

Джон Бёрд

Карманный
справочник

 Newnes

Физика.

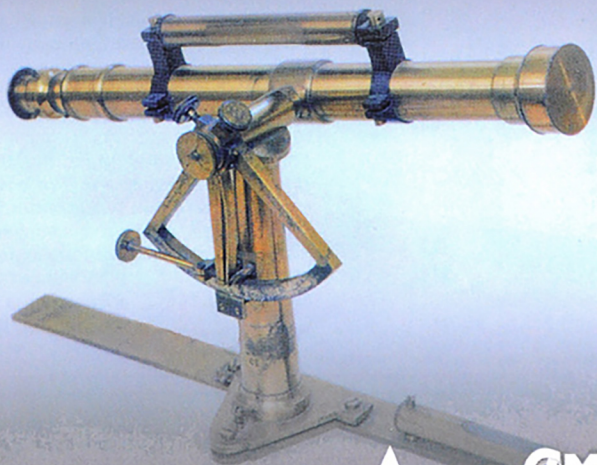
От теории к практике

Книга 1

Механика

Оптика

Термодинамика



 ОДЭКА

 ДМК
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Карманный справочник

**ФИЗИКА.
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ**

Книга 1

Механика

Оптика

Термодинамика



МОСКВА
Издательский дом «Додэка-XXI»

J o h n B i r d

N e w n e s

Engineering

Science

P o c k e t B o o k

Third edition

 **Newnes**

Д ж о н Б ё р д

К а р м а н н ы й с п р а в о ч н и к

Физика.

**От теории
к практике**

Книга 1

Механика
Оптика
Термодинамика



УДК 53(035)

ББК 22.3я2

Б48

Бёрд Дж.

Б48 Физика. От теории к практике. В 2 кн. Кн. 1: Механика, оптика, термодинамика: Карманный справочник/Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI». — 256 с.: ил. (Серия «Карманный справочник»)

ISBN 978-5-94120-076-4

В популярном справочнике «Физика. От теории к практике» (перевод британского справочника «Newnes Engineering Science», выдержавшего три издания) представлены методы, формулы, диаграммы и справочные данные основных разделов физики.

Для удобства читателей в русском варианте справочник издаётся в двух книгах. Первая содержит сведения по механике (с элементами сопротивления материалов, деталей машин и механизмов), оптике, термо- и гидродинамике. Вторая посвящена электричеству и магнетизму (с элементами электротехники, электроники и радиотехники). Справочник уникален, его характерной особенностью является нечасто встречающееся в отечественной литературе сочетание теоретических положений с их практическим применением. Большое место в справочнике занимает описание всевозможных устройств, предназначенных для измерения температуры, давления жидкостей и газов, твёрдости материалов, скорости и объёма движущихся жидкостей и газов и т. д.

Справочник предназначен широкому кругу читателей — студентам, учащимся технических колледжей, инженерам и всем, интересующимся техникой. Он особенно полезен практикам, желающим повысить уровень теоретических знаний, а также позволяет в необходимых случаях освежить свой научный багаж и вспомнить полузабытые формулы.

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

This edition of Newnes Engineering Science Pocket Book by John Bird is published by arrangement with Elsevier Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, England.

ISBN 0-7506-4991-7 (англ.)

© John Bird

ISBN 978-5-94120-076-4 (рус.)

© Издательский дом «Додэка-XXI»

® Серия «Карманный справочник»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть первая. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛЬНЫХ ТЕЛ	13
1. Единицы величин в системе СИ	14
Единицы величин	14
Приставки	14
Длина, площадь, объём	15
Масса и плотность вещества	16
2. Производные единицы величин в системе СИ	18
Электрический заряд	18
Сила	18
Работа, энергия	18
Мощность	19
Электрический потенциал и ЭДС	19
3. Скалярные и векторные величины	20
Скаляры и векторы	20
Обозначения векторов	21
4. Структура и свойства вещества	23
Элементы	23
Атомы	23
Молекулы	24
Химические соединения	24
Смеси	25
Растворы	25
Суспензии	26
Растворимость	26
Кристаллы	26
Металлы и сплавы	28
5. Химические реакции	29
Кислород	29
Коррозия	29
Химические уравнения	30
Кислоты и щёлочи	30
Основные свойства кислот	32
Основные свойства щелочей	32
6. Символьные обозначения величин и их единиц	33

Часть вторая. ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ К ТЕХНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВАМ	37
7. Скорость: величина и направление	38
Скорость	38
График «путь/время»	38
График «скорость/время»	39
Векторная скорость	40
8. Ускорение	43
График «векторная скорость/время»	43
Свободное падение и уравнение движения	44
9. Сила, масса и ускорение	46
Воздействие силы на физические тела	46
Законы движения Ньютона	46
Центростремительное ускорение	49
10. Центр тяжести и равновесие	51
Центр тяжести	51
Равновесие	51
11. Силы, приложенные к одной точке	53
Силы	53
Равнодействующая двух компланарных сил	53
Правило треугольника сил	54
Правило параллелограмма сил	55
Расчет равнодействующей двух компланарных сил	56
Равнодействующая трёх компланарных сил	57
Компланарные силы в равновесии	59
Разложение сил	60
Заключение	63
12. Простые закреплённые балки	64
Момент силы	64
Равновесие и равенство моментов	64
Простые закреплённые балки с точечными нагрузками	66
13. Силы сдвига и изгибающий момент	68
Силы сдвига	68
Изгибающий момент	68
14. Напряжение при изгибе	72
15. Прямолинейное и вращательное движение	75
Линейная и угловая скорости	75
Радиян	75
Линейная скорость	75
Угловая скорость	76
Линейное и угловое ускорение	77
Другие уравнения движения	79
Относительная векторная скорость	81

16. Трение	83
Сила трения	83
Коэффициент трения	83
Использование трения	84
Положительные и отрицательные стороны сил трения	85
Практическое применение	85
17. Волны	86
Волновое движение	86
Типы волн	86
Длина волны, частота и скорость распространения	87
Отражение и рефракция	87
Звуковые волны и их характеристики	88
18. Интерференция и дифракция	90
Интерференция	90
Дифракция	91
Дифракция рентгеновского излучения	94
19. Световые лучи	96
Отражение света	96
Простейший перископ	96
Рефракция света	97
Линзы	97
Выпуклые линзы и их применение	99
Вогнутые линзы	101
Микроскоп	102
Простейший проектор	102
20. Работа, энергия и мощность	104
Работа	104
Энергия	105
Некоторые примеры преобразования энергии	105
Мощность	107
21. Потенциальная и кинетическая энергия	108
Потенциальная энергия	108
Кинетическая энергия	109
Закон сохранения энергии	109
Кинетическая энергия вращения	110
Маховики	112
22. Простые машины	114
Машины	114
Отношение сил, отношение движения и коэффициент полезного действия	114
Блоки	116
Винтовой домкрат	118
Зубчатая передача	119
Рычаги	121

23. Механическое воздействие силы на твёрдое тело	124
Виды механического воздействия на тело	124
Растяжение	124
Сжатие	124
Сдвиг	125
Напряжение	125
Линейная деформация	126
Напряжение сдвига и деформация сдвига	126
Напряжение кручения и деформация кручения	127
Упругость и предел упругости	129
Закон Гука	130
Модуль Юнга	130
Жёсткость	130
Вязкость, хрупкость и ковкость	132
24. Испытание на прочность	133
25. Испытание на твёрдость и ударную вязкость	137
Твёрдость	137
Испытания на твёрдость	137
Метод Бринелля	137
Метод Виккерса	139
Метод Роквелла	139
Другие методы испытаний на твёрдость	139
Неразрушающие методы	140
Испытания на ударную вязкость	140
Метод Изода	140
Метод Шарпи	141
26. Измерение напряжения	142
Линейная деформация	142
Напряжение	142
Модуль упругости Юнга	142
Предел упругости	143
Необходимость измерения напряжения	143
Тензометры	144
Тензометр Линдлея	144
Тензометр Гугенберга	145
Тензометр Хоунсфильда	146
Датчики деформации	147
27. Количество движения и импульс силы	150
Количество движения (импульс тела)	150
Импульс силы и импульсные силы	151
28. Момент силы	154
Пара сил и момент силы	154
Совершённая работа и мощность, передаваемая постоянным моментом силы	155

Передача мощности с помощью ременного привода	157
Плоские и V-образные ремни	158
29. Тепловая энергия	162
Теплота и температура	162
Измерение температуры	162
Удельная теплоёмкость	163
Изменение состояния	164
Скрытая теплота плавления и парообразования	165
Принцип работы простейшего холодильника	166
Проводимость, конвекция и излучение	166
Теплопроводность	166
Практическое применение теплопроводности	166
Конвекция	167
Примеры конвекции	167
Излучение	167
Примеры теплового излучения	168
Вакуумный термос	168
Применение изоляции для сохранения тепла в помещениях	169
30. Термическое расширение	170
Практическое применение термического расширения	170
Расширение и сжатие воды и других жидкостей	171
Коэффициент линейного расширения	171
Коэффициент поверхностного расширения	172
Коэффициент объёмного расширения	173
31. Измерение температуры	174
Стеклянный жидкостный термометр	174
Устройство	174
Принцип действия	175
Преимущества	175
Недостатки	175
Достоинства и недостатки ртути и спирта	175
Ошибки измерения	176
Термопары	176
Принцип действия	176
Устройство	177
Применение	178
Преимущества	178
Источники ошибок	179
Резистивные термометры	179
Устройство	179
Принцип работы	180
Ограничения	181

Достоинства и недостатки платиновой катушки	181
Применение	182
Термисторы	182
Преимущества	182
Пирометры	182
Пирометр общего излучения	183
Оптические пирометры	184
Достоинства пирометров	184
Недостатки пирометров	185
Краски и мелки, отображающие температуру	185
Биметаллические термометры	186
Металлический ртутный термометр	186
Газовые термометры	187
32. Давление в текучих средах	188
Давление	188
Давление в текучих средах	188
Атмосферное давление	189
Закон Архимеда	190
Измерение давления	191
Подробнее о гидростатическом напоре	192
33. Измерение давления	196
Введение	196
Барометры	196
Устройство и принцип работы	197
Типы барометров	198
Абсолютное и манометрическое давление	199
Манометр	200
Манометр в виде U-образной трубки	200
Наклонные манометры	201
Манометр Бурдона	202
Вакуумные манометры	204
Манометр Маклеода	204
Манометр Пирани	204
34. Законы идеального газа	205
Закон Бойля—Мариотта	205
Закон Гей-Люссака	206
Закон Шарля	206
Закон парциального давления (Закон Дальтона)	207
Характеристическое уравнение состояния идеального газа	208
Кинетическая теория газов	209
35. Свойства воды и пара	211
Закон сохранения энергии	211
Внутренняя энергия	211

Энтальпия и удельная энтальпия	212
Удельная энтальпия воды	212
Насыщенный пар	213
Коэффициент влажности	213
Ненасыщенный пар	213
График «температура/удельная энтальпия»	214
Таблицы параметров парообразования	214
36. Поверхностное натяжение и вязкость	217
Поверхностное натяжение	217
Избыточное давление	219
Энергия разрыва межмолекулярных связей	220
Молярная скрытая энергия испарения	220
Вязкость	221
Формула Пуазейля	222
Закон Стокса	223
37. Текучие среды в движении	225
Уравнение Бернулли	225
Поток через отверстия	227
Удар струи	228
38. Измерение потоков жидкостей и газов	230
Дифференциальные расходомеры	230
Измерительная диафрагма	231
Устройство	231
Принципы работы	232
Достоинства измерительных диафрагм	232
Недостатки измерительных диафрагм	232
Применение	233
Трубка Вентури	233
Устройство	233
Достоинства трубки Вентури	234
Недостатки трубки Вентури	234
Расходомерное сопло	234
Трубка воздушных давлений (Дифференциальная трубка Пито—Прандтля)	235
Применение	236
Достоинства трубок воздушных давлений	236
Недостатки трубок воздушных давлений	236
Механические расходомеры	237
Расходомер с поворотной лопастью	237
Турбинные измерители	237
Поплавковый расходомер с конической трубкой	239
Принцип работы	239
Достоинства поплавкового расходомера	240

Недостатки поплавкового расходомера	240
Применение	240
Электромагнитный расходомер	241
Основные достоинства электромагнитных расходомеров	241
Применение	242
Термоанемометр проволочный	242
Достоинства проволочного термоанемометра	242
39. Простое гармоническое движение и собственные колебания	243
Простое гармоническое движение	243
Колебания витой пружины	245
Колебания маятника	247
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	249

Часть первая

Физические

величины

и свойства

материальных

тел

1. ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМЕ СИ

Единицы величин

Единицы величин, применяемые в науке и технике, образуют международную систему единиц (Système Internationale d'Unités), обозначаемую аббревиатурой СИ (SI в латинской транскрипции. — *Прим. переводчика*). Утвержденная в 1960 году Генеральной конференцией по мерам и весам, эта система, основанная на метрической системе, в настоящее время официально признана в большинстве стран мира.

Ниже перечислены *основные единицы величин* системы СИ и их краткое обозначение.

