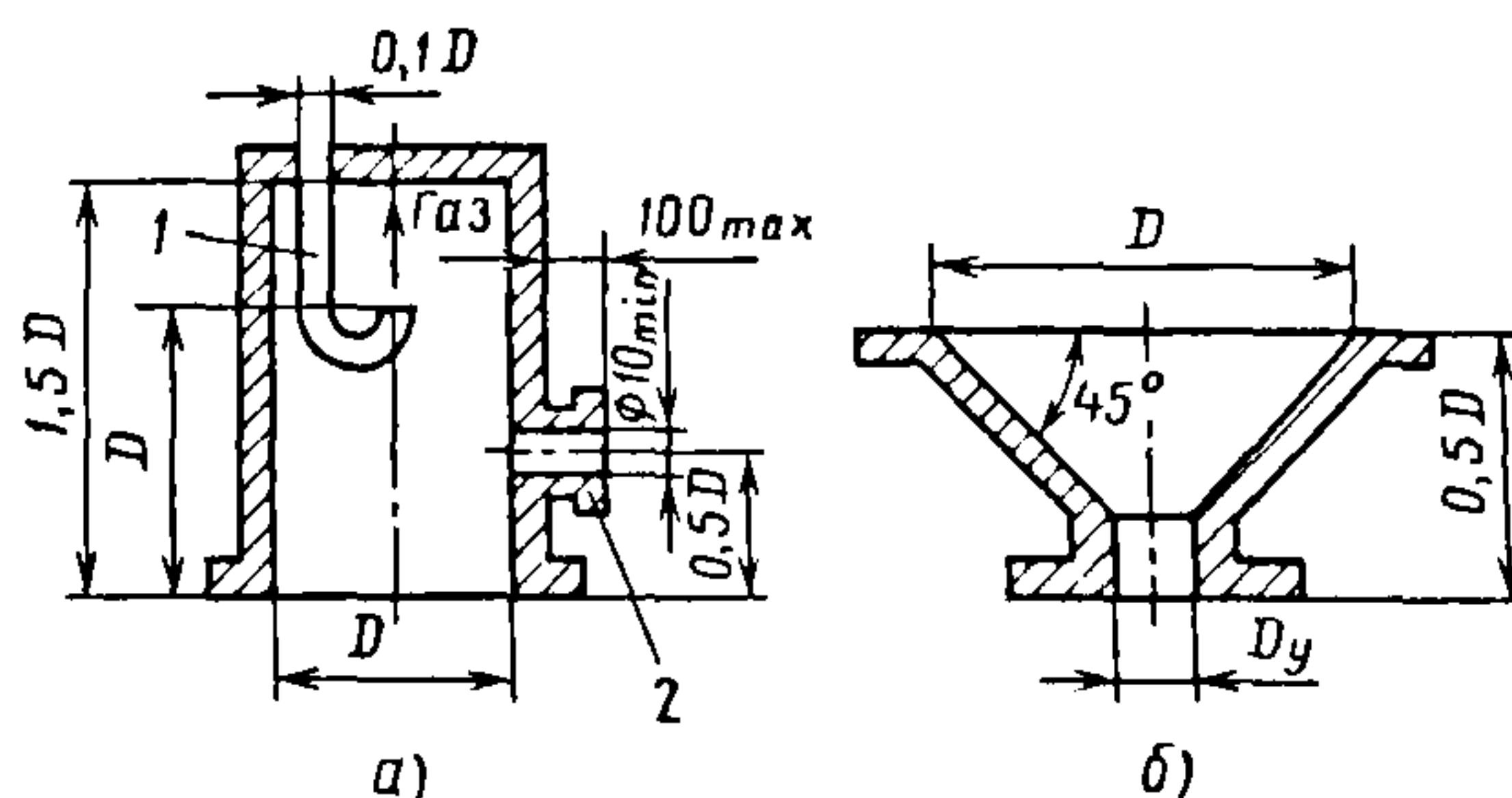
Испытательная установка включает в себя испытуемый насос (агрегат) с присоединенной к нему измерительной каме-

рой, аппаратуру для измерения давления и потока газа, а также соединительную и запорную арматуру.

Результаты испытаний существенно зависят от методики измерений (расхождение 8...15 %). Соблюдение единого подхода к испытаниям и рекомендуемых геометрических параметров для измерительных камер позволяют провести объективное сопоставление характеристик насосов.

Диаметр  $D$  измерительной камеры (рис. 17.1, а) для всех насосов, кроме механических с масляным уплотнением и адсорбционных, должен быть равен диаметру условного прохода  $D_y$  на входе испытуемого насоса, но  $\geq 100$  мм. При  $D_y < 100$  мм между измерительной камерой и испытуемым насосом устанавливают переходник (рис. 17.1, б).

Рис. 17.1. Измерительная камера (а) и переходник (б):  
1 — напускная трубка; 2 — фланец или штуцер для подсоединения манометрических преобразователей



В испытательной установке для измерений потоков газа с помощью диафрагм предусматривают две камеры (рис. 17.2): измерительную 1 и напускную 2, изготовленные из коррозионно-стойкой стали. Диафрагму 4 устанавливают при измерении потоков  $< 10^{-4}$  Па·м<sup>3</sup>/с, а также потоков в безмасляных системах. Диафрагма может служить одновременно вакуумным уплотнением фланцевого соединения между измерительной и напускной камерами.

Проводимость  $U_d$  диафрагм выбирают в зависимости от требуемой быстроты действия  $S$  испытуемого насоса (агрегата). Проводимость  $U_d$  рекомендуется принимать равной  $0,1 S$ .

Диаметр диафрагмы

$$d_d = 0,19 \sqrt{U_d^2 M / (k^2 T)},$$

где  $M$  – молекулярная масса газа;  $k$  – коэффициент Клаузинга;  $T$  – температура газа, К.

Рекомендуемая толщина диафрагмы  $h \sim 0,5$  мм (при  $h/d_d < 0,1$   $k \approx 0,91$ ; при  $h/d_d < 0,05$   $k \approx 0,95$ ).

Для измерения давления в одном диапазоне рекомендуется выбирать вакуумметры и манометрические преобразователи одного типа.

Поток газа можно измерять бюретками, ротаметрами, с помощью диафрагм и т.д. Допускаемы погрешности измерения потока  $Q$  газа;  $\pm 3$ ;  $\pm 5$  и  $\pm 10$  % при соответственно  $Q > 1$ ;  $1 \dots 10^{-4}$  и  $< 10^{-4}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