Величина	Единица величины	Обозначение	
		международное	русское
Время	секунда	s	с
Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Сила электрического тока	ампер	A	А
Количество вещества	моль	mol	моль
Сила света	кандела	cd	кд
Термодинамическая температура	кельвин	K	К

Приставки

Единицы величин системы СИ можно увеличивать или уменьшать с помощью приставок, обозначающих либо умножение, либо деление базовой единицы на определённое число. Ниже перечислены двенадцать основных множителей и их обозначения.

Приставка	Сокращенное обозначение		Множитель
	международное	русское	
тера	T	Т	$\times 1\,000\,000\,000\,000$, или $\times 10^{12}$
гига	G	Г	$\times 1\,000\,000\,000$, или $\times 10^9$
мега	M	М	$\times 1\,000\,000$, или $\times 10^6$
кило	k	к	$\times 1\,000$, или $\times 10^3$
гекто	h	г	$\times 100$, или $\times 10^2$
дека	da	да	$\times 10$, или $\times 10^1$
деци	d	д	$\times 0,1$, или $\times 10^{-1}$
санти	c	с	$\times 0,01$, или $\times 10^{-2}$
милли	m	м	$\times 0,001$, или $\times 10^{-3}$
микро	μ	мк	$\times 0,000\,001$, или $\times 10^{-6}$
нано	n	н	$\times 0,000\,000\,001$, или $\times 10^{-9}$
пико	p	п	$\times 0,000\,000\,000\,001$, или $\times 10^{-12}$

Длина, площадь, объём

Длина — это расстояние между двумя точками. Единица длины — *метр* [м], однако, очень часто применяют его дольные и кратные значения: сантиметр [см], миллиметр [мм] и километр [км].

$$1 \text{ см} = 10 \text{ мм.}$$

$$1 \text{ м} = 100 \text{ см, или}$$

$$1 \text{ м} = 1\,000 \text{ мм.}$$

$$1 \text{ км} = 1\,000 \text{ м.}$$

Площадь — величина, характеризующая размеры поверхности. Площадь поверхности прямоугольной фигуры, например, вычисляется умножением длины одной стороны на длину другой. Если длины сторон представлены в метрах, то единица площади в этом случае — *квадратный метр* [м²].

$$1 \text{ м}^2 = 1 \text{ м} \times 1 \text{ м.}$$

$$1 \text{ м}^2 = 100 \text{ см} \times 100 \text{ см, или}$$

$$1 \text{ м}^2 = 10\,000 \text{ см}^2, \text{ или}$$

$$1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2.$$

$$1 \text{ м}^2 = 1\,000 \text{ мм} \times 1\,000 \text{ мм, или}$$

$$1 \text{ м}^2 = 1\,000\,000 \text{ мм}^2, \text{ или}$$

$$1 \text{ м}^2 = 10^6 \text{ мм}^2.$$

Соответственно

$$1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Объём — величина, характеризующая пространство, занимаемое телом. Объём тела, ограниченного прямоугольными гранями, определяется тремя отрезками прямой линии (длиной, шириной и высотой) и вычисляется их перемножением. Если размеры представлены в метрах, то единица объёма в этом случае — *кубический метр* [м³].

$$1 \text{ м}^3 = 1 \text{ м} \times 1 \text{ м} \times 1 \text{ м.}$$

$$1 \text{ м}^3 = 100 \text{ см} \times 100 \text{ см} \times 100 \text{ см, или}$$

$$1 \text{ м}^3 = 10^6 \text{ см}^3.$$

$$1 \text{ м}^3 = 1\,000 \text{ мм} \times 1\,000 \text{ мм} \times 1\,000 \text{ мм, или}$$

$$1 \text{ м}^3 = 10^9 \text{ мм}^3.$$

Соответственно

$$1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$1 \text{ мм}^3 = 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Существует и другая единица объёма, часто применяемая для характеристики объёма жидкостей. Эта единица — *литр* [л]. За один литр принимают объём, равный 1 000 см³.

Масса и плотность вещества

Масса — характеристика тела, занимающего определённый объём и содержащего соответствующее количество вещества. Единица массы — килограмм [кг]. На практике часто массу удобно измерять в *граммах* [г] или в *тоннах* [т].

$$1 \text{ кг} = 1\,000 \text{ г},$$

$$1 \text{ кг} = 0.001 \text{ т} = 10^{-3} \text{ т}.$$

Соответственно

$$1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг},$$

$$1 \text{ т} = 1\,000 \text{ кг}.$$

Плотность — это масса в единице объёма вещества, то есть эта величина образована соотношением двух величин: массы m и объёма V . Её обозначают символом ρ (ρ — буква греческого алфавита).

Единица плотности соответственно образована двумя основными единицами системы СИ (килограмм [кг] и метр, возведённый в третью степень [м^3]), то есть единица плотности — килограмм на кубический метр [$\text{кг}/\text{м}^3$].

Такие единицы называют *производными единицами* (см. гл. 2).

$$\text{Плотность} = \frac{\text{масса}}{\text{объём}},$$

то есть

$$\rho = \frac{m}{V}$$

откуда следует

$$m = \rho V$$

и

$$V = \frac{m}{\rho}$$

где m — масса, измеряемая в килограммах [кг],

V — объём, измеряемый в кубических метрах [м^3],

ρ — плотность, измеряемая в килограммах на кубический метр [$\text{кг}/\text{м}^3$].

Некоторые часто встречающиеся значения плотности материалов:

Алюминий	2 700 $\text{кг}/\text{м}^3$	Сталь	7 800 $\text{кг}/\text{м}^3$
Чугун	7 000 $\text{кг}/\text{м}^3$	Бензин	700 $\text{кг}/\text{м}^3$
Пробка	250 $\text{кг}/\text{м}^3$	Свинец	11 400 $\text{кг}/\text{м}^3$
Медь	8 900 $\text{кг}/\text{м}^3$	Вода	1 000 $\text{кг}/\text{м}^3$

Например, определим плотность 50 см^3 меди массой 445 г .

$$\begin{aligned} \text{Плотность} &= \frac{\text{масса}}{\text{объём}} = \frac{445 \times 10^{-3} \text{ кг}}{50 \times 10^{-6} \text{ м}^3} = \frac{445}{50} \times 10^3 = \\ &= 8.9 \times 10^3 \text{ кг/м}^3, \text{ или } 8\,900 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Точно так же можно вычислить объём 20 кг вазелинового масла (в литрах), плотность которого 800 кг/м^3 .

$$\text{Объём} = \frac{m}{\rho} = \frac{20 \text{ кг}}{800 \text{ кг/м}^3} = \frac{1}{40} \text{ м}^3 = \frac{1}{40} \times 10^6 \text{ см}^3 = 25\,000 \text{ см}^3.$$

$$1 \text{ литр} = 1\,000 \text{ см}^3,$$

поэтому

$$V = 25\,000 \text{ см}^3 = \frac{25\,000}{1\,000} = 25 \text{ л.}$$

Относительная плотность вещества — это отношение плотности данного вещества к плотности воды, то есть

$$\text{относительная плотность} = \frac{\text{плотность вещества}}{\text{плотность воды}}$$

Относительная плотность — безразмерная величина, так как является отношением двух одноименных величин. Ниже приведены относительные плотности некоторых веществ, вычисленные по вышеприведённой формуле (известно, что плотность воды $1\,000 \text{ кг/м}^3$):

Алюминий	2.7	Пробка	0.25
Бензин	0.7	Свинец	11.4
Вода	1.0	Сталь	7.8
Медь	8.9	Чугун	7.0

Например, относительная плотность стального бруска плотностью $7\,850 \text{ кг/м}^3$ — это отношение плотности стали к плотности воды, то есть

$$\text{относительная плотность} = \frac{\text{плотность стали}}{\text{плотность воды}} = \frac{7\,850}{1\,000} = 7.85.$$

Относительная плотность жидкости или газа может быть измерена с помощью *ареометра*.

2. ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМЕ СИ

Производные единицы величин представляют собой комбинации основных единиц, и их достаточно много. (Наиболее часто встречающиеся в науке и технике величины и их единицы приведены в гл. 6.)

Вот только два примера:

скорость — метры в секунду [м/с],

ускорение — метры в секунду в квадрате [м/с²].

Электрический заряд

Единица электрического заряда — *кулон* [Кл]. (1 кулон равен суммарному заряду 6.24×10^{18} электронов). Поскольку заряд определён как количество электричества, протекающего через данную точку электрической цепи, то один кулон равен силе тока в один ампер, поддерживаемой в цепи в течение одной секунды, то есть один кулон — это одна *ампер-секунда*. Следовательно, *заряд*, измеренный в кулонах:

$$Q = It$$

где I — сила тока, измеряемая в амперах [А],

t — время, измеряемое в секундах [с].

Сила

Единица силы — *ньютон* [Н]. Ньютон определён как сила, действующая на тело массой в один килограмм, и придающая ему ускорение, равное одному метру в секунду в квадрате, то есть один ньютон — это килограмм-метр в секунду в квадрате [кг·м/с²]. Следовательно, сила, измеренная в ньютонах:

$$F = ma$$

где m — масса, измеряемая в килограммах [кг],

a — ускорение, измеряемое в метрах в секунду в квадрате [м/с²].

Сила тяжести — сила, с которой тело притягивается к Земле. Вблизи земной поверхности сила тяжести равна mg , где $g = 9.81$ м/с².

Работа, энергия

Единица и *работы* и *энергии* — *джоуль* [Дж]. Джоуль определён, как совершённая работа или переданная энергия силой в один ньютон, действующей на протяжении одного метра, то есть один джоуль — это один ньютон-метр [Н·м].

Следовательно, работа, совершённая над телом и измеренная в джоулях:

$$W = Fs$$

где F — сила, измеряемая в ньютонах [Н],

s — расстояние, преодоленное телом в направлении действия приложенной силы и измеряемое в метрах [м].

Энергия — это способность к выполнению работы.

Мощность

Единица мощности — *ватт* [Вт]. *Мощность* определена как темп выполнения работы или передачи энергии, то есть один ватт — это один джоуль в секунду.

Следовательно, мощность, измеренная в ваттах:

$$P = \frac{W}{t}$$

где W — совершённая работа или переданная энергия, измеряемая в джоулях [Дж],

t — время, измеряемое в секундах [с].

Тогда энергия, измеренная в джоулях:

$$W = Pt$$

Электрический потенциал и ЭДС

Единица электрического потенциала — *вольт* [В]. Вольт определён как разность потенциалов между двумя точками в проводнике, выделяющем мощность в один ватт, при протекании через него тока силой в один ампер, то есть один вольт — это один джоуль на кулон.

Значит,

$$\begin{aligned} \text{вольт} &= \frac{\text{ватт}}{\text{ампер}} = \frac{\text{джоуль в секунду}}{\text{ампер}} = \\ &= \frac{\text{джоуль}}{\text{ампер-секунда}} = \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}, \end{aligned}$$

то есть

$$V = \frac{P}{I} = \frac{W/c}{I} = \frac{W}{It} = \frac{W}{Q}.$$

Изменение электрического потенциала между двумя точками электрической цепи называют *разностью потенциалов*.

Электродвижущая сила (ЭДС) обеспечивается источниками энергии, такими, как батарея или генератор, и измеряется в вольтах.

3. СКАЛЯРНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Скаляры и векторы

Применяемые в науке и технике величины можно разделить на две группы:

Скалярные величины (часто их называют просто *скалярами*) имеют только численные значения, и для их характеристики не требуется никаких других данных. Следовательно, 10 сантиметров, 50 секунд, 7 литров, 3 килограмма, 25°C , 250 рублей, 10 см^3 , 10 джоулей, — всё это примеры скалярных величин.

Векторные величины (или просто *векторы*) кроме численных значений, называемых *модулем вектора*, имеют ещё и направление, называемое линией действия данной величины. Следовательно, скорость 50 километров в секунду в восточном направлении, ускорение 9.81 метра в секунду в квадрате, направленное вертикально вниз, сила 15 ньютонов, действующая под углом в 30 градусов к поверхности тела, и северо-западный ветер, скорость которого 15 узлов — всё это примеры векторных величин.

Скорость тела может быть установлена и без упоминания направления движения данного тела. Следовательно, скорость в этом случае — скалярная величина. Однако если направление движения для нас важно так же, как и численное значение скорости, то эту величину определяют как векторную скорость (в английском языке для понятия «векторная скорость» существует специальный термин — *velocity*. — *Прим. переводчика*).

К примеру, *вес* тела в двадцать ньютонов может показаться скалярной величиной; однако вес тоже имеет направление, ведь тело устремлено вниз (к центру Земли). Значит, вес — векторная величина.

Когда говорят, что человек прошёл 7 км, то не упоминают о направлении. Следовательно, расстояние — это скалярная величина. Однако если человек проходит 4 км на запад, а потом 3 км на север, как показано на **Рис. 3.1**, то он оказывается в точке С, а это в 5 км от пункта его отправления А (в соответствии с теоремой Пифагора).

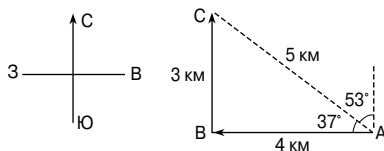


Рис. 3.1

Такое изменение местоположения называется *перемещением*. Значит, 7 км — это пройденное расстояние — *путь* (скалярная

величина), а 5 км в направлении 37° на северо-запад от исходной точки — это перемещение, то есть векторная величина.

Итак, величина, характеризующаяся численным значением и направлением, называется векторной, а величина, имеющая только численное значение, — скалярной.

Обозначения векторов

Векторная величина графически может быть представлена отрезком прямой линии, причём длина линии прямо пропорциональна модулю этой величины, а направление линии то же, что и направление действия этой величины.

Стрелка свидетельствует, что речь идёт о векторе, и указывает, что действие вектора направлено, например, вправо, а не влево. Стрелку ставят на конец вектора и называют «носом» вектора. На **Рис. 3.2**, например, графически изображена векторная скорость, равная 20 м/с, вектор которой направлен под углом 45° к горизонтали, и о ней можно сказать, что это «вектор $oa = 20$ м/с под углом 45° к горизонтали».

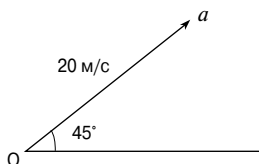


Рис. 3.2

и о ней можно сказать, что это «вектор $oa = 20$ м/с под углом 45° к горизонтали». (Горизонталью принято называть прямую линию, параллельную линии горизонта.)

Есть несколько способов изображения векторных величин, отличающих их от скалярных.

Например:

- **жирный шрифт**: oa или OA ;
- две заглавные буквы со стрелкой наверху, обозначающей векторную величину: \overrightarrow{AB} , где A — это начальная, а B — конечная точка вектора;
- линия над буквами: \bar{A} или \bar{a} ;
- буквы со стрелками наверху: \vec{a} , \vec{A} ;
- подчёркнутые буквы: \underline{a} ;
- $xi + yj$, где i и j — оси, находящиеся под прямым углом друг к другу; например, $3i + 4j$ означает 3 единицы по оси i и 4 единицы по оси j , как показано на **Рис. 3.3**;
- матрица: $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$. Например, вектор OA , изображённый на **Рис. 3.3**, можно представить как $\begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}$.

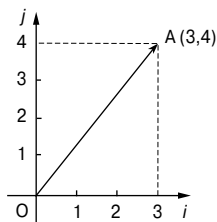


Рис. 3.3

Следовательно, вектор на **Рис. 3.3** можно изобразить как

$$\mathbf{OA} \equiv \overrightarrow{OA} \equiv \overline{OA} \equiv 3i + 4j \equiv \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

Итак, \mathbf{OA} представляет векторную величину, а OA — модуль вектора \mathbf{OA} . Следует учесть, что положительные углы откладываются *против часовой стрелки* от горизонтали, а отрицательные — *по часовой*, то есть вниз от горизонтали. Тогда прямая, находящаяся под углом $+90^\circ$ к горизонтали, — это вертикаль, направленная вверх от горизонтали, а прямая, находящаяся под углом -90° , — вертикаль, направленная вниз.

4. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Элементы

Существует очень большое количество различных веществ, и каждое состоит из одного или более представителя *основных веществ*, называемых элементами.

Элемент — это субстанция, которую уже нельзя разделить на более простые химические составляющие. В природе насчитывается 92 элемента, к которым можно добавить ещё 13, созданных искусственно. Каждому элементу присвоен свой символ, состоящий из латинских букв.

Вот некоторые из самых распространённых элементов и их символы:

Водород	H	Магний	Mg	Кальций	Ca	Серебро	Ag
Гелий	He	Алюминий	Al	Железо	Fe	Олово	Sn
Углерод	C	Кремний	Si	Никель	Ni	Золото	Au
Азот	N	Фосфор	P	Медь	Cu	Ртуть	Hg
Кислород	O	Сера	S	Цинк	Zn	Свинец	Pb
Натрий	Na	Калий	K	Германий	Ge	Уран	U

Атомы

Элементы состоят из очень маленьких частиц, называемых *атомами*. Атом — это мельчайшая часть элемента, которая может участвовать в химическом обмене и которая сохраняет все свойства данного элемента.

Тип атома каждого из элементов уникален. В теории, разработанной Резерфордом и Бором, модель атома предстает в виде миниатюрной солнечной системы. Атом состоит из центрального ядра, вокруг которого по неизменным траекториям, называемым *оболочками*, вращаются отрицательно заряженные частицы — *электроны*. Ядро в свою очередь содержит положительно заряженные частицы — *протоны* — и нейтральные частицы, не имеющие заряда, — *нейтроны*.

Электрон по сравнению с протоном и нейтроном имеет очень небольшую массу. В целом атом не обладает каким-либо электрическим зарядом — он нейтрален, так как содержит равное количество протонов и электронов. Число протонов в атоме элемента определяет его *атомный номер*. Порядок расстановки элементов в соответствии с их атомными номерами известен как *Периодическая система элементов* (таблица Менделеева).

Простейший элемент, существующий в природе, — водород; вокруг его ядра вращается всего один электрон, а само ядро содержит всего один протон. Следовательно, атомное число водорода равно 1. Модель атома водорода изображена на **Рис. 4.1а**.

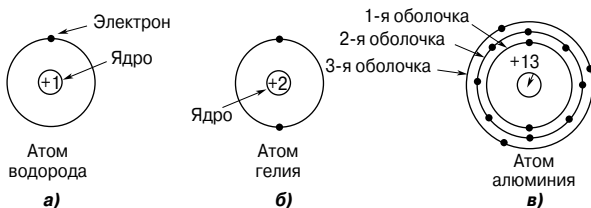


Рис. 4.1

Вокруг ядра гелия вращается 2 электрона. Как показано на **Рис. 4.1б**, оба электрона находятся на одной орбите.

Первая оболочка атома может содержать не больше 2 электронов, вторая — до 8, а третья — до 18. На **Рис. 4.1в** показано, как устроен атом алюминия, имеющий 3 оболочки-орбиты, по которым вращаются 13 электронов.

Молекулы

При взаимодействии элементов их атомы объединяются, образуя основную единицу нового вещества. Эта независимая группа связанных вместе атомов называется *молекулой*. Молекула — это мельчайшая часть вещества, способная существовать самостоятельно без изменений своих свойств.

Все молекулы одного и того же вещества идентичны друг другу. Атомы и молекулы представляют собой *основные строительные блоки*, из которых формируется вещество любого типа.

Химические соединения

Во время химической реакции атомы элементов объединяются, образуя новые молекулы вещества, называемого *химическим соединением*. Химическое соединение — это новое вещество, состоящее из двух или более элементов, соединённых так, что его свойства существенно отличаются от свойств породивших его элементов.

Например, водород и кислород совсем не похожи на воду, которую они образуют при взаимодействии друг с другом.

Компоненты, образующие соединения, представлены в нем в жёсткой пропорции относительно друг друга, и разделить их трудно.

Например:

- вода, молекула которой образуется при взаимодействии 2 атомов водорода с 1 атомом кислорода (H_2O);
- двуокись углерода (углекислый газ), молекула которого образуется при взаимодействии 1 атома углерода с 2 атомами кислорода (CO_2);

- хлорид натрия (пищевая соль, NaCl), молекула которого образуется при взаимодействии 1 атома натрия с 1 атомом хлора;
- сульфат меди (CuSO₄), молекула которого образуется при взаимодействии 1 атома меди, 1 атома серы и 4 атомов кислорода.

Смеси

Смесь — это комбинация веществ, не вступающих в химическую реакцию друг с другом. Смеси обладают теми же свойствами, что и их компоненты, пропорция которых в смеси к тому же жёстко не определена.

Примеры смесей:

- вода и масло;
- сахар и соль;
- воздух, являющийся смесью кислорода, азота, двуокиси углерода и других газов;
- железо и сера;
- песок и вода.

Известковый раствор, например, — это типичная смесь, состоящая из извести, песка и воды.

Соединения отличаются от смесей следующими признаками:

- Свойства соединения отличны от свойств его компонентов, а смесь обладает теми же свойствами, что и её составляющие.
- Компоненты соединения находятся в жёсткой пропорции, а компоненты смеси — нет.
- Атомы соединения объединены, а атомы веществ, образующих смесь, независимы друг от друга.
- При образовании соединения выделяется или поглощается энергия в виде тепла, а в случае со смесью выделение или поглощение тепла незначительно либо вовсе отсутствует.

Растворы

Раствор — это смесь, при образовании которой образующие ее вещества растворяются.

Компоненты раствора нельзя извлечь из его состава путём фильтрации или отстаивания. Типичными примерами растворов являются растворённый в чае сахар, или растворённая в воде соль, или растворённый в воде сульфат меди, окрашивающий её в синий цвет. Вещество, которое растворяют, может быть твёрдым, жидким или газообразным, его называют *растворяемым веществом*, а жидкость, в которой его растворяют, называется *растворителем*. Значит,

растворяемое вещество + растворитель = раствор.

Со временем раствор не меняет ни своих качеств, ни своего внешнего вида.

Суспензии

Суспензия — это смесь жидкости и частиц твёрдого, не растворимого в этой жидкости вещества.

Твёрдое вещество можно извлечь из суспензии путём фильтрации или отстаивания.

Примеры суспензий:

- песок в воде;
- мел в воде;
- бензин и вода.

Растворимость

Если материал растворяется в жидкости, то его называют *растворимым*. Например, сахар и соль — это растворимые в воде вещества.

Если при определённой температуре постоянно добавлять в воду сахар, а потом его размешивать, то настанет момент, когда сахар перестанет растворяться. Такой раствор называется *насыщенным*. Раствор насыщен тогда, когда при неизменной температуре растворимое вещество больше не растворится.

Растворимость — это параметр, определяющий максимальное количество растворимого вещества, которое способно раствориться в 0.1 кг растворителя при заданной температуре.

Например, растворимость хлорида калия при 20°C равна 34 г на 0.1 кг воды, или, пересчитав в проценты, — 34%.

- Растворимость зависит от температуры. Когда твёрдое вещество растворяют в жидкости, по мере роста температуры в большинстве случаев количество растворённого твёрдого вещества также увеличивается. (В горячем чае сахара растворится больше, чем в холодном.) Но есть исключения: растворимость обычной соли в воде практически не зависит от температуры, а растворимость гашёной извести с ростом температуры уменьшается.
- Раствор стремится к насыщению быстрее, если вещество добавлять в жидкость малыми порциями, а не помещать в неё то же количество, но сразу. Например, кусковой сахар растворяется в чае медленнее, чем сахарный песок.
- Твёрдое вещество растворяется в жидкости быстрее, если смесь помешать или встряхнуть, то есть растворимость зависит от активных движений.

Кристаллы

Кристалл — это упорядоченно построенные атомы или молекулы, образующие отчётливую, правильную форму, то есть это упорядоченное скопление основных строительных блоков ве-

щества. Большинство твёрдых тел имеют кристаллическую структуру. К кристаллам относятся, например, соль, сахар, а также все металлы. Вещества не кристаллической природы называют *аморфными*, в частности, к ним относятся стекло или дерево.

Кристаллизация — это процесс, в результате которого твёрдое вещество из раствора выделяется в виде кристалла. Этого можно добиться, добавляя растворимое вещество в растворитель до наступления насыщения. Далее температуру увеличивают, продолжая добавлять растворимое вещество до тех пор, пока раствор не станет достаточно концентрированным. Если после этого его охладить, из него начнут выделяться кристаллы.

Приведем несколько примеров кристаллических веществ, встречающихся в природе: графит, кварц, алмаз и та же обыкновенная пищевая соль.

Кристаллы могут быть разных размеров, но всегда обладают правильной геометрической формой с плоскими гранями, равными краями и определёнными углами между сторонами. На **Рис. 4.2** показаны два широко распространённых вида кристалла.

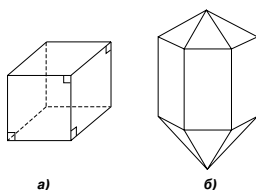


Рис. 4.2

Углы между гранями обычного кристалла соли (**Рис. 4.2а**) всегда равны 90° , а у верхних и нижних граней кристалла кварца (**Рис. 4.2б**) всегда — 60° . Одно и то же вещество всегда воспроизводит абсолютно одинаковую форму кристалла.

На **Рис. 4.3** показана кристаллическая решётка хлорида натрия (NaCl — поваренная соль).

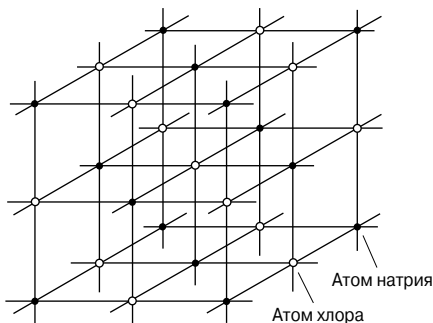


Рис. 4.3

Она всегда имеет форму куба и состоит из чередующихся атомов натрия и хлора. На рисунке показано, как соединены атомы хлора и натрия в кристаллах хлорида натрия. (Строго говоря, в узлах кристаллической решётки NaCl находятся не атомы, а ионы хлора и натрия. — Прим. редактора перевода.)