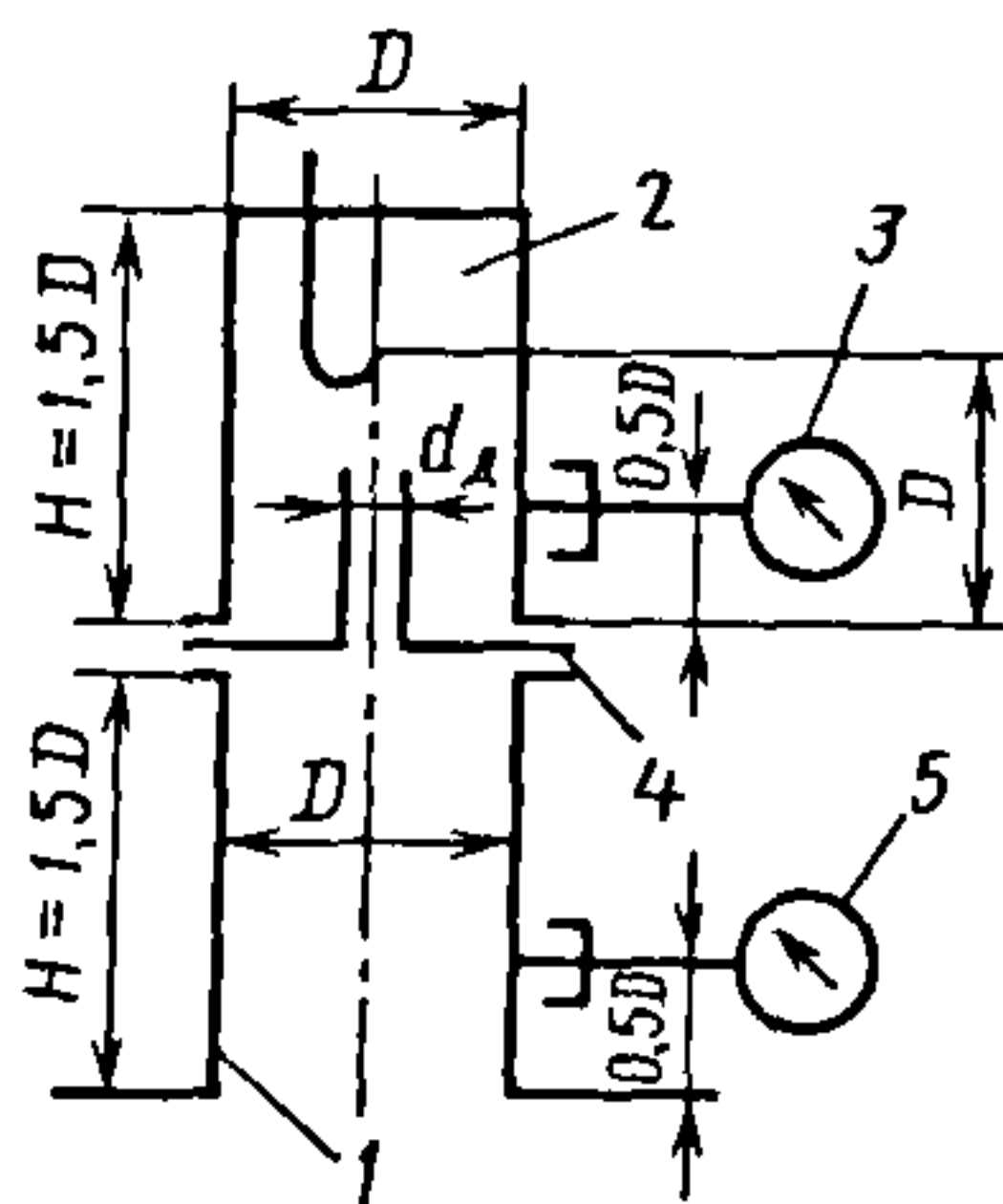


Рис. 17.2. Схема установки для измерения потока газа с помощью диафрагм:

1 – измерительная камера; 2 – напускная камера; 3, 5 – манометрические преобразователи; 4 – диафрагма

Перед сборкой все поверхности испытательной установки, которые будут находиться в вакууме, следует очистить и обезжирить в соответствии с инструкцией по эксплуатации насоса (агрегата). После сборки испытательную установку необходимо проверить на герметичность. Методики испытаний различного типа насосов достаточно близки между собой и отличаются учетом параметров, обеспечивающих работоспособность насосов различного принципа действия.

## 17.2. ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ (АГРЕГАТОВ) С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

При испытаниях механических вакуумных насосов (агрегатов) с масляным уплотнением измеряются предельное остаточное давление и зависимость быстроты действия от давления всасывания,  $S = f(p_{вс})$  при включенном и выключенном газобалластном устройством.

Параметры механических насосов с масляным уплотнением проверяют на установке, схема которой приведена на рис. 17.3.

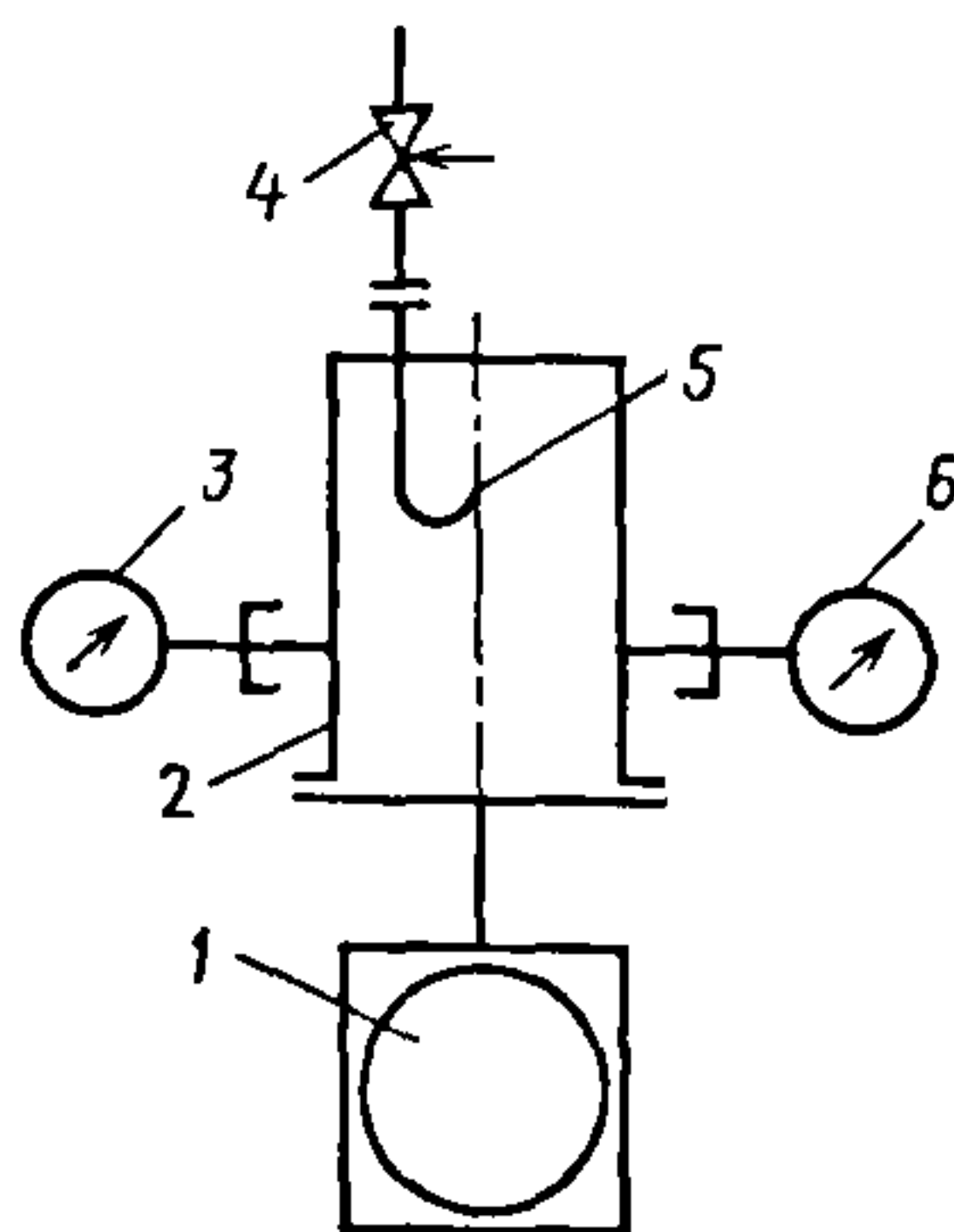


Рис. 17.3. Схема установки для испытаний механических вакуумных насосов с масляным уплотнением и адсорбционных:

1 – испытуемый насос (агрегат); 2 – измерительная камера; 3, 6 – манометрические преобразователи; 4 – натекающий газ; 5 – напускная трубка



Измерительная камера должна иметь объем

$$V \geq 5 V_{\text{вс}} = 300 S / n,$$

где  $V_{\text{вс}}$  – объем всасывания за один оборот насоса;  $S$  – требуемая быстрота действия испытуемого насоса,  $\text{дм}^3/\text{с}$ ;  $n$  – частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ .

Между испытуемым насосом и измерительной камерой допускается устанавливать переходник (см. рис. 17.1, б).

Предельное остаточное давление измеряют в установившемся равновесном режиме, при котором давление в течение 1 ч изменяется в пределах погрешности прибора для измерения давления. Это значение принимают за предельное остаточное давление насоса при отсутствии потока газа со стороны всасывающего патрубка насоса.

При измерении быстроты действия измерительную камеру откачивают до предельного остаточного давления. Допускается откачивать камеру до давления, равного  $0,1 p_{\text{вх}}$  для высоковакуумных насосов и агрегатов и  $0,05 p_{\text{вх}}$  для насосов и агрегатов среднего и низкого вакуума, где  $p_{\text{вх}}$  – давление во входном сечении насоса, при котором требуется измерить быстроту его действия.