Металлы и сплавы

Металлы — поликристаллические вещества. Это означает, что они состоят из большого числа кристаллов, соединённых по границам. Чем больше таких границ, тем твёрже металл.

Каждый металл в твёрдом состоянии обладает собственной кристаллической структурой, но в расплавленном состоянии металлы не имеют кристаллической решётки, поэтому для образования *сплава* металлы разных видов сначала плавят, после чего смешивают. Остывая, расплавленный раствор затвердевает. Образовавшееся твёрдое вещество — смесь кристаллов нескольких видов — называют еще *твёрдым раствором*.

Примеры сплавов:

латунь — сплав меди и цинка,

сталь — как правило, сплав железа и углерода,

бронза — сплав меди и олова.

Сплавы создают для улучшения свойств металлов, например для большей твёрдости. Если небольшую порцию никеля (например, 2...4%) добавить к железу, то получится очень прочный материал. Изменяя пропорции никеля, можно получать материалы с разными характеристиками.

Металл можно закалить, нагревая его до высоких температур, а затем быстро охлаждая. В результате этого процесса в металле образуется больше кристаллов, а значит, больше границ. Чем больше границ кристаллов, тем твёрже металл.

Металл можно отжечь, нагревая его до высоких температур, но охлаждая очень медленно. При этом образуются очень большие кристаллы. Границ становится меньше, и металл делается мягче.

5. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Химическая реакция — это взаимодействие между веществами, атомы которых в этот момент перестраиваются. Химическая реакция всегда ведёт к образованию нового вещества.

Воздух — это смесь газов, в процентном отношении состоящая из 78% азота и 21% кислорода. На долю остальных составляющих (в том числе углекислого газа) приходится 1%.

Кислород

Кислород — это элемент без запаха, без цвета и без вкуса. В небольших количествах он растворяется в воде (что необходимо рыбам), точка его кипения составляет минус 183°C (90 К), точка замерзания минус 219°C (54 К). Его плотность почти такая же, как у воздуха. Кислород — чрезвычайно активный химический элемент, входящий в реакцию со многими веществами при нагревании.

Кислород применяют при проведении химических реакций, при резке и сварке металлов (сгорая с другими газами, он даёт пламя с очень высокой температурой). Им наполняют дыхательные аппараты ныряльщики, альпинисты, пожарные. Он также широко используется в медицине.

Если определённую массу медного порошка сначала нагреть на воздухе, а затем остудить, то, взвесив его снова, мы увидим, что масса вещества увеличилась. Это произошло потому, что медь соединилась с кислородом воздуха и образовался оксид меди. При этом содержание кислорода в воздухе уменьшилось настолько, насколько увеличилась масса окисленной меди. Такая химическая реакция называется *окислением*.

Кислород необходим также для горения всех видов веществ. Любое вещество при сгорании в воздухе взаимодействует с кислородом. Этот процесс, называемый *горением*, также представляет собой пример химической реакции между горючим веществом и кислородом воздуха, в результате чего выделяется тепло. Горение — это тоже химическая реакция окисления.

Элемент, входящий в реакцию с кислородом, образует соединение, состоящее только из атомов этого элемента и атомов кислорода. Такое соединение называется *оксидом*.

Примеры оксидов: оксид меди CuO , оксид водорода H_2O (вода), диоксид углерода CO_2 (углекислый газ).

Коррозия

Коррозия железа (и железосодержащих материалов) происходит из-за образования на его поверхности гидроксида железа (ржавчины) в результате химической реакции. Для коррозии всегда необходимо наличие воды и кислорода.

Под действием влаги любая железная или стальная конструкция подвержена коррозии. В результате этого необратимого

процесса конструкция ослабевает, что может оказаться очень опасным. К примерам разрушительного действия ржавчины можно отнести повреждения стальных частей автомобильного мотора, корабельного корпуса, труб, мостов и других конструкций. Коррозии можно избежать с помощью:

- водоотталкивающей краски;
- гальванического покрытия железа другим металлом;
- плакирования железа (см. кн. 2, гл. 42);
- масляной плёнки на поверхности металла.

Химические уравнения

Для описания химических реакций используют формулы и уравнения. Элементы обозначают символами (такими, например, как H для водорода, O для кислорода, Cu для меди, Zn для цинка, и т. д.). Формула описывает соединение, отражает его тип и количество элементов в соединении.

Например, одна молекула серной кислоты H_2SO_4 содержит 2 атома водорода, 1 атом серы и 4 атома кислорода. Точно так же одна молекула метана CH_4 содержит 1 атом углерода и 4 атома водорода.

Перестройка атомов во время химической реакции символически иллюстрируется с помощью *химических уравнений*, с использованием формул и символов.

Например,

$S + O_2 = SO_2$, то есть 1 молекула серы S, добавленная к 1 молекуле кислорода O_2 , вызывает реакцию, образующую 1 молекулу двуокиси серы SO_2 .

Другой пример:

$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$, то есть 1 молекула цинка Zn, добавленная к 1 молекуле серной кислоты H_2SO_4 , вызывает реакцию, образующую 1 молекулу сульфата цинка $ZnSO_4$ и 1 молекулу водорода H_2 .

В химическом уравнении:

- каждый химический элемент должен иметь одинаковое число атомов по обе стороны от знака равенства. Например, во втором уравнении с каждой стороны стоит по 1 атому цинка, по 2 атома водорода, по 1 атому серы и по 4 атома кислорода;
- если перед формулой молекулы стоит число, то на него умножаются все атомы, образующие эту молекулу.

Кислоты и щёлочи

Кислота — это содержащее водород соединение, в котором водород может быть легко заменён металлом. Например, в вышеприведённом уравнении показана реакция цинка с серной кислотой, в результате которой образуются сульфат цинка и водород.

Кислота выводит ионы водорода H^+ в раствор (заряженная частица, *ион* образуется, когда атомы или молекулы теряют или приобретают электроны).

Примеры часто применяемых кислот:

серная кислота — H_2SO_4 ,

соляная кислота — HCl ,

азотная кислота — HNO_3 .

Основание — это вещество, способное нейтрализовать кислоту, то есть устранить её кислотные свойства.

Щёлочь — это растворимое основание. В растворе щёлочь образует гидроксильные ионы OH^- .

К щелочам относятся, например:

гидроксил натрия $NaOH$ (каустическая сода или едкий натр),

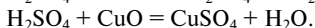
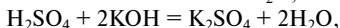
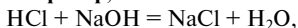
гидроксил кальция $Ca(OH)_2$,

гидроксил аммония NH_4OH ,

гидроксил калия KOH (едкое кали).

Соль — это продукт нейтрализации кислоты основанием, то есть кислота + основание = соль + вода.

Например,



К солям относятся, например:

хлорид натрия $NaCl$ (обычная пищевая соль),

сульфат калия K_2SO_4 ,

сульфат меди $CuSO_4$,

карбонат кальция $CaCO_3$ (известняк).

Индикатор — это химическое вещество, которое при добавлении в раствор изменяет его цвет в зависимости от типа среды в растворе — кислотной или щелочной. Лакмус — это простой двухцветный индикатор, становящийся красным в кислой среде и синим — в щелочной. Есть ещё два типа индикаторов: метилоранж (красный — в кислоте и жёлтый — в щёлочи) и фенолфталеин (бесцветный — в кислоте и розовый — в щёлочи).

Шкала pH (pH означает «водородный показатель») характеризует уровень кислотности или щелочности раствора по шкале от 0 до 14.

0 — это сильная кислота,

7 — нейтральный раствор,

14 — сильная щёлочь.

Некоторые примеры веществ с различными значениями pH:

концентрированная соляная кислота HCl — 1.0,

лимонный сок — 3.0,

молоко — 6.6,

пресная вода — 7.0,

морская вода — 8.2,

концентрированный гидроксил натрия $NaOH$ — 13.0.

Основные свойства кислот

- Почти все кислоты входят в реакцию с карбонатами и бикарбонатами (примером карбоната, то есть соединения, включающего в себя кислород и углерод, служит карбонат натрия, всем известная хозяйственная сода).
- Разбавленные кислоты, обжигающие на вкус; например, лимонная кислота (содержится в лимонах), уксусная кислота (уксус) и молочная кислота (скисшее молоко).
- Растворы кислот окрашивают лакмусовую бумажку и метилоранж в красный цвет, фенолфталеин остаётся бесцветным.
- Большинство кислот вступают в реакцию с элементами, стоящими выше водорода в электрохимическом ряду (см. кн. 2, гл. 42), высвобождая при этом водород.

Основные свойства щелочей

- Щёлочи нейтрализуют кислоты, образуя только соль и воду.
- Щёлочи слабо воздействуют на металлы.
- Щёлочи окрашивают лакмусовую бумажку в синий, метилоранж — в жёлтый и фенолфталеин — в розовый цвет.
- Щёлочи на ощупь скользкие; сильные щёлочи — хорошие растворители для определённых типов масел и смазок.

6. СИМВОЛЬНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН И ИХ ЕДИНИЦ

Величина	Символ величины		Единица величины	Сокращенное обозначение единицы величины	
	международный	отечественный		международное	отечественный
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	ϵ	ϵ	фарад на метр	F/m	Ф/м
Абсолютная магнитная проницаемость	μ	μ	генри на метр	H/m	Гн/м
Взаимная индуктивность	M	M	генри	H	Гн
Время	t	t	секунда	s	с
Давление	P	P	паскаль	Pa	Па
Длина	l	l	метр	m	м
Длина волны	W	λ	метр	m	м
Емкость	C	C	фарад	F	Ф
Импеданс	Z	Z	ом	W	Ом
Индуктивность	L	L	генри	H	Гн
Индуктивность взаимная	M	M	генри	H	Гн
Количество тепла	Q	Q	джоуль	J	Дж
Количество электричества	Q	Q	кулон	C	Кл
Коэффициент линейного расширения	α	α	градус Цельсия в минус первой степени	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Коэффициент объемного расширения	γ		градус Цельсия в минус первой степени	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Коэффициент полезного действия	η	η	безразмерная	—	—
Коэффициент трения	μ	μ	безразмерная	—	—
Магнитная постоянная	μ_r	μ_r	безразмерная	—	—
Магнитодвижущая сила	F	F	ампер	A	А
Масса	m	m	килограмм	kg	кг
Масса, скорость потока	V	V	кубический метр в секунду	m^3/s	$\text{м}^3/\text{с}$
Модуль сдвига (модуль жёсткости)	G	G	паскаль	Pa	Па

Величина	Символ величины		Единица величины	Сокращенное обозначение единицы величины	
	международный	отечественный		международное	отечественный
Модуль упругости (модуль Юнга)	E	E	паскаль	Pa	Па
Молярная газовая постоянная	R	R	килоджоуль на килограмм-кельвин	kJ/(kg K)	кДж/(кг·К)
Момент инерции	I, J	I, J	килограмм-метр квадратный	kg·m ²	кг·м ²
Момент инерции (второй момент) площади плоской фигуры	I	I	метр в четвертой степени	m ⁴	м ⁴
Момент силы	M	M	ньютон-метр	Nm	Н·м
Мощность общая	S	S	вольт-ампер	VA	В·А
Мощность реактивная	Q	Q	вольт-ампер реактивный (вар)	var	вар
Мощность активная	P	P	ватт	W	Вт
Напряжение	V	V	вольт	V	В
Напряженность магнитного поля	H	H	ампер на метр	A/m	А/м
Напряженность электрического поля	E	E	вольт на метр	V/m	В/м
Объем	V	V	кубический метр	m ³	м ³
Объем (вместимость)	V	V	кубический метр	m ³	м ³
			литр	l	л
Объем, скорость потока	V	V	кубический метр в секунду	m ³ /s	м ³ /с
Относительная диэлектрическая проницаемость	ϵ_0	ϵ_0	фарад на метр	F/m	Ф/м
Относительная магнитная проницаемость	μ_0	μ_0	генри на метр	H/m	Гн/м
Относительная плотность	d	d	безразмерная	—	—
Период	T	T	секунда	s	с
Плотность	ρ	ρ	килограмм на кубический метр	kg/m ³	кг/м ³
Плотность (потока магнитного)	B	B	тесла	T	Тл
Плотность (потока электрического)	D	D	кулон на квадратный метр	C/m ²	Кл/м ²

Продолжение таблицы

Величина	Символ величины		Единица величины	Сокращенное обозначение единицы величины	
	международный	отечественный		международное	отечественный
Площадь	A	S	квадратный метр	m^2	m^2
Поверхностное натяжение	σ	σ	паскаль	Pa	Па
Полярный момент (второй момент) площади плоской фигуры	J	J	метр в четвертой степени	m^4	m^4
Поток магнитный	Φ	Φ	вебер	Wh	Вб
Поток электрического смещения	Ψ	Ψ	кулон	C	Кл
Проводимость	G	G	сименс	S	См
Растяжение прямое	ε	ε	безразмерная	—	—
Расширение (линейный коэффициент)	β	β	градус Цельсия в минус первой степени	$^{\circ}C^{-1}$	$^{\circ}C^{-1}$
Расширение (объемный коэффициент)	α	α	градус Цельсия в минус первой степени	$^{\circ}C^{-1}$	$^{\circ}C^{-1}$
Расширение (поверхностный коэффициент)	γ	γ	градус Цельсия в минус первой степени	$^{\circ}C^{-1}$	$^{\circ}C^{-1}$
Сила	F	F	ньютон	N	Н
Сила света	I	I	кандела	cd	кд
Сила электрического тока	I	I	ампер	A	А
Скорость	v	v	метр в секунду	m/s	м/с
Скорость угловая	ω	ω	радиан в секунду	rad/s	рад/с
Сопротивление (активное)	R	R	ом	Ω	Ом
Сопротивление магнитное	S	R_M	генри в минус первой степени или ампер на вебер	H^{-1} или A/Wb	Hn^{-1} или A/Вб
Сопротивление реактивное	X	X	ом	Ω	Ом
Сопротивление удельное	ρ	ρ	ом-метр	Ωm	Ом·м
Степень сухости (относительная влажность)	x		безразмерная	—	—
Температура термодинамическая	T	T	кельвин	K	К