При откачке в измерительной камере устанавливают давление газа  $p_{\text{вх}}$  так, чтобы результаты трех последних измерений давления не отличались более чем на 10 %, измеряют поток  $Q$  газа, поступающего в измерительную камеру через натекатель, и вычисляют быстроту действия насоса при заданном давлении  $p_{\text{вх}}$ ,  $S = Q/p_{\text{вх}}$ .

Изменяя давление  $p_{\text{вх}}$  для всего рабочего диапазона, определяют зависимость между быстротой действия испытуемого насоса и давлением  $p_{\text{вх}}$ . Измерения начинают с самого низкого давления.

Для газобалластных насосов одну серию измерений предельного остаточного давления и быстроту действия следует выполнять с закрытым, а вторую – с полностью открытым газобалластным устройством.

### 17.3. ИСПЫТАНИЯ ДВУХРОТОРНЫХ НАСОСОВ (АГРЕГАТОВ)

При испытаниях двухроторных вакуумных насосов (агрегатов) измерения проводят по методике, аналогичной методике испытаний для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением, и дополнительно измеряют зависимость максимального отношения давлений  $\tau_{\text{max}}$  от давления на выходе двухроторного насоса.

Параметры двухроторных вакуумных насосов (агрегатов) проверяют на установке, схема которой приведена на рис. 17.4.

Длина трубопроводов от выходного фланца испытуемого насоса 1 до манометрического преобразователя 7 на выходном трубопроводе должна быть  $\leq 150$  мм, а от манометрического преобразователя до накателя  $\geq 200$  мм. Предельное остаточное давление и быстроту действия измеряют согласно методике, изложенной для механических насосов.

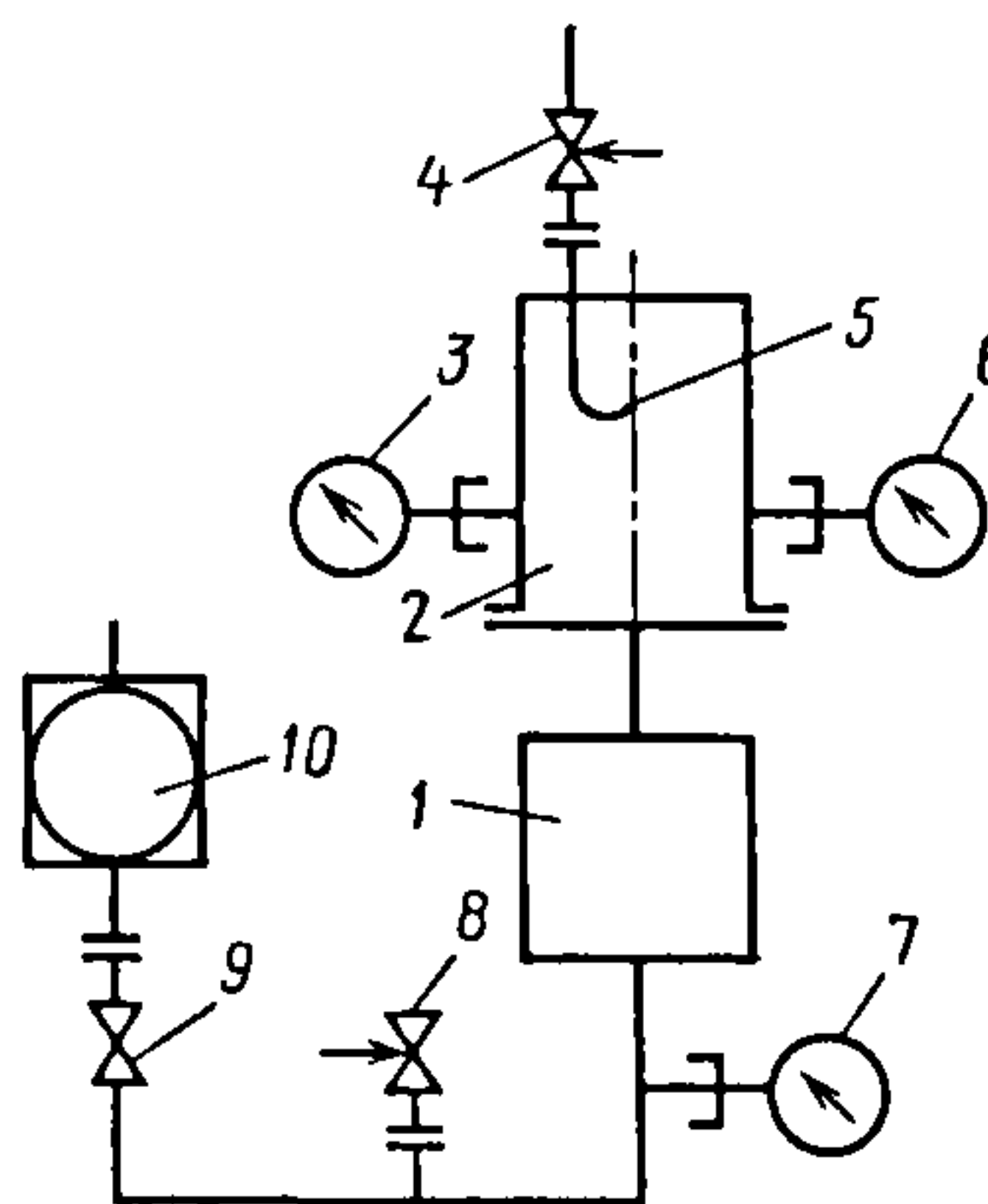


Рис. 17.4. Схема установки для испытаний двухроторных и пароструйных насосов и агрегатов:

1 – испытуемый насос (агрегат); 2 – измерительная камера; 3, 6 – манометрические преобразователи; 4 – натекатель; 5 – напускная трубка; 7 – манометрический преобразователь на выходном трубопроводе; 8 – натекатель на выходном трубопроводе; 9 – клапан; 10 – форвакуумный насос

Максимальное отношение давлений  $\tau_{\max}$  определяют по изменению предельного остаточного давления в зависимости от давления на выходе испытуемого насоса  $p_{\text{вых}}$  во всем рабочем диапазоне давлений, допускаемых инструкцией по эксплуатации насоса. При этом по измеренным давлениям  $p_{\text{вых}}$  и  $p_0$  для заданного ряда давлений в измерительной камере вычисляют отношение давлений  $\tau_{\max} = p_{\text{вых}}/p_0$ .

#### 17.4. ИСПЫТАНИЯ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫХ НАСОСОВ (АГРЕГАТОВ)

При испытаниях турбомолекулярных вакуумных насосов (агрегатов) измеряют предельное остаточное давление и зависимость быстроты действия от давления всасывания  $S = f(p_{\text{вс}})$ .

Параметры турбомолекулярных насосов проверяют на установке, схема которой дана на рис. 17.5.

Испытуемый насос (агрегат) прогревают в соответствии с инструкцией по эксплуатации. Одновременно для обезгаживания измерительной 2 и напускной 6 камер с установленными на них натекателями 4 и манометрическими преобразователями 3, 7 их прогревают при температуре  $\leq 673$  К.

Испытания проводят по разным газам, в качестве эталонного газа используют азот. Предельное остаточное давление измеряют после прогрева измерительной камеры и насоса. Запускают испытуемый насос (агрегат) 1 согласно инструкции по эксплуатации и контролируют частоту вращения ротора на соответствие паспортным данным. После выхода насоса на рабочий режим, не прекращая откачки, прогревают испытательную камеру и насос. По окончании прогрева измеряют предельное остаточное давление с использованием методики для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением. По этой же методике измеряют быстроту действия насоса.

#### 17.5. ИСПЫТАНИЯ ПАРОСТРУЙНЫХ НАСОСОВ (АГРЕГАТОВ)

При испытаниях пароструйных вакуумных насосов (агрегатов) дополнительно к измерению предельного остаточного давления измеряют наибольшее выпускное давление при предельном остаточном давлении и давлении всасывания, которое соответствует режиму максимальной быстроты действия.

Для испытаний сверхвысоковакуумных диффузионных насосов (агрегатов) используют установку, собранную по схеме, которая показана на рис. 17.5, без нагревателя насоса.