Величина	Символ величины		Единица величины	Сокращенное обозначение единицы величины	
	международный	отечественный		международное	отечественный
Температурный коэффициент сопротивления	α	α	градус Цельсия в минус первой степени	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Тепловая емкость, удельная	c	c	килоджоуль на килограмм-кельвин	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
Угловая скорость	ω	ω	радиан в секунду	rad/s	$\text{рад}/\text{с}$
Угловое ускорение	α	ε	радиан на секунду в квадрате	rad/s^2	$\text{рад}/\text{с}^2$
Удельная тепловая емкость	c	c	килоджоуль на килограмм	kJ/kg	$\text{кДж}/\text{кг}$
Удельный объем	ν	ν	кубический метр на килограмм	m^3/kg	$\text{м}^3/\text{кг}$
Ускорение линейное	α	α	метр на секунду в квадрате	m/s^2 , или $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{м}/\text{с}^2$, или $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$
Ускорение силы тяжести	g	g	метр на секунду в квадрате	m/s^2 , или $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{м}/\text{с}^2$, или $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$
Частота	f	f	герц	Hz	Гц
Число витков провода	N	N	безразмерная	—	—
Электрическая постоянная	ε_r	ε_r	безразмерная	—	—
Энергия	W	W	джоуль	J	Дж
Энергия внутренняя	U, E	U, E	джоуль	J	Дж
Энергия удельная внутренняя	u, e	u, e	килоджоуль на килограмм	kJ/kg	$\text{кДж}/\text{кг}$
Энтальпия	H	H	джоуль	J	Дж
Энтальпия удельная	h	h	килоджоуль на килограмм	kJ/kg	$\text{кДж}/\text{кг}$
Энтропия	S	S	килоджоуль на кельвин	kJ/K	$\text{кДж}/\text{К}$

Часть вторая

От физических

явлений

к техническим

устройствам

7. СКОРОСТЬ: ВЕЛИЧИНА И НАПРАВЛЕНИЕ

Скорость

Скорость — это темп, с которым преодолевается расстояние. Определяется скорость из уравнения

$$\text{скорость} = \frac{\text{пройденный путь}}{\text{время в пути}}$$

Обычно скорость измеряют в метрах в секунду [м/с] или [м·с⁻¹], а также в километрах в час [км/ч] или [км·ч⁻¹]. Следовательно, если человек проходит 5 километров за один час, то его скорость равна $\frac{5}{1}$, то есть 5 км/ч.

Единица скорости в системе СИ записывается в виде м·с⁻¹ и называется «индексным обозначением». Однако в технике чаще применяется обозначение м/с, называемое «наклонным обозначением». В этой главе, а также в других главах, посвящённых механике, в основном используется второй символ.

Например, когда человек проходит 600 метров за 5 минут,

$$\begin{aligned} \text{его скорость} &= \frac{\text{пройденный путь}}{\text{время в пути}} = \frac{600 \text{ м}}{5 \text{ мин}} = \\ &= \frac{600 \text{ м}}{5 \text{ мин}} \times \frac{1 \text{ мин}}{60 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}, \end{aligned}$$

или, переходя на обозначение скорости в километрах в час,

$$2 \text{ м/с} = \frac{2 \text{ м}}{1 \text{ с}} \times \frac{1 \text{ км}}{1000 \text{ м}} \times \frac{3600 \text{ с}}{1 \text{ ч}} = 2 \times 3.6 = 7.2 \text{ км/ч}.$$

(Примечание: м/с переводятся в км/ч умножением численного значения на 3.6.)

График «путь/время»

График — это один из способов отображения данных о движении тела. График зависимости пройденного пути (отмечается по вертикальной оси координат) от времени (отмечается по горизонтальной оси) называют графиком «путь/время». Значит, если самолёт за первый час полёта преодолевает 500 километров, а за второй час — 750 километров, то после двух часов полёта проделанный им путь составит (500+750) километров, то есть 1 250 километров. График зависимости пути от времени показан на **Рис. 7.1**.

Средняя скорость вычисляется как отношение пройденного пути ко времени нахождения в пути, то есть

$$\text{средняя скорость} = \frac{\text{весь пройденный путь}}{\text{общее время в пути}}.$$

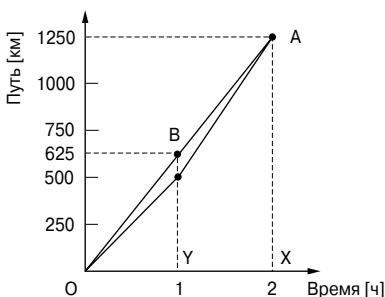


Рис. 7.1

Следовательно, средняя скорость самолёта равна

$$\frac{(500 + 750)\text{км}}{(1 + 1)\text{ч}} = \frac{1\ 250}{2} = 625\ \text{км/ч.}$$

Если соединить точки О и А, как показано на **Рис. 7.1**, то отрезок ОА будет определяться как

$$\text{ОА} = \frac{\text{изменение расстояния (вертикальная ось)}}{\text{изменение времени (горизонтальная ось)}}$$

для любых двух точек на отрезке ОА.

Для точки А изменение расстояния от О равно отрезку АХ, то есть 1 250 км, а затраченное время — ОХ, то есть 2 часа. Отсюда средняя скорость равна $\frac{1\ 250}{2}$, то есть 625 км/ч.

Точно так же в точке В отрезка ОА изменение расстояния от О равно ВУ, то есть 625 километрам, а затраченное время равно отрезку ОУ, то есть 1 часу. Отсюда получается, что средняя скорость равна $\frac{625}{1}$, то есть 625 км/ч.

Таким образом, отрезок ОА на графике «путь/время», определяет среднюю скорость тела, движущегося от точки О к точке А.

График «скорость/время»

Если график отображает зависимость скорости от времени, то площадь под графиком определяет пройденный путь. Следовательно, пройденное телом расстояние за время его движения из О в точку В, как показано на **Рис. 7.2**, — это заштрихованная область, под кривой «скорость/время».

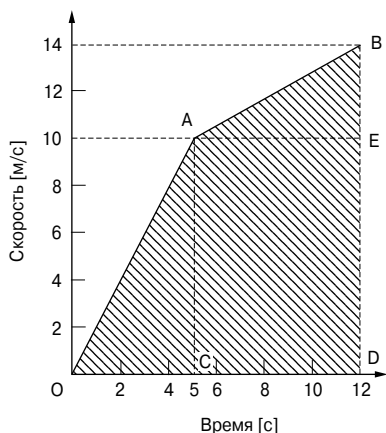


Рис. 7.2

$$\begin{aligned} \text{Площадь треугольника OAC} &= \frac{1}{2} \times \text{основание} \times \text{высота} = \\ &= \frac{1}{2} \times 5 \text{ с} \times 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 25 \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Площадь прямоугольника AECD} &= \text{основание} \times \text{высота} = \\ &= (12 - 5) \text{ с} \times (10 - 0) \frac{\text{м}}{\text{с}} = 70 \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Площадь треугольника ABE} &= \frac{1}{2} \times \text{основание} \times \text{высота} = \\ &= \frac{1}{2} \times (12 - 5) \text{ с} \times (14 - 10) \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{1}{2} \times 7 \times 4 = 14 \text{ м}. \end{aligned}$$

Отсюда путь, пройденный телом, движущимся из O в B,

$$(25 + 70 + 14) \text{ м} = 109 \text{ м}.$$

Векторная скорость

Векторная скорость тела — это скорость тела, перемещающегося в определённом направлении. Если самолёт летит на юг со скоростью 500 километров в час, то его скалярная скорость — 500 километров в час, а векторная скорость — 500 километров в час в южном направлении. Отсюда следует, что если бы самолёт летел 1 час со скоростью 500 километров в час по круговой траектории таким образом, что спустя час после взлёта он бы снова подлетел к аэропорту, то его средняя векторная скорость была бы равна 0.

Средняя векторная скорость вычисляется как

$$\frac{\text{путь, пройденный в определённом направлении}}{\text{время в пути}}$$

Если самолёт летит из точки О в точку А и преодолевает за 1 час путь в 300 километров, а точка А находится в северном направлении от О, то отрезок ОА на **Рис. 7.3** характеризует первый час полёта.

Затем самолёт летит из точки А в точку В, преодолевая за второй час полёта путь, равный 400 километрам, причем точка В расположена к востоку от точки А. Второй час полёта также показан на **Рис. 7.3**.

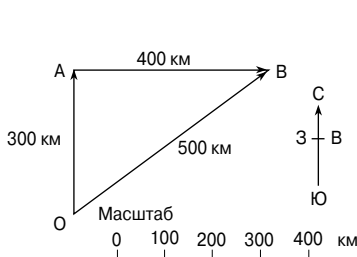


Рис. 7.3

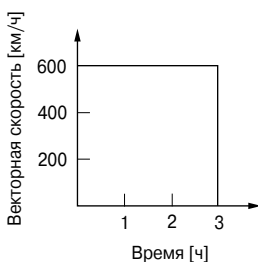


Рис. 7.4

Средняя векторная скорость за два часа полёта равна

$$\frac{\text{расстояние } \overline{OB}}{2 \text{ часа}} = \frac{500 \text{ км}}{2 \text{ ч}} = 250 \text{ км/ч по направлению } \overline{OB}.$$

График отношения векторной скорости (отмечается по вертикали) ко времени (отмечается по горизонтали) называется графиком «векторная скорость/время». График на **Рис. 7.4** показывает, что самолёт летел три часа с постоянной скоростью 600 километров в час в определённом направлении.

Очерченная область характеризует векторную скорость (вертикаль), умноженную на время (горизонталь), и измеряется в единицах, полученных из $\frac{\text{километры}}{\text{часы}} \times \text{часы}$, то есть в километрах. Эта область и есть путь, пройденный в определённом направлении. В данном случае путь = $600 \frac{\text{км}}{\text{ч}} \times 3 \text{ ч} = 1800 \text{ км}$.

Существует другой метод определения пройденного пути:

$$\text{пройденный путь} = \text{средняя векторная скорость} \times \text{время}.$$

Следовательно, если самолёт летит на юг со скоростью 600 км/ч в течение 20 минут, то преодолённое расстояние составит

$$600 \frac{\text{км}}{\text{ч}} \times \frac{20}{60} \text{ ч} = 200 \text{ км.}$$

8. УСКОРЕНИЕ

Ускорение — это темп изменения векторной скорости со временем. Средняя величина ускорения a определяется как

$$a = \frac{\text{изменение векторной скорости}}{\text{затраченное время}}.$$

Обычно ускорение измеряют в метрах в секунду в квадрате [$\text{м}/\text{с}^2$] или [$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$]. Если u — начальная векторная скорость тела, измеряемая в метрах в секунду, v — конечная векторная скорость, измеряемая в метрах в секунду, а t — время в секундах, за которое скорость изменилась от u до v , то *среднее ускорение*

$$a = \frac{v - u}{t} \text{ м}/\text{с}^2$$

График «векторная скорость/время»

График изменения векторной скорости (вертикальная ось) во времени (горизонтальная ось) называют графиком «векторная скорость/время», как было показано в гл. 7. На **Рис. 8.1** показан график «векторная скорость/время», где отрезок OA дан как отношение AX/OX . AX — это изменение векторной скорости от её начального значения u , то есть от нуля, до конечного — v , то есть до 4 метров в секунду. OX — это время, затраченное на изменение скорости

$$\frac{AX}{OX} = \frac{\text{изменение векторной скорости}}{\text{затраченное время}} =$$

$$= \text{ускорение в первые две секунды.}$$

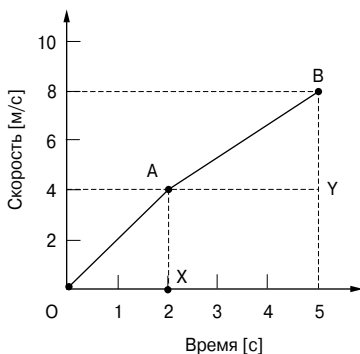


Рис. 8.1

Из графика видно, что

$$\frac{AX}{OX} = \frac{4 \text{ м/с}}{2 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2,$$

то есть ускорение равно 2 м/с^2 .

Точно так же отрезок АВ на **Рис. 8.1** получают из отношения BY/AY , то есть ускорение за интервал времени между 2 с и 5 с равно

$$\frac{8-4}{5-2} = \frac{4}{3} = 1\frac{1}{3} \text{ м/с}^2.$$

Итак, наклон линии на графике «векторная скорость/время» определяет ускорение.

Свободное падение и уравнение движения

Если тело, например камень, падает с высоты, то такое падение называют *свободным падением*. Ускорение камня при падении постоянно и равно примерно 9.8 м/с^2 . В вакууме все тела обладают таким направленным вертикально вниз ускорением, то есть перо имеет то же ускорение, что и камень. Однако если свободное падение происходит в воздухе, то ускорение 9.8 м/с^2 сохраняется лишь на коротких расстояниях, а если плотность тела мала, как в случае с пером, то у такого тела ускорение мало или его вообще нет.

Для тел, движущихся с постоянным ускорением, среднее ускорение также равно постоянной величине, а значит,

$$a = \frac{v-u}{t}.$$

Тогда

$$a \times t = v - u,$$

откуда

$$\boxed{v = u + at}$$

где u — первоначальная векторная скорость в метрах в секунду,
 v — конечная векторная скорость в метрах в секунду,
 a — постоянное ускорение в метрах в секунду в квадрате,
 t — время в секундах.

Когда « a » имеет отрицательное значение, то ускорение называют *торможением* или *замедлением*. Уравнение $v = u + at$ называют *уравнением движения*.

Например, если камень сбросить с большой высоты, то он начнёт свободное падение, а значит, будет иметь ускорение a , примерно равное 9.8 м/с^2 (примем падение вниз за положительное направление). Определим скорость падения камня через две секунды.

Первоначальная скорость камня u равна 0.

Векторная скорость v после 2 с падения

$$v = u + at = 0 + 9.8 \times 2 = 19.6 \text{ м/с},$$

то есть **векторная скорость камня, направленная вниз, спустя 2 с примерно равна 19.6 м/с.**

Другой пример. Определим ускорение поезда, если он движется со скоростью 30 км/ч и за две минуты его скорость равномерно возросла до 50 км/ч.

Переведём скорость из километров в час в метры в секунду, а время — из часов в секунды:

$$u = 30 \text{ км/ч} = \frac{30}{3.6} \text{ м/с},$$

$$v = 50 \text{ км/ч} = \frac{50}{3.6} \text{ м/с},$$

$$t = 2 \text{ мин} = 2 \times 60 = 120 \text{ с}.$$

Поскольку

$$v = u + at,$$

то, подставляя вместо u , v , t их значения, имеем

$$\frac{50}{3.6} = \frac{30}{3.6} + a \times 120.$$

Преобразуя, получаем

$$120 \times a = \frac{50 - 30}{3.6},$$

откуда

$$a = \frac{20}{3.6 \times 120} = 0.0463 \text{ м/с}^2,$$

то есть **постоянное ускорение поезда равно 0.0463 м/с².**

9. СИЛА, МАССА И УСКОРЕНИЕ

Воздействие силы на физические тела

Когда какое-либо тело тянут или толкают, говорят, что к нему прикладывают *силу*. Сила в системе СИ измеряется в ньютонах [Н]. Следствием приложения силы к телу является:

- изменение движения тела;
- изменение формы тела.

Если происходит изменение в движении тела, то его векторная скорость изменяется от u до v , то есть тело получает ускорение. Следовательно, ускорение — это результат действия на тело силы. Если к телу приложили силу, но движения не произошло, это значит, что тело изменило форму, то есть произошла деформация тела под действием силы. Обычно изменение формы настолько незначительно, что невооружённым глазом этого увидеть нельзя. Однако с помощью сверхчувствительных приборов можно узнать даже о самых незначительных изменениях размеров тела.

Между всеми телами существует сила притяжения. К факторам, определяющим величину этой силы F , относятся масса тел и расстояние между их центрами:

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{d^2} .$$

Отсюда следует, что если рассматривать человека как одно тело, а Землю — как второе, то между ними существует сила притяжения. Эту силу ещё называют *силой гравитации* или *силой тяжести*, и именно благодаря ей человек, стоящий на поверхности Земли, имеет определённый вес. Благодаря этой же силе в отсутствие других сил происходит свободное падение тел с постоянным ускорением.

Законы движения Ньютона

Чтобы тело сдвинулось или изменило направление движения, необходима сила, действующая на тело извне. Этот принцип, известный как *первый закон Ньютона*, можно сформулировать так:

|| *Тело остаётся неподвижным или продолжает равномерно и прямолинейно двигаться до тех пор, пока на него не подействует внешняя сила.*

Так как для изменения направления движения нужна сила, следовательно, тело обладает некоторым сопротивлением к изменению его состояния. Сила, необходимая для того, чтобы придать заданное ускорение плоскодонке, намного меньше, чем сила, необходимая для получения такого же ускорения автомо-

билем. Сопротивление к изменению состояния движения называется *инерцией* тела. Величина инерции зависит от массы тела.

Так как автомобиль имеет значительно большую по сравнению с плоскодонкой массу, то и его инерция тоже значительно больше. Эту закономерность отражает второй закон Ньютона.

Второй закон Ньютона может быть сформулирован так:

Ускорение тела, приведённого в движение внешней силой, пропорционально этой силе и направлено в ту же сторону.

Следовательно, сила пропорциональна ускорению, или, другими словами, сила = константа × ускорение, где константой является масса тела, то есть

$$\text{сила} = \text{масса} \times \text{ускорение}$$

или

$$F = ma$$

где F — сила, измеряемая в ньютонах [Н],

m — масса, измеряемая в килограммах [кг],

a — ускорение, измеряемое в метрах в секунду в квадрате [м/с²].

Единица силы — *ньютон* [Н], и определяют его через массу и ускорение. Один ньютон — это сила, необходимая для придания ускорения 1 м/с² телу массой 1 кг, то есть

$$1 \text{ Н} = \frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ с}^2}.$$

Отсюда следует, что 1 м/с² = 1 Н/кг. Следовательно, гравитационное ускорение 9.8 м/с² — это то же самое, что гравитационное поле 9.8 Н/кг.

Например, определим силу, необходимую для того, чтобы неподвижно стоящая яхта массой 20 тонн, набрав ускорение, за 10 минут достигла скорости 21.6 км/ч.

Конечная скорость яхты

$$v = 21.6 \text{ км/ч} = \frac{21.6}{3.6} = 6 \text{ м/с},$$

время движения яхты с ускорением

$$t = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}.$$

Следовательно, зная, что

$$v = u + at,$$

и подставляя вместо u , v , t их значения, имеем

$$6 = 0 + a \times 600,$$

откуда

$$a = \frac{6}{600} = 0.01 \text{ м/с}^2.$$

Согласно второму закону Ньютона $F = ma$, то есть

$$F = 20\,000 \times 0.01 = 200 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 = \mathbf{200 \text{ Н}}.$$

Другой пример. Определим массу головки механического станка, движущейся со скоростью 30 м/мин, зная что её можно остановить, приложив силу 1.2 Н.

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$F = ma,$$

откуда

$$m = \frac{F}{a}.$$

Для нахождения ускорения a можно использовать закон движения

$$v = u + at,$$

где $v = 0$,

$$u = \frac{30}{60} \text{ м/мин} = 0.5 \text{ м/с},$$

$$t = 0.8 \text{ с}.$$

Подставляя эти значения, имеем

$$0 = 0.5 + a \times 0.8,$$

откуда

$$a = -\frac{0.5}{0.8} = -0.625 \text{ м/с}^2,$$

то есть торможение составляет 0.625 м/с².

Следовательно, масса

$$m = \frac{F}{a} = \frac{1.2}{0.625} = \mathbf{1.92 \text{ кг}}.$$

Третий закон Ньютона можно сформулировать так:

||| *Для каждой силы существует сила, равная ей по величине и противоположная по направлению, или сила действия равна силе противодействия.*

Следовательно, сила, с которой тело, лежащее на столе, действует на стол, направлена вниз и равна направленной вверх силе, с которой стол действует на тело. Такая сила называется *силой реакции* или просто *реакцией*.

Центростремительное ускорение

Когда тело движется по круговой траектории с постоянной скоростью, направление его движения постоянно изменяется, а следовательно, постоянно изменяется и его векторная скорость (зависящая как от численного значения, так и от направления). По определению

$$\text{ускорение} = \frac{\text{изменение векторной скорости}}{\text{затраченное время}},$$

откуда следует, что в этом случае тело получает ускорение.

Допустим, тело движется с постоянной угловой скоростью ω и направленной по касательной векторной скоростью v . Допустим также, что изменение векторной скорости при малом угле отклонения $\theta (= \omega t)$ соответствует V (Рис. 9.1а).

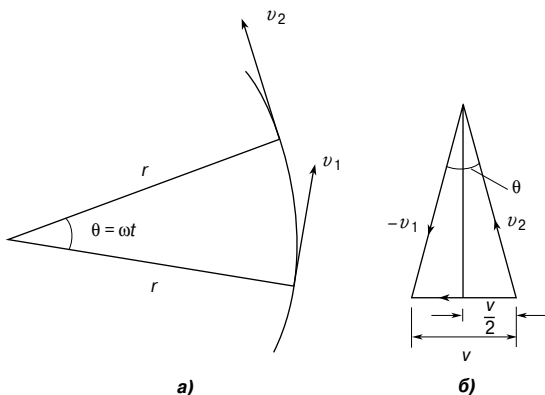


Рис. 9.1

Тогда

$$v_2 - v_1 = V.$$

На Рис. 9.1б показана векторная диаграмма этого изменения скорости. Так как численные значения v_1 и v_2 одинаковы, то есть равны v , то векторная диаграмма становится равнобедренным треугольником.

Проводя биссектрису между v_1 и v_2 , получаем

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{V/2}{v_2} = \frac{V}{2v},$$

то есть

$$V = 2v \sin \frac{\theta}{2}. \quad (1)$$

Так как $\theta = \omega t$, то

$$t = \frac{\theta}{\omega}. \quad (2)$$

Разделив левую и правую части уравнения (1) на соответствующие части уравнения (2), получаем

$$\frac{V}{t} = \frac{2v \sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{\omega}} = \frac{v\omega \sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}.$$

Известно, что для малых углов синус угла приближённо равен углу (в радианах), поэтому для малых углов $\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}}$ очень близко к единице, следовательно,

$\frac{\text{изменение векторной скорости}}{\text{время, за которое произошло изменение}} = \text{ускорение,}$

$$a = v\omega.$$

Но $\omega = \frac{v}{r}$, откуда

$$v\omega = v \times \frac{v}{r} = \frac{v^2}{r}.$$

То есть *ускорение* a соответствует $\frac{v^2}{r}$ и направлено к центру круга, по которому движется тело. Такое ускорение называется *центростремительным*. Если масса вращающегося тела m , то в соответствии со вторым законом Ньютона *центростремительная сила* определяется как сила, равная $\frac{mv^2}{r}$ и также направленная к центру кругового движения.

Например, если автомобиль массой 750 кг движется по дуге радиусом 150 м на скорости 50.4 км/ч, то

$$\text{центростремительная сила} = \frac{mv^2}{r} = \frac{750 \times \left(\frac{50.4}{3.6}\right)^2}{150} = 980 \text{ Н.}$$

10. ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ И РАВНОВЕСИЕ

Центр тяжести

Центр тяжести тела — это точка, к которой может быть приложена сила, являющаяся равнодействующей всех сил тяжести, действующих на отдельные точки тела. У тел одинаковой толщины, лежащих на горизонтальной поверхности, центр тяжести и точка равновесия находятся на одной вертикали. У тонкого однородного прута, показанного на **Рис. 10.1а**, точка равновесия и центр тяжести совпадают и находятся в точке, делящей прут на две равные части.

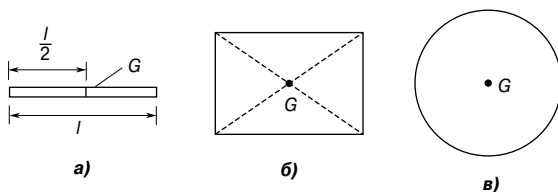


Рис. 10.1

Центр тяжести у тонкого плоского листа прямоугольной формы, изготовленного из однородного материала, находится в точке пересечения его диагоналей, как показано на **Рис. 10.1б**.

Центр тяжести тонкой пластины круглой формы, изображенной на **Рис. 10.1в**, находится в центре окружности, образованной границей пластины.

Равновесие

Тело находится в равновесии, когда действующие на него силы таковы, что причин для его передвижения не существует. Возможны три вида равновесия тела:

- Тело находится в состоянии *устойчивого равновесия*, и если его слегка толкнуть или потянуть (то есть приложить внешнюю силу), то центр тяжести окажется выше исходного положения, и когда эта сила перестанет действовать, то тело вернется на прежнее место. Следовательно, шарик, лежащий внутри полусферы, как показано на **Рис. 10.2а**, находится в состоянии устойчивого равновесия.
- Тело находится в состоянии *неустойчивого равновесия*, если при воздействии на него силы его центр тяжести оказывается ниже первоначального положения и тело не возвращается на исходную позицию. Следовательно, шарик, лежащий на вершугу полусферы, как следует из **Рис. 10.2б**, находится в состоянии неустойчивого равновесия.