Предельное остаточное давление и быстроту действия сверхвысоковакуумных диффузионных насосов измеряют

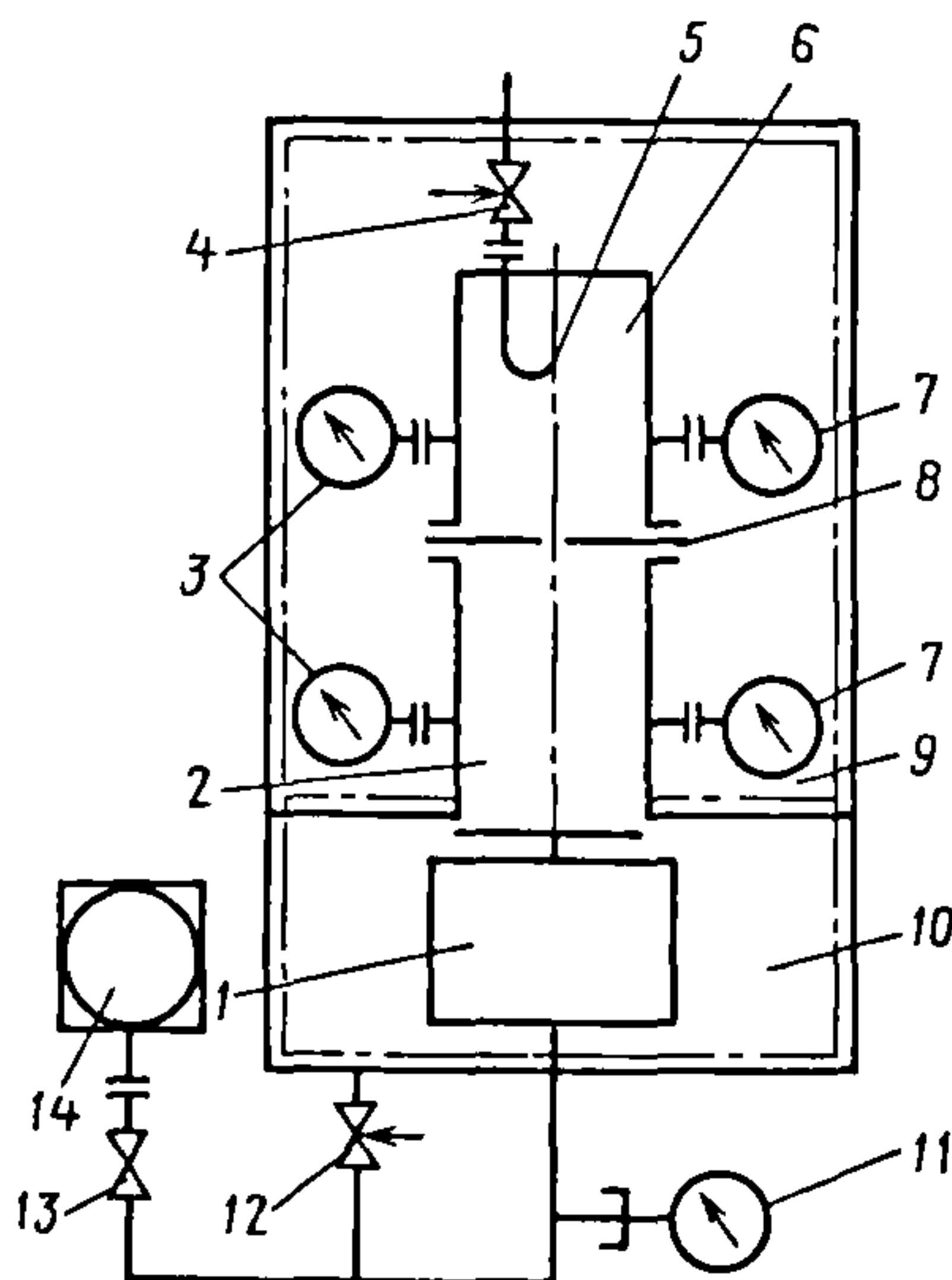


Рис. 17.5. Схема установки для испытаний турбомолекулярных и сверхвысоковакуумных диффузионных насосов и агрегатов:

1 – испытуемый насос (агрегат); 2 – измерительная камера; 3, 7 – манометрические преобразователи; 4 – натекатель камеры; 5 – напускная трубка; 6 – напускная камера; 8 – диафрагма; 9 – нагреватель камеры; 10 – нагреватель насоса; 11 – манометрический преобразователь на выходном трубопроводе; 12 – натекатель на выходном трубопроводе; 13 – клапан; 14 – форвакуумный насос



согласно методике, приведенной для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением.

Наибольшее выпускное давление при предельном остаточном давлении измеряют, изменяя давление нагнетания. Давление нагнетания, соответствующее увеличению предельного остаточного давления  $p_0$ , принимают за наибольшее выпускное давление насоса (агрегата).

Наибольшее выпускное давление при входном давлении, соответствующем максимальной производительности испытуемого насоса 1 (агрегата), измеряют аналогичным образом. Откачивают измерительную камеру до давления, в 10 раз меньше давления, соответствующего максимальной производительности насоса (агрегата). Варьируя поток газа, поступающего в измерительную камеру, устанавливают в ней давление  $p$ , соответствующее максимальной скорости действия насоса (агрегата). Изменяя давление на выходном трубопроводе, увеличивают давление в измерительной камере до  $1,5 p$ .

Давление, измеренное на выходном манометре, принимают за наибольшее выпускное давление насоса (агрегата) для режима максимальной скорости действия.

### 17.6. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТКАЧКИ (НАСОСОВ, АГРЕГАТОВ) И КРИОНАСОСОВ

Параметры геттерных насосов и крионасосов проверяют на установке, схема которой дана на рис. 17.6.

Форвакуумную систему, которая должна обеспечивать откачку установки до давления, необходимого для пуска испытуемого насоса (агрегата), следует выбирать в соответствии с инструкцией по эксплуатации насоса (агрегата). Проникновение в установку паров рабочего вещества (масла, геттера и др.) и продуктов его разложения не допускается.

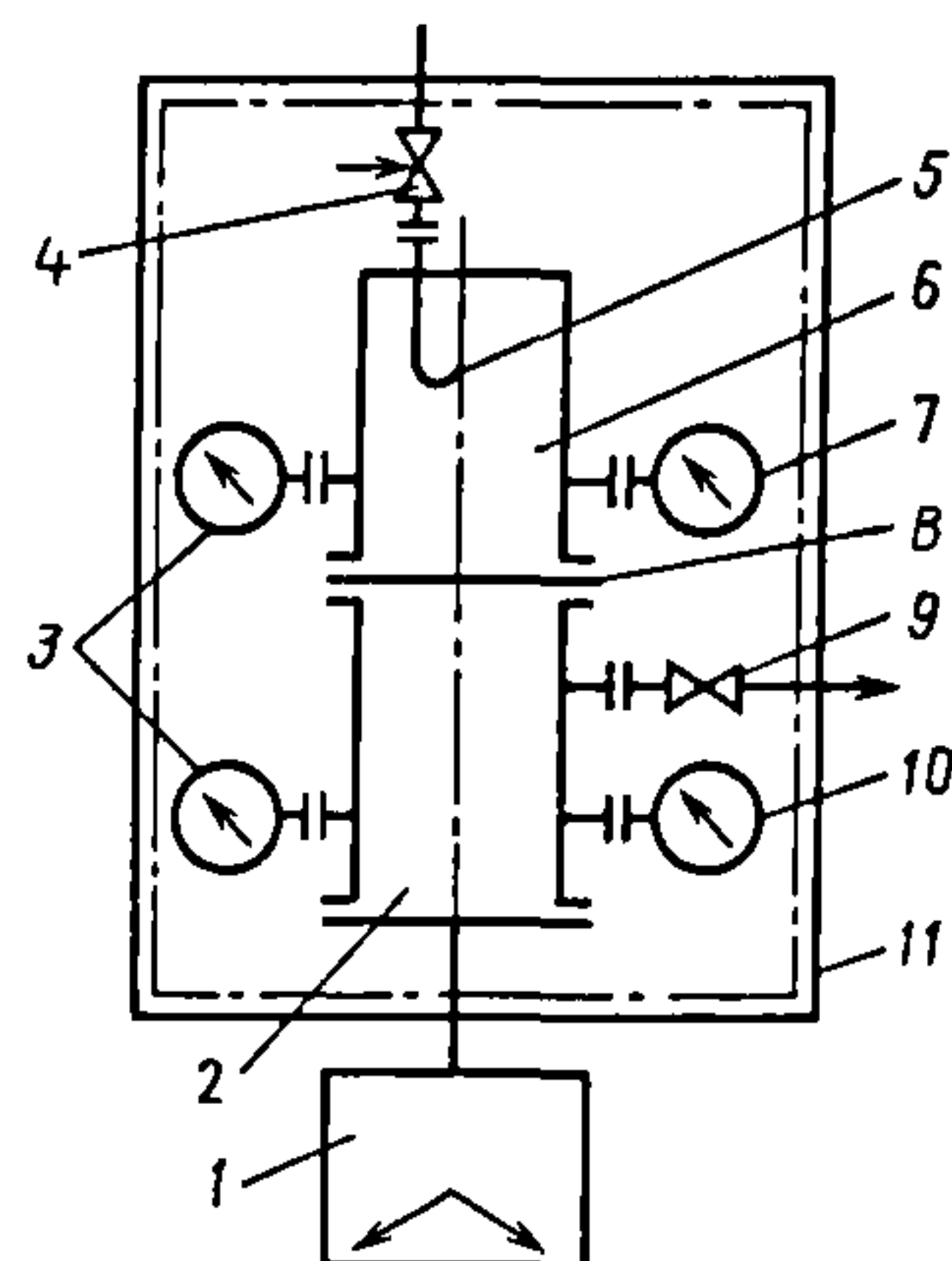


Рис. 17.6. Схема установки для испытаний геттерных насосов и крионасосов (агрегатов):

1 — испытуемый насос (агрегат); 2 — измерительная камера; 3, 7, 10 — манометрические преобразователи; 4 — натекаТЕЛЬ; 5 — иапускная трубка; 6 — напускная камера; 8 — диафрагма; 9 — клапан; 11 — нагреватель

Предельное остаточное давление измеряют аналогично измерениям для турбомолекулярных вакуумных насосов, предварительно откачивают испытательную установку форвакуумной системой.

Быстроту действия определяют после откачки измерительной камеры до предельного остаточного давления. Измеряют быстроту действия в соответствии с методикой, изложенной для турбомолекулярных насосов.

Наибольшее рабочее давление измеряют в следующем порядке. Включают испытуемый насос (агрегат) 1 (см. рис. 17.6) согласно инструкции по эксплуатации. В испытательной установке с помощью натекаТеля 4 устанавливают давление, равное предполагаемому наибольшему рабочему. Если при работе насоса (агрегата) в течение 1 ч давление в измерительной камере 2 меняется не более чем на 10 %, давление на входе насоса принимают за наибольшее рабочее давление. Если давление меняется более чем на 10 %, следует уменьшить давление в испытательной установке и повторить измерение.

Наибольшее давление запуска измеряют в следующем порядке. Включают испытуемый насос (агрегат) 1 согласно инструкции по эксплуатации. Откачивают испытательную установку до давления  $10^{-4}$  Па. Выключают насос (агрегат). Наполняют испытательную установку воздухом до атмосферного давления, открыв натекаТЕЛЬ 4. Закрывают натекаТЕЛЬ, открывают клапан 9 и откачивают испытательную установку с помощью форвакуумной системы до давления, равного ожидаемому давлению запуска.

Измеряют давление манометрическими преобразователями, установленными на измерительной камере 2. Закрывают клапан 9. Включают испытуемый насос и регистрируют время откачки испытательной установки до давления  $10^{-4}$  Па. Если время откачки составляет 7...10 мин, давление в начале откачки принимают за наибольшее давление запуска. Если время откачки  $> 10$  мин, опыт повторяют, уменьшив начальное давление в испытательной установке; при времени откачки  $> 5$  мин, опыт повторяют, увеличив давление.

Для новых или прошедших капитальный ремонт магнитных электроразрядных насосов перед испытаниями необходимо измерить предельное остаточное давление по изложенной методике. Затем следует включить испытуемый насос (агрегат) и провести тренировку, поддерживая в испытательной установке натекателем давление в пределах  $10^{-2}$ ... $10^{-3}$  Па, откачать систему в течение 2...3 ч, после чего повторить прогрев установки в течение 10 ч при температуре  $\leq 673$  К.

Испарительные геттерные и конденсационные насосы, не откачивающие инертные газы, следует испытывать с работающей дополнительной форвакуумной системой. Эффективная быстрота действия форвакуумной системы должна составлять  $\leq 15$  % от номинальной быстроты действия испытуемого насоса.

Вакуумные крионасосы проверяют на установке, схема которой дана на рис. 17.6. Предельное остаточное давление и быстроту действия измеряют согласно методике, изложенной для геттерных насосов.

### 17.7. ИСПЫТАНИЯ АДСОРБЦИОННЫХ НАСОСОВ (АГРЕГАТОВ)

Параметры адсорбционных вакуумных насосов проверяют на установке, схема которой дана на рис. 17.3.

Объем измерительной камеры (см. рис. 17.1, а) должен быть равен максимальному откачиваемому объему  $V_{\max}$  в диапазоне рабочих давлений. Между испытуемым насосом и измерительной камерой допускается устанавливать переходник (см. рис. 17.1, б).

Предельное остаточное давление измеряют по методике, разработанной для механических насосов с масляным уплотнением.

Максимальный откачиваемый объем  $V_{\max}$  в диапазоне рабочих давлений проверяют в следующем порядке. Включают испытуемый насос 1 (агрегат) согласно инструкции по эксплуатации. Откачивают измерительную камеру 2 до давления 1,33 Па; при этом через каждые 15 мин измеряют давление.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверина А.П., Левина Л.Е. Масс-спектрометрия разреженных газов. Методы и аппаратура течеискания. М.: Машиностроение, 1977. 47 с.
2. Александрова А.Т. Новые способы передачи и формирования движения в вакууме. М.: Высшая школа, 1979. 69 с.
3. Александрова А.Т., Полотай Г.А. Заготовка деталей электровакуумного производства. М.: Высшая школа, 1980. 223 с.
4. Александрова А.Т., Назаров Л.Н., Дривинг Н.Я. Исследование параметров процесса герметизации сверхвысоковакуумной арматуры с использованием жидкофазных металлических уплотнений // Электронная техника (сер. 4). 1980. Вып. 4 (81). С. 42–44.
5. Александрова А.Т., Горюнов А.А., Ермаков Е.С. и др. Вакуумные манипуляторы // Электронная промышленность. 1981. Вып. 106. № 10. С. 45–52.
6. Алешин В.И., Лубенец В.Д., Автономова И.В. К вопросу о расчете расхода газа через уплотненные маслом щелевые каналы // Изв. вузов. Машиностроение. 1976. № 12. С. 187–189.
7. Амосова Л.М., Цейтлин А.Б., Ширяев А.Т. Рабочие жидкости для вакуумных насосов. М.: ЦИНТИхимнефтемаш (ХМ-6), 1989. 28 с.
8. Арсентьев П.П., Коледов Л.А. Металлические расплавы и их свойства. М.: Металлургия, 1976. 376 с.
9. Балицкий А.В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры. М.: Энергия, 1974. 312 с.
10. Беляков И.Т., Борисов Ю.Д. Технология в космосе. М.: Машиностроение, 1974. 375 с.
11. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
12. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакция твердых тел: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 360 с.
13. Быков Д.В., Бекренев Н.В., Лясников В.Н. Нераспыляемые плазмо-напыленные газопоглотители: учеб. пособие. Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 1995. 106 с.
14. Вакуумное оборудование: каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. 60 с.
15. Вакуумное оборудование: каталог выпускаемой продукции. Казань: Изд. центр «Арт-кафе», 2001. 116 с.
16. Вакуумная техника: справочник / под общ. ред. Е.С. Фролова и В.Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
17. Вакуумная техника: справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александров и др.; под общ. ред. Е.С. Фролова и В.Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
18. Васильев Г.А. Магниторазрядные насосы. М.: Энергия, 1970. 112 с.
19. Гейнце В. Введение в вакуумную технику. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. Т. 1. 512 с.
20. Гладков А.С. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов. М.: Энергия, 1970. 505 с.
21. Глазков А.А., Малышев И.Ф., Саксаганский Г.Л. Вакуумные системы электрофизических установок. М.: Атомиздат, 1975. 288 с.
22. Глебов Г.Д. Поглощение газов активными металлами. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 184 с.
23. Голодец Г.И. Геттерогенно-каталитические реакции с участием молекулярного кислорода. Киев: Наукова думка, 1977. 203 с.
24. Грошковский Я. Техника высокого вакуума: пер. с польск. В.Л. Булата и Э.Л. Булата. М.: Мир, 1975. 624 с.
25. Гуревич Л.С. Расчет испарительных геттерных насосов. Л.: 1975. 23 с. (Препринт//НИИЭА; А = 0243).
26. Данилин Б.С., Минайчев В.Е. Основы конструирования вакуумных систем. М.: Энергия, 1971. 392 с.
27. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3-х т. / под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 2000 с.