**Рис. 10.2**

- Тело находится в состоянии *безразличного равновесия*, если после приложения к нему силы центр тяжести остаётся на той же самой высоте, а тело остается на том месте, где сила перестаёт на него действовать. Следовательно, шарик, лежащий на плоской горизонтальной плоскости, находится в безразличном равновесии, как это можно видеть на **Рис. 10.2в**.

11. СИЛЫ, ПРИЛОЖЕННЫЕ К ОДНОЙ ТОЧКЕ

Силы

Если все силы действуют в одной плоскости, их называют *компланарными*. Когда силы действуют одновременно и приложены к одной и той же точке, их называют *совпадающими*.

Сила — *векторная величина* и, следовательно, характеризуется не только величиной, но и направлением. Вектор может быть представлен графически в виде отрезка линии, изображённого в масштабе и снабженного стрелкой, указывающей направление действия этой силы.

Векторную величину от скалярной в тексте и формулах можно отличить несколькими способами, как это описано в гл. 3. В этой главе векторы будут обозначаться «жирными» буквами.

Следовательно, отрезок ab , показанный на **Рис. 11.1**, обозначает силу в 5 ньютонов, действующую в восточном направлении.

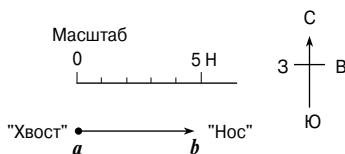


Рис. 11.1

Равнодействующая двух компланарных сил

Если к точке приложены две силы, то возможны три случая, как это может происходить.

1. В случае, когда две силы действуют в одном направлении и приложены к одной точке, то их может заменить одна сила, обладающая таким же действием, что и обе эти силы. Её называют *равнодействующей* силой или просто равнодействующей, и она равна арифметической сумме двух исходных сил. Силы F_1 и F_2 , показанные на **Рис. 11.2а**, приводят к точно такому же эффекту, что и сила F , приложенная к точке P , как это можно видеть на **Рис. 11.2б**.

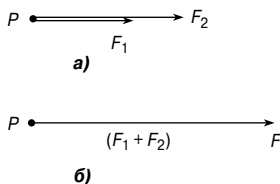


Рис. 11.2

Сила $F = F_1 + F_2$ и действует в том же направлении, что и силы F_1 и F_2 . Значит, F — это равнодействующая сил F_1 и F_2 .

2. У сил, действующих в противоположных направлениях, но по одной прямой, равнодействующая равна их арифметической

разности. Силы F_1 и F_2 , приложенные к точке P , как показано на **Рис. 11.3а**, приводят к точно такому же эффекту, что и сила F , показанная на **Рис. 11.3б**, где $F = F_1 - F_2$. При этом сила F направлена в сторону силы F_2 , так как её величина больше величины F_1 . Из этого следует, что F — равнодействующая сил F_1 и F_2 .

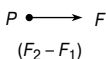
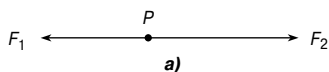


Рис. 11.3

Когда направления действия двух сил не лежат на одной прямой, то величину и направление равнодействующей силы можно определить способом, называемым *векторным сложением* сил. Существует два графических метода векторного сложения: *правило треугольника сил* и *правило параллелограмма сил*.

Правило треугольника сил

Процедура сложения векторов по *правилу треугольника* заключается в следующем:

1. Нарисуем в подходящем масштабе вектор одной из сил, указывающий направление действия этой силы.

2. От «носа» этого вектора отложим в том же масштабе вектор второй силы в направлении действия этой силы.

3. Если теперь соединить «хвост» первого вектора с «носом» второго вектора отрезком прямой, то получится вектор равнодействующей силы соответствующего направления и величины.

Например, определим по правилу треугольника величину и направление результирующего вектора для силы, равной 15 ньютонам, действующей вправо по горизонтали, и силы, равной 20 ньютонам, приложенной к той же точке и расположенной относительно первой силы под углом 60° (**Рис. 11.4**).

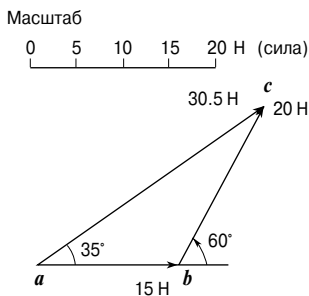


Рис. 11.4

Применив описанную выше процедуру и, используя **Рис. 11.4**, получаем:

- вектор ab равен 15 единицам по горизонтали в заданном масштабе;
- вектор bc , отложенный из точки b , равен 20 единицам и расположен под углом 60° к ab . Угол 60° откладывают от ab против часовой стрелки;
- после проведения измерений имеем: вектор равнодействующей силы ac равен 30.5 единицы и расположен под углом 35° к ab .

Вывод: равнодействующая сила равна **30.5 Н** и расположена под углом **35°** к вектору силы 15 Н.

Правило параллелограмма сил

Процедура сложения векторов по *правилу параллелограмма* заключается в следующем:

1. В выбранном масштабе откладываем вектор одной из сил. Его направление должно соответствовать направлению действия этой силы.

2. От «хвоста» этого вектора в том же масштабе отложим вектор второй силы, направленный в сторону её действия.

3. Достраиваем параллелограмм, две стороны которого образованы векторами, построенными ранее.

4. Равнодействующей силой, обладающей результирующими величиной и направлением, является диагональ параллелограмма, выходящая из точки соприкосновения «хвостов» двух векторов слагаемых сил.

Например, вычислим по правилу параллелограмма величину и направление равнодействующей двух сил: одна из них равна 250 Н и направлена под углом 135° к горизонтали, а вторая равна 400 Н и направлена под углом -120° (**Рис. 11.5**).

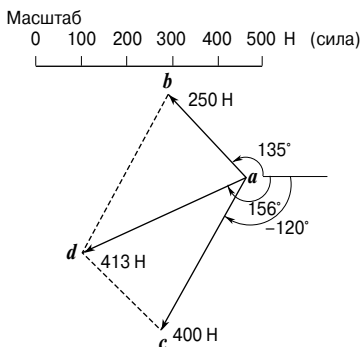


Рис. 11.5

Применив описанную выше процедуру и используя **Рис. 11.5**, получим:

- вектор ab равен 250 единицам в заданном масштабе, а угол наклона к горизонтали составляет 135° ;
- вектор ac равен 400 единицам, а угол наклона к горизонтали составляет -120° ;
- отрезки bd и cd дополняют эти векторы до параллелограмма;
- ad — диагональ параллелограмма, проведенная из a в d . Изменив диагональ и угол её наклона к горизонтали, определяем, что диагональ равна 413 единицам и расположена под углом -156° .

Вывод: равнодействующая сила равна **413 Н** и направлена под углом -156° к горизонтали.

Расчет равнодействующей двух компланарных сил

Альтернативой графическому методу определения результирующей двух компланарных сил является *расчёт*. Его можно произвести с помощью *тригонометрии*, применяя *теорему косинусов* и *теорему синусов*, или *разложение сил* (см. стр. 60).

Например, определим с помощью теорем косинусов и синусов величину и направление результирующей двух сил, одна из которых равна 8 кН и направлена под углом 50° к горизонтали, а другая — 5 кН и направлена под углом -30° .

Изображённая на **Рис. 11.6а** в декартовой системе координат диаграмма состоит из вектора oa , отображающего величину и направление силы 8 кН, и вектора ob , отображающего величину и направление силы 5 кН.

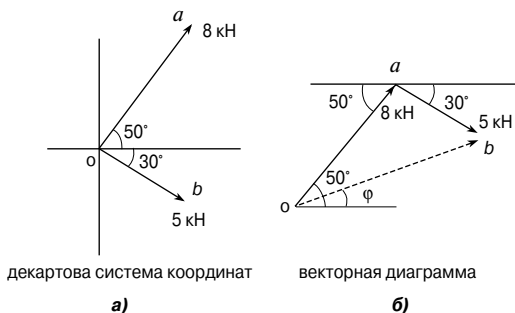


Рис. 11.6

Величина результирующей определяется длиной вектора ob на **Рис. 11.6б**. По теореме косинусов

$$(ob)^2 = (oa)^2 + (ab)^2 - 2(oa)(ab) \cos \angle oab.$$

Так как

$$\angle oab = 180^\circ - 50^\circ - 30^\circ = 100^\circ,$$

то

$$\begin{aligned} (ob)^2 &= 8^2 + 5^2 - 2 \times 8 \times 5 \cos 100^\circ = \\ &= 64 + 25 - (-13.892) = 102.892. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$ob = \sqrt{102.892} = 10.14 \text{ кН.}$$

По теореме синусов

$$\frac{5}{\sin \angle aob} = \frac{10.14}{\sin 100^\circ},$$

откуда

$$\sin \angle aob = \frac{5 \sin 100^\circ}{10.14} = 0.4856.$$

Следовательно, $\angle aob = \arcsin(0.4856) = 29.05^\circ$, а угол φ на **Рис. 11.66** равен $50^\circ - 29.05^\circ = 20.95^\circ$.

Итак, равнодействующая двух сил равна **10.14 кН** и направлена под углом **20.95°** к горизонтали.

Равнодействующая трёх компланарных сил

В случае когда к одной точке приложены три силы F_1 , F_2 и F_3 , векторная диаграмма выглядит так, как это показано на **Рис. 11.7**. Здесь применяется метод, названный «нос к хвосту».

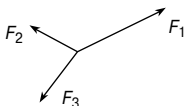


Рис. 11.7

Метод заключается в следующем:

1. В заданном масштабе в соответствии с величиной и направлением строят вектор oa , отображающий силу F_1 (см. **Рис. 11.8**).

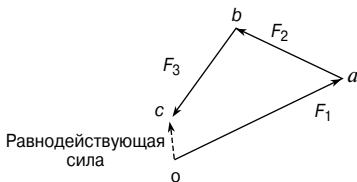


Рис. 11.8

2. От «носа» вектора oa откладывают вектор ab , отображающий силу F_2 .

3. От «носа» вектора ab откладывают вектор bc , отображающий силу F_3 .

4. Соединив точку o с точкой c , получают вектор oc , являющийся равнодействующей трех первоначальных векторов (Рис. 11.8). Равнодействующая начинается в точке начала отсчета, то есть в точке o , и заканчивается у «носа» последнего вектора, то есть в точке c . Если к исходной точке приложить некую силу, совпадающую с равнодействующей по величине и направлению, то эффект от её воздействия будет точно такой же, как от всех трёх сил F_1 , F_2 и F_3 , когда они действуют одновременно. Векторная диаграмма, показанная на Рис. 11.8, называется *многоугольником сил*.

Например, даны три компланарные силы, приложенные к одной точке: сила A , равная 12 Н и направленная вправо по горизонтали, сила B , равная 7 Н и направленная под углом 60° по отношению к силе A , и сила C , равная 15 Н и направленная под углом 150° по отношению к силе A . Векторы в системе координат показаны на Рис. 11.9. Найдем величину и направление результирующей силы.

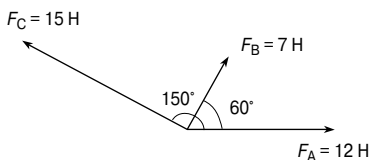


Рис. 11.9

Векторная диаграмма, изображённая на Рис. 11.10, строится в следующей последовательности:

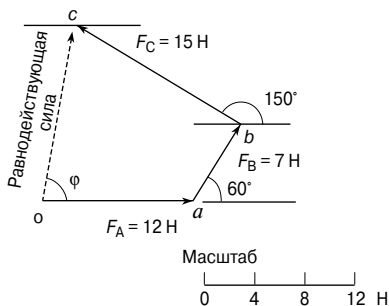


Рис. 11.10

- вектор oa , равный 12 единицам, отображает величину и направление силы 12 Н;
- от «носа» вектора oa под углом 60° откладываем вектор ab , равный 7 единицам;
- от «носа» вектора ab под углом 150° откладываем вектор bc , равный 15 единицам (то есть 150° от горизонтали);
- вектор oc представляет собой равнодействующую силу 13,8 Н, направленную под углом $\varphi = 80^\circ$ к горизонтали.

Итак, **равнодействующая трёх сил F_A , F_B и F_C равна 13,8 Н и направлена под углом 80° к горизонтали.**

Компланарные силы в равновесии

Когда три или более компланарные силы приложены к одной точке и их векторная диаграмма замкнута, то равнодействующая отсутствует. Силы, действующие в данной точке, находятся в *равновесии*.

Например, на тело, находящееся в равновесии, действуют пять компланарных сил. Расстановка сил такова: сила 12 кН направлена горизонтально вправо; сила 18 кН направлена под углом 75° к горизонтали; сила 7 кН, направлена под углом 165° к горизонтали; сила 16 кН, вектор которой начинается от «носа» вектора силы, равной 7 кН, и, наконец, сила 15 кН, начинающаяся от «носа» вектора силы 16 кН. Определим направления сил 16 кН и 15 кН относительно силы 12 кН.

На **Рис. 11.11** видно, что сила 12 кН — это вектор oa длиной 12 единиц, направленный строго вправо по горизонтали.