28. Дубинский В.А., Дмитриев Р.В., Кеменов В.Н. Форвакуумная каталитическая ловушка // *Электронная промышленность*. 1988. № 6. С. 65.
29. Дубинский В.А., Лавыгин В.А. Вакуумные адсорбционные ловушки повышенной проводимости для механических вакуумных насосов // *Электронная промышленность*. 1988. № 4. С. 64–65.
30. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники / пер. с англ.; под ред. М.И. Меншикова. М.: Мир, 1964. 714 с.
31. Жмакин Г.Г. Относительная чувствительность ионизационных манометров // Всесоюз. симпоз. «Состояние и перспективы разработки и производства новых видов вакуумного оборудования»: тез. докл. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1981. Вып. 2. С. 171–172.
32. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / пер. с англ.; под ред. Б.А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 934 с.
33. Зиман А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 416 с.
34. Ильин В.Н. Основы автоматизации схмотехнического проектирования. М.: Энергия, 1979. 392 с.
35. Каталог вакуумного оборудования. Казань: ОАО «Вакууммаш», 2007. 116 с.
36. Контор Е.И. Геттерные и ионно-геттерные насосы. М.: Машиностроение, 1977. 64 с.
37. Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
38. Кузьмин В.В., Левина Л.Е., Творогов И.В. Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
39. Кучеренко Е.Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. Киев: Вища школа, 1981. 264 с.
40. Левенсон Л., Миллерон Н. Современная вакуумная техника: сб. ст. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 35 с.
41. Львов Б.Г., Шувалов А.С. Современные сверхвысоковакуумные уплотнения. М.: Высшая школа, 1984. 72 с.
42. Львов Б.Г., Шувалов А.С. Техническое обслуживание новой вакуумной коммутационно-регулирующей аппаратуры. М.: Высшая школа, 1987. 80 с.
43. Марголис Л.Я. Окисление углеводородов на геттерогенных катализаторах. М.: Химия, 1977. 321 с.
44. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. Т. III-8. Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.Т. Блохин и др.; под общ. ред. Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение. 2000. 744 с.
45. Медников М.И. Вводы движения в вакуум. М.: Машиностроение, 1974. 182 с.
46. Минайчев В.Е. Вакуумные крионасосы. М.: Энергия, 1976. 151 с.
47. Минайчев В.Е., Мирошкин С.И. Обзоры по электронной технике // Орбитронные геттерно-ионные насосы, М.: ЦНИИ «Электроника». 1970. Вып. 4 (201) (Сер. Микроэлектроника).
48. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах. Киев: Наукова думка. 196 с.
49. Номенклатурный каталог на освоенные и серийно выпускаемые изделия вакуумного машиностроения на 1989 г. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1989. 14 с.
50. Одинокое В.В. Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании. М.: Высшая школа, 1981. 55 с.
51. Передача движения в вакуум/ Е.А. Деулин, Э.П. Амосов, Ю.А. Хруничев и др. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. 58 с. (Сер. Криогенное и кислородное машиностроение).
52. Петрунин И.Е. Физико-химические процессы при пайке. М.: Высшая школа, 1972. 560 с.
53. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1970. 505 с.
54. Попов В.Ф. Магниторазрядные насосы. М.: Энергия, 1970. 112 с.
55. Попов В.Ф. Нераспыляемые газопоглотители. Л.: Энергия, 1975. 104 с.



56. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1995. 203 с.
57. Рот А. Вакуумные уплотнения: пер. с англ. М.: Энергия, 1971. 464 с.
58. Ротационные компрессоры / А.Г. Головинцев, В.А. Румянцев, В.И. Ардашов и др.; под ред. А.Г. Головинцева и В.А. Румянцева. М.: Машгиз, 1964. 314 с.
59. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
60. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
61. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении / Г.Л. Саксаганский, Ю.Н. Котельников, М.Д. Малев и др.; под ред. Г.Л. Саксаганского. М.: Атомиздат, 1976. 288 с.
62. Серня азотных форвакуумных ловушек на условные проходы  $D_y = 16, 32, 63, 100$  и  $160$  мм / В. Г. Мартыненко, В.Л. Першин, С.Ф. Гришин и др. // Вопросы атомной науки и техники. Харьков: ХФТИ АН СССР, 1980. Вып. 4 (14). С. 26–27 (Сер. Общая и ядерная физика).
63. Сильфоны / Л.Е. Андреева, А.И. Беседа, Ю.А. Багданова и др. М.: Машиностроение, 1975. 159 с.
64. Слободенюк Г.И. Квадрупольные масс-спектрометры. М.: Атомиздат, 1974. 272 с.
65. Соколов Е.А., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1970. 287 с.
66. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др.; под ред. М.П. Малкова. М.: Энергия, 1973. 392 с.
67. Таблицы физических величин / под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
68. Усюкин И.П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 296 с.
69. Физика и техника сверхвысокого вакуума: сборник; под ред. Г.Л. Саксаганского. Л.: Машиностроение, 1968. 196 с.
70. Физико-химические свойства окислов / под ред. Г.В. Самсонова. М.: Metallurgia, 1969. 455 с.
71. Фролов Е.С. Турбомолекулярные вакуум-насосы. М.: Машиностроение, 1980. 119 с.
72. Фролов Е.С., Никулин Н.К. Теоретические основы процессов высокого вакуума. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1978. 72 с.
73. Фролов Е.С., Автономова И.В., Васильев В.И. и др. Механические вакуумные насосы. М.: Машиностроение, 1989. 284 с.
74. Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. М.–Л.: Энергия, 1965. 396 с.
75. Чайлдс У. Физические постоянные: пер. с англ. М.: Физматлит, 1962. 76 с.
76. Jones D.W., Tsonis C.A. J. Vac. Sci. Technol. 1964. N 1. P. 17–32.
77. Liu B.X., Jang Z.J. An Investigation of the characteristics of different Sorbents for Trapping oil Molecules. Proc. 8th Int. Vac. Congr., Cannes, 1980. V. 2.
78. Richman J. Consideration in Utilization of Large Mechanical Vacuum Pumping Systems, Ind. Heat, 1986, 53, N 6, pp. 18–20.
79. Sawada T., Suzuki M., Taniguchi O. The axial molecular pump. P. I / sehent. Papers Inst. Phys. and Chem. Res., 1968, N 2. P. 49–64.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

- Авогадро закон 36
  - число 31, 36
- Агрегат вакуумный 15
  - двухроторный 317
  - золотниковый 358
  - пароструйный диффузионный 432
  - ротационный 348
  - титановый охлаждаемый
  - цеолитовый 513
  - электродуговой 461, 464
- Адиабата 39, 45
- Адсорбент 513
- Аккомодация 47
- Алгоритм расчета
  - проводимости статистическим методом 63
  - проектировочного 322, 353, 401
- Анализатор ионов 543
- Арматура
  - запорно-регулирующая 172
  - затворы 15, 185
  - клапаны 15, 176, 177, 189
  - натекатели 190
  - предохранительные и напускные устройства 191, 196
  - распределительные устройства 212

### Б

- Баллон предохранительный 15
  - уравнительный 15
- Барометрическая формула 39
- Бойля–Мариотта закон 38
- Больцмана постоянная 31
- Быстрота действия вакуумного насоса 14
  - откачки 14
  - адсорбционного слоя 519
  - эффективная 14

### В

#### Вакуум

- высокий 11
- низкий 11
- сверхвысокий 11
- средний 11

#### Вакуумметр

- абсолютный 19, 522
- градуировка 19
- деформационный 19, 526
  - мембранный 19, 528
  - емкостный 530
  - оптико-механический 526
  - тензометрический 526
- сильфонный 529
- трубчатый 527
- дифференциальный 525
- ионизационный 20, 536
  - магнитный электроразрядный 20, 540
  - инверсно-магнетронный 536
  - магнетронный 20, 536
  - Пеннинга 20, 536
- радиоизотопный 20, 536
- электронный 20, 536
  - Байярда–Альперта 537
  - экстракторный 20
- парциального давления 543
  - динамический 549
  - времяпролетный (хронотрон) 21
    - квадрупольный 21, 550
    - монополярный 21, 551
    - омегатронный
    - радиочастотный 21, 552, 547
  - статический 548
  - панорамный (фарвитрон) 544
- погрешность измерений 522
- полного давления 19
  - вязкостный 19, 536
  - жидкостный 19, 523
    - компрессионный (Маклеода) 19
  - U-образный 19
  - с закрытым коленом 523
  - с открытым коленом 523
- тепловой 532
  - терморезисторный 532
  - термпарный 532
  - термомолекулярный (радиометрический) 535
- чувствительность 544



- Вакуумметрия** 19  
**Вакуумная аппаратура** 172  
**Вакуумное сопротивление** 13  
**Вакуумные свойства материалов** 117  
**Вводы вакуумные** 16, 213  
– механические 220  
– – защитные устройства 248  
– – конструкции 221, 223, 224  
– – манипуляторы 227  
– схемы передачи движения 214  
– оптические (окна) 245  
– – классификация 246  
– – конструкции 246, 247, 248, 251  
– электрические 239  
– – высоковольтные 240, 244  
– – высокочастотные 240  
– – низковольтные 240, 244  
**Вероятность перехода молекул газа** 59, 366  
– через межлопаточные каналы 366  
– через вакуумное сопротивление 59  
**Вещество пробное** 21, 553  
– жидкость 563  
– газ 563  
**Воздух атмосферный** 30  
– парциальное давление компонентов 31  
– состав 30  
**Время**  
– выхода на рабочий режим 14  
– непрерывной работы 513  
– откачки 12  
– охлаждения 513  
– регенерации адсорбента 517  
**Вязкость газов** 44  
– динамическая 45, 54  
– кинематическая 425
- Г**  
**Газ** 12  
– – основное уравнение состояния 38  
– нормальное состояние 31, 38  
– остаточный 12  
– пробный 21, 563  
– разреженный 12  
– – режимы течения 52  
– – – вязкостный 52  
– – – молекулярные 56  
– – – переходный 62  
– – скольжение 48
- Газовыделение** 14, 117  
**Газокинетические параметры** 32  
**Гей-Люссака закон** 38  
**Генри уравнение** 517  
**Герметичность** 21  
– норма 21  
**Геттер** 102, 460  
– испарение нагревом 480  
– – резистивным 480  
– – электронно-лучевым 480  
– испарение электродуговое 480  
– классификация 461  
– методы нанесения в вакууме 460  
– распыление высокоэнергетичными ионами 468, 487  
– физические свойства 467  
**Гребенка** 15  
– условное обозначение 25
- Д**  
**Давление** 12  
– газа атмосферное 12  
– – абсолютное 12  
– – парциальное 12  
– запуска вакуумного насоса наибольшее 14  
– наибольшее выпускное вакуумного насоса 14  
– остаточное предельное 12  
– рабочее 14  
– – диапазон 522
- Дальтона закон** 39  
**Диффузия в газах** 13  
**Длина свободного пути частицы** 12  
– средняя 12  
– эффективная 13  
**Дубинина–Радужкевича уравнение** 517
- Е**  
**Емкость сорбционная** 116

**Ж****Жидкость**

- рабочая насосов 362
- – бустерных 417
- – диффузионных 424
- – механических 362
- – струйных 406

**З****Закон**

- Авогадро 38
- Бойля – Мариотта 38
- Гей-Люссака 38
- Дальтона 39
- Максвелла 40
- Пуазейля 54
- – диффузный 47
- – косинусов 47
- – Фурье 43

**Замазка вакуумная****Заряд электрона 31**

- иона 543

**Затворы вакуумные 185**

- конструкции 188, 189
- характеристики 186, 187, 188

**Звенья герметизирующие****гибкие 269**

- диафрагма резиновая 270
- компенсатор 270
- сильфоны 270
- – конструкции 270, 273
- – основные параметры 271

**И****Измерения**

- быстроты действия 575
- давления 522
- газового потока 574
- – наибольшего выпускного 577
- – наибольшего запуска насоса 577
- – парциального 543
- – полного 522
- – предельного остаточного 575

**Измерительный блок****вакуумметра 19****Ионизатор 536****Испытания**

- на герметичность 553
- средств откачки 573

**К****Камеры вакуумные 159**

- измерительные 573
- классификация 159
- конструктивные элементы 160, 161, 163
- – днища 162
- – защитные экраны и криопанели 509
- – крышки 164
- – обечайки 160
- – теплоизоляция 166
- – теплообменники 164
- расчет на прочность 168
- сверхвысоковакуумные 168
- условные обозначения 27

**Кассета адсорбционная****Клапан вакуумный 176**

- конструкции 177, 179, 181, 184
- – запорный 177
- – напускной 189
- – предохранительный 189
- – прогреваемый 176
- – прямопролетный 184
- – регулировочный 190
- – угловой 177, 179, 181
- требования и характеристики 173, 174, 175
- уплотнительные пары 173

**Клаузинга коэффициент 55**

- значения для трубопроводов 55, 58, 59, 60, 61
- формула 57

**Кнудсена число 52****Коллектор ионов 536****Компенсатор резиновый  
лизовый 270****Константы физические 31**

- основные для газов 31

**Концентрация газа****молекулярная 38****Коэффициент аккомодации 47**

- диффузии 46
- захвата 462
- Клаузинга 55



- откачки 285
  - поправочный на потерю массы 32
  - регенерации 517
  - скольжения 48
  - теплопроводности 43
  - эжекции объемный 414
- Крионасосы** 505

**Л****Ловушки** 16, 433

- высоковакуумные 16, 445
  - – адсорбционные 445
  - – механические 281
    - – – принципиальные схемы 435
  - – низкотемпературные 440
- защитная способность 435
- классификация 436
- конденсационная 16, 440
- сорбционная 16, 445
- условное обозначение 24
- форвакуумные 16
  - – адсорбционные 24
  - – низкотемпературные 24
  - – термоэлектрические 16

**Лошмидта число** 31**М****Максвелла закон** 40

- распределение 40
- уравнение 40

**Маслоотражатель** 423**Масса молекулярная** 38

- молярная 38
- электрона 31
- иона 543

**Массовое число иона** 543**Масс-спектрометрия** 543**Масс-спектрометры** 543

- динамический 549
- статический 548
  - – импульсный времяпролетный (хронотрон) 544
  - – квадрупольный 550
  - – монополярный 551
  - – радиочастотный (топатрон) 547
  - – резонансный радиочастотный (омегатрон) 549
  - – панорамный (фарвитрон) 544

**Материалы вакуумных систем** 78

- металлы и сплавы 84
  - – драгоценные 96
  - – легкоплавкие 94
  - – стали 79
    - – – жаропрочные 81
    - – – коррозионно-стойкие 81
    - – – легированные 81
    - – – углеродистые 79
    - – – хладостойкие и криогенные 83
  - – титан и его сплавы 84
  - – тугоплавкие 85
  - – цветные 86
  - – чугуны 79
- неметаллы 87
  - – керамики 87
  - – клеи 93
  - – пластмассы 90
  - – резины 91
  - – ситаллы 87
  - – стекло 87

**Машина холодильная газовая** 520**Методы контроля герметичности**

- аммиачный (химический) 558
- высокочастотного разряда (искровой) 558
- галогенный 558, 570
- катарометрический 558
- люминесцентный и цветной 558
- манометрический 557, 562
- масс-спектрометрический 557, 563
  - – накопления 564
  - – обдува 564
  - – с применением барокамеры 564
    - – – вакуумных присосок 564
    - – – гелиевых чехлов (камер) 564
    - – – щупа 564

**Методы определения проводимости**

- статистических испытаний 63
- угловых коэффициентов 71
- экспериментальный 51

**Н****Нагрузки тепловые** 508**Насос вакуумный** 16, 23, 26, 281

- бустерный 16, 415

- высоковакуумный 16, 362, 421, 460, 505
- газобалластный 17, 23
- многоступенчатый 16, 17
- низковакуумный 16
- одноступенчатый 16
- предварительного разрежения 16
- форвакуумный 16

**Насос вакуумный**

- газоперекачивающий** 16
  - механический 16, 23, 281
    - – – – – объемного действия 17
    - – – – – вращательный 17
    - – – – – трохонидный 17
  - – – – – кинетический 17
  - – – – – молекулярный 17
  - – – – – турбонасос 18
- струйный 18, 23, 104
  - – газоструйный 18
  - – жидкостно-струйный 18

**Насос вакуумный**

- газоулавливающий** 18
  - сорбционный 18, 513
  - адсорбционный 18, 513
    - – геттерный 460
    - – – – – геттерно-ионный 460
  - конденсационный 505
    - – высоковакуумный 505
    - – низковакуумный 512
  - конденсационно-адсорбционный 514
  - криозахватный 507
  - – электрофизический 460

**Насосы вакуумные**

- водокольцевые 289
- двухроторные 17, 304
  - – испытания 575
- диффузионные 421
  - – испытания 576
  - – рабочие жидкости 424
  - – условное обозначение 27
- жидкостно-кольцевые 17, 289
- испарительные геттерные 480
  - – электродуговые 480
- комбинированные 503
- магнитные электроразрядные 8, 487

- магнитные электроразрядные 487
- орбитронные 486
- пароструйные бустерные 415
- пластинчато-роторные 17, 339
  - – – – – испытания 574
- пластинчато-статорные 17, 339
- плунжерные 17, 356
- поршневые 17, 281
  - – – – – испытания 574
- с масляным уплотнением 339
  - – – – – выбор рабочей жидкости 341
  - – – – – испытания 574
- турбомолекулярные 17, 362
  - – – – – испытания 576
  - – – – – условное обозначение 23
- эжекторные 407
  - – парозежекторные 407

**Натекание** 14**Натекатель** 190

- конструкция 190, 191, 193
- принцип действия 190
- условное обозначение 26

**О****Обезгаживание** 576**Окна вакуумные** 245

- защитные устройства 248
- классификация 246
- конструкции 246, 247, 248, 251

**Опрессовка** 21**Орбитроны** 486**Откачка** 12**П**

- Пенинга 20
- вакуумметр 20, 536
- разряд 20, 536
- ячейка 536

**Плотность газа** 12

- насыпная сорбента 519

**Поверхность криогенная** 505**Погрешность измерений** 522**Покрывания твердосмазочные** 96**Пост откачной** 15



**Постоянная**

- газовая универсальная 31
- Планка 31

**Поток жидкости 404**

- газа 13
- обратный 422
- паров рабочей жидкости 407
- результирующий молекул 13, 366
- тепловой 43

**Преобразователь давления 522****Пробный газ 21, 563****Проводимость 13**

- метод расчета 56, 63
- – статистический 63
- – угловых коэффициентов 71
- пример расчета элемента вакуумной системы 69

**Производительность вакуумного насоса 14****Проход условный 22****Р****Рабочее вещество 21****Радиационное излучение 71****Радиоизотопный ионизационный вакуумметр 20, 536****Радиочастотный****масс-спектрометр 547, 549****Разреженный газ 12****Разрешающая способность 544****Разъемные соединения 133****Распыление ионное катодных пластин 487****Расход испаряемого геттера 482**

- рабочей жидкости 229

**Расчет**

- времени откачки 67
- на прочность цилиндрической обечайки 168
- проводимости сложного трубопровода 69
- размеров колеса ТМН 376
- тепловой 286

**Режим течения газа**

- вязкостный 52

- молекулярный 56

- переходный 62

**Резины вакуумные 91****Ряд нормальных размеров 22****С****Сварка в вакууме 124****Сечение насоса входное 14****Сильфоны 270****Система вакуумная 15**

- централизованная, расчет 66

**Скачок температурный 49****Скорость света в вакууме 31**

- движения молекул 40
- – наиболее вероятная 41
- – средняя арифметическая 42
- – средняя квадратичная 42
- – тепловая 42

**Смазка вакуумная 96****Смазочные масла и гели 96****Соединения вакуумные****Герметичные 123**

- классификация 123
- неразъемные 124
- – клееные 131
- – паяные 128
- – сварные 124
- – с эпоксидными смолами 131

**– подвижные 213**

- – манжеты 214

- – уплотненные 214

- – – жидкими металлами 152

- – – маслами 215

- – – прокладками из вакуумплотных материалов 220

- – шлифованные и притертые 216

**– разъемные 133, 152**

- – герметичные муфтовые 136, 270

- – фланцевые 136

- – штуцерно-ниппельные 135

- – штуцерные 134

**Сопротивление элемента вакуумной системы 13****Сорбент 14**

- плотность 519

- – насыпная 519

- Сорбция** 14
- Сосуд Дьюара**
- откачиваемый 24
  - условное обозначение 24
- Спектр остаточных газов** 543
- Средства откачки**
- газоперекачивающие 16
  - газоулавливающие 18
  - конденсационные 505
  - механические 16, 23, 281
  - сорбционные 13, 513
  - электрофизические 460
- Степень негерметичности** 21
- Стефана–Больцмана**
- постоянная** 31
- Ступень вакуумного насоса** 16
- ТМН 363
- Схема вакуумная**
- принципиальная** 22
- буквенные коды элементов 26
  - правила выполнения 22
  - примеры выполнения 28
- Сюзерленда постоянная** 43
- Т**
- Теплопроводность газов** 43
- Техника вакуумная** 11
- основное уравнение 52
  - термины и определения 11, 51
- Течеискание** 553
- методы контроля герметичности 557
  - галогенный 558
  - искровой 558
  - катарометрический 558
  - люминесцентный 558
  - манометрический 557, 562
  - масс-спектрометрический 55
  - течеискатель
  - катарометрический 558
  - масс-спектрометрический 557, 563
  - порог чувствительности 564
  - чувствительность 562
- Течение газа** 13
- вязкостное 13
  - ламинарное 13
  - молекулярное 13
  - молекулярно-вязкостное 13
  - Пуазейлевское 13
  - турбулентное 13
  - эффузионное 13
- Температурная транспирация** 535
- Течь** 553
- внутренняя 556
  - калиброванная 564
- Толщина слоя конденсата** 512, 513
- Трение вязкостное** 44
- Трубопровод** 15
- вакуумный 15
  - байпасный 15
  - условное обозначение 35
  - форвакуумный 15
- У**
- Углеродные сорбенты** 514
- Удельная быстрота действия** 512
- проводимость 519
  - сорбционная емкость 517
- Уплотнение вакуумное**
- бесфланцевое торцовое 123
  - Вильсона 221
  - металлическое 133
  - резиновое 133
  - с использованием вязкого трения 213
- Уравнение вакуумной техники**
- основное** 52
- Генри 517
  - Дубинина–Радужкевича 517
  - Максвелла 40
- Уровень температурный**
- криопанели** 508
- Установка вакуумная** 15
- Условный проход** 22
- ряд нормальных размеров 22
- Устройства вакуумные**
- дозаторные 252
  - загрузочные 252
  - защитное 245
  - нагревающие 164
  - напускные 190, 193
  - охлаждающие 164
  - распределительные 193



Утечка 21

Ф

Форвакуум 12

Физические постоянные 31

Х

Характеристика

градуировочная 531, 532

– откачная 511

Ц

Цеолит 444

Цеолитовый вакуумный насос  
514

– ловушка 445

Ч

Чувствительность вакуумметров  
21

– – ионизационных 536

– – магнитных электроразрядных  
540

– – радиоизотопных 540

Чувствительный элемент 522

Ш

Шланг вакуумный 91

Шлиф 15

Э

Экран теплозащитный 510

– пористый 514

– шевронный 510

Элементы вакуумной системы 15

– проводимость 13, 51

– условные обозначения 23

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Демихов Константин Евгеньевич,  
Панфилов Юрий Васильевич,  
Никулин Николай Константинович и др.**

## **ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА**

Редактор *А.П. Лебедева*  
Художественный редактор *К.Ю. Подживотов*  
Корректор *М.Я. Барская*  
Инженеры по компьютерному  
макетированию: *Н.И. Смольянина, Г.Ю. Корабельникова*

Сдано в набор 16.09.08 г. Подписано в печать 25.06.09 г. Формат 70 × 100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 48,1. Уч.-изд. л. 49,2. Тираж 2000 экз. Заказ 1162

ООО "Издательство Машиностроение"  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4. [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета в ГУП ППП «Типография «Наука» РАГ  
121099, г. Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-94275-436-5



9 785942 754365