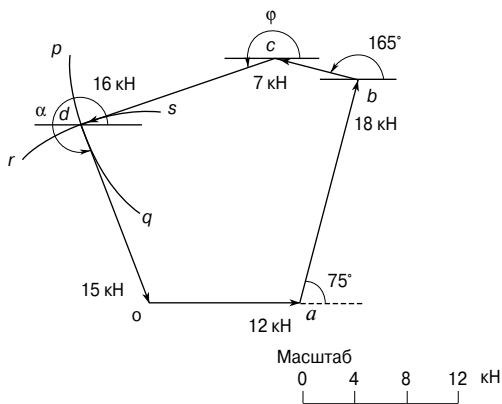


Рис. 11.11

Из точки a отложен вектор ab длиной 18 единиц под углом 75° к горизонтали. Из точки b начинается вектор bc длиной 7

единиц под углом 165° . Направление вектора силы 16 кН неизвестно, поэтому рисуем дугу pq радиусом 16 единиц с центром в точке c . Известно, что силы уравновешены, следовательно, они должны образовать замкнутую фигуру, а именно многоугольник. Из точки o проводим дугу rs радиусом 15 единиц. Точку пересечения двух дуг назовём d .

Измерив углы, получаем

$$\varphi = 198^\circ \text{ и } \alpha = 291^\circ.$$

Итак, по отношению к силе, равной 12 кН, сила, равная 16 кН, действует под углом 198° (или -162°), а сила 15 кН — под углом 291° (или -69°).

Разложение сил

Вектор величины может быть представлен его *горизонтальной* и *вертикальной составляющими*.

Например, на Рис. 11.12 показан вектор силы 10 Н, действующей под углом 60° к горизонтали.

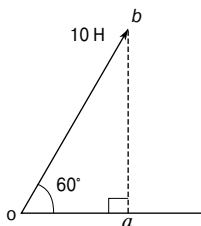


Рис. 11.12

Если на горизонтальную прямую из точки b опустить перпендикуляр, то получим отрезок прямой oa , называемый горизонтальной составляющей силы 10 Н, и отрезок ab , называемый вертикальной составляющей этой силы.

По правилам тригонометрии $\cos 60^\circ = \frac{oa}{ob}$, и, следовательно, горизонтальная составляющая $oa = 10 \cos 60^\circ$.

Аналогично $\sin 60^\circ = \frac{ab}{ob}$, следовательно, вертикальная составляющая $ab = 10 \sin 60^\circ$.

Эта процедура называется *нахождение горизонтальной и вертикальной составляющих вектора* или *разложение вектора*. Его можно применять как альтернативу графическим методам вычисления равнодействующей двух или более компланарных сил, действующих в данной точке.

Например, определим равнодействующую двух сил: силы, равной 10 Н, направленной под углом 60° к горизонтали, и силы, равной 20 Н, направленной под углом -30° к горизонтали (Рис. 11.13).

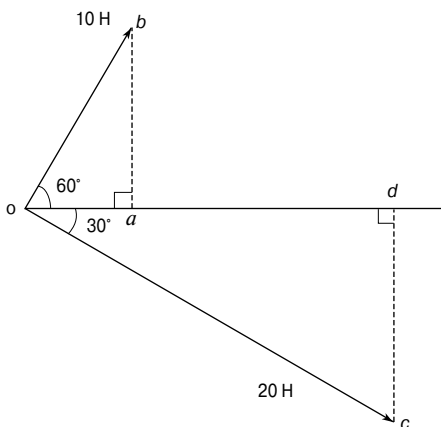


Рис. 11.13

- Определим горизонтальную и вертикальную составляющие силы, равной 10 Н.

Горизонтальная составляющая равна

$$oa = 10 \cos 60^\circ = 5.0 \text{ Н.}$$

Вертикальная составляющая равна

$$ab = 10 \sin 60^\circ = 8.66 \text{ Н.}$$

- Определим горизонтальную и вертикальную составляющие силы, равной 20 Н.

Горизонтальная составляющая равна

$$od = 20 \cos(-30^\circ) = 17.32 \text{ Н.}$$

Вертикальная составляющая равна

$$cd = 20 \sin(-30^\circ) = -10.0 \text{ Н.}$$

- Определим общую горизонтальную составляющую:

$$oa + od = 5.0 + 17.32 = 22.32 \text{ Н.}$$

- Определим общую вертикальную составляющую:

$$ab + cd = 8.66 + (-10.0) = -1.34 \text{ Н.}$$

- Изобразим суммарные горизонтальную и вертикальную составляющие, как показано на **Рис. 11.14**.

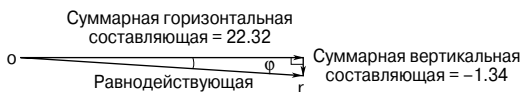


Рис. 11.14

Тогда значение вектора равнодействующей силы равно длине or , и по теореме Пифагора имеем

$$or = \sqrt{22.32^2 + 1.34^2} = 22.36 \text{ Н.}$$

Применяя правила тригонометрии, получаем, что

$$\varphi = \text{arctg} \frac{1.34}{22.32} = -3.44^\circ.$$

Итак, равнодействующая сил, равных 10 Н и 20 Н, показанная на **Рис. 11.13**, равна **22.36 Н** и действует под углом **-3.44° к горизонтали**.

Этот пример показывает, как применять разложение сил для подсчёта равнодействующей двух компланарных сил, действующих в заданной точке.

Рассмотрим задачу с тремя компланарными силами.

Например, даны три компланарные силы, действующие в данной точке: сила, равная 200 Н, направленная под углом 20° к горизонтали; сила, равная 400 Н, направленная под углом 165° к горизонтали, и третья сила, равная 500 Н, направленная под углом 250° к горизонтали. Путём разложения сил определим их равнодействующую.

С помощью калькулятора рассчитаем следующую таблицу:

	Горизонтальная составляющая
Сила 1	200 cos20° = 187.94
Сила 2	400 cos165° = -386.37
Сила 3	500 cos250° = -171.01
Горизонтальная составляющая трёх сил	-369.44
	Вертикальная составляющая
Сила 1	200 sin20° = 68.40
Сила 2	400 sin165° = -103.53
Сила 3	500 sin250° = -469.85
Вертикальная составляющая трёх сил	-297.92

Суммарные горизонтальная и вертикальная составляющие показаны на **Рис. 11.15**.

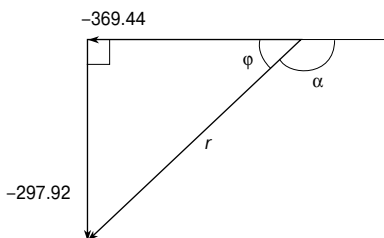


Рис. 11.15

Равнодействующая $r = \sqrt{369.44^2 + 297.92^2} = 474.60$
и угол

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{297.92}{369.44} = 38.88^\circ.$$

Зная φ , находим α :

$$\alpha = 180^\circ - 38.88^\circ = 141.12^\circ.$$

Итак, равнодействующая трёх сил равна **474.6 Н** и направлена под углом **-141.12°** (или **$+218.88^\circ$**) к горизонтالي.

Заключение

Для определения равнодействующей *двух компланарных сил*, действующих в одной точке, применяются четыре основных метода.

Построение	методом треугольника
	методом параллелограмма
Вычисление	с помощью теорем косинусов и синусов
	методом разложения сил

Для определения равнодействующей *более чем двух сил*, действующих в одной точке, применяются два основных метода.

Построение	методом многоугольника
Вычисление	методом разложения сил

12. ПРОСТЫЕ ЗАКРЕПЛЁННЫЕ БАЛКИ

Момент силы

Когда гаечным ключом закручивают гайку, то приложенная сила стремится повернуть её по часовой стрелке. Этот вращающий эффект называется *моментом силы* или просто *моментом*. Величина момента, действующего на гайку, зависит от двух факторов:

- 1) силы, действующей под прямыми углами к стержню ключа;
- 2) длины перпендикуляра между точкой приложения силы и центром гайки.

Для случая, показанного на **Рис. 12.1**, момент силы M , действующей вокруг точки P , равен силе, умноженной на перпендикуляр, опущенный из точки P на линию действия силы, то есть на радиус поворота:

$$M = F \times d$$

Единица момента силы — *ньютон-метр* [Н·м].

Например, если сила F на **Рис. 12.1** равна 7 Н, а перпендикуляр d равен 3 м, то момент силы M равен $7 \text{ Н} \times 3 \text{ м} = 21 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

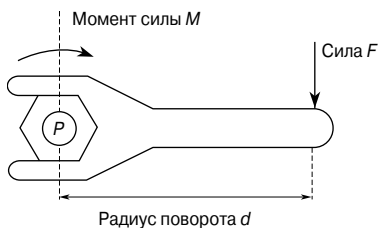


Рис. 12.1

Равновесие и равенство моментов

Если на тело действует больше одной силы и они приложены к разным точкам тела, то вращающий эффект этих сил, то есть их моменты, должен быть учтен.

На **Рис. 12.2** показаны балка с точкой опоры P , реакция опоры R_p действующая вертикально вверх, и силы F_1 и F_2 , направленные вертикально вниз и расположенные на расстояниях соответственно a и b от точки опоры P .

Говорят, что балка находится в равновесии, если не существует причин для её движения. Равновесие сохраняется при следующих условиях:

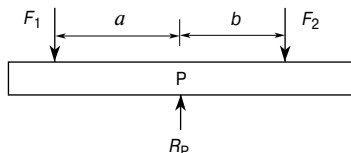


Рис. 12.2

- Сумма сил, действующих вертикально вниз, должна быть равна сумме сил, действующих вертикально вверх, то есть для **Рис. 12.2**

$$R = F_1 + F_2.$$

- Общий момент сил, действующих на балку, должен быть равен нулю; для этого необходимо, чтобы **сумма моментов по часовой стрелке вокруг некоей точки должна быть равна сумме моментов против часовой стрелки вокруг той же точки.**

Это условие называют *условием равенства моментов*. Следовательно, если рассматривать точку **P** на **Рис. 12.2**, получаем:

$F_2 \times b$ — момент, направленный по часовой стрелке,

$F_1 \times a$ — момент, направленный против часовой стрелки.

Отсюда получаем условие равновесия:

$$F_1 a = F_2 b$$

Например, определим величину сил F_1 и F_2 для состоящей из однородного материала и находящейся в состоянии равновесия балки с центральной точкой опоры, показанной на **Рис. 12.3**.

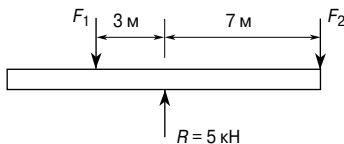


Рис. 12.3

Балка находится в равновесии, если, во-первых,

$$R = F_1 + F_2,$$

то есть

$$5 = F_1 + F_2, \quad (1)$$

и, во-вторых,

$$F_1 \times 3 = F_2 \times 7. \quad (2)$$

Из уравнения (1) следует:

$$F_2 = 5 - F_1.$$

Подставляя значение F_2 в уравнение (2), получаем

$$F_1 \times 3 = (5 - F_1) \times 7,$$

то есть

$$3F_1 = 35 - 7F_1,$$

$$10F_1 = 35,$$

откуда

$$F_1 = 3.5 \text{ кН.}$$

Так как

$$F_2 = 5 - F_1,$$

то, подставляя значение F_1 имеем

$$F_2 = 1.5 \text{ кН.}$$

Следовательно, балка находится в равновесии, когда $F_1 = 3.5 \text{ кН}$ и $F_2 = 1.5 \text{ кН}$.

Простые закреплённые балки с точечными нагрузками

Простая закреплённая балка — это балка, покоящаяся на двух опорах и свободно передвигаемая по горизонтали.

Две простые закреплённые балки с грузами, закрепленными в заданных точках балки, называемыми *точечной нагрузкой*, показаны на **Рис. 12.4**.

Человек, стоящий на деревянной доске, покоящейся на двух опорах на концах, благодаря своей массе действует на неё с силой F , которая направлена вертикально вниз. Такая ситуация показана на **Рис. 12.4а**, массой доски при этом пренебрегают.

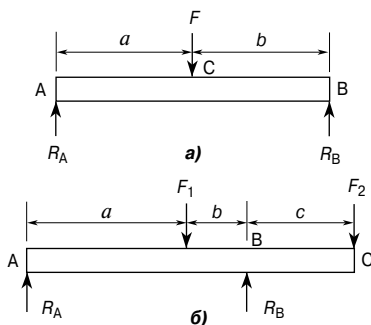


Рис. 12.4

Силы, действующие со стороны опор, на которые опирается доска, R_A и R_B , направлены вертикально вверх. Такую силу называют *реакцией опоры*.

Когда все силы действуют в одной плоскости, алгебраическая сумма моментов может быть получена в *любой* точке.

Составим уравнения равновесия для балки, изображённой на **Рис. 12.4а**:

- Уравнение для сил, действующих на балку

$$R_A + R_B = F.$$

- Уравнение для моментов в точке А

$$F(a) = R_B(a + b).$$

(Аналогично для моментов в точке С $R_A a = R_B b$.)

Для балки, изображённой на **Рис. 12.4б**, имеем:

- Уравнение для сил, действующих на балку

$$R_A + R_B = F_1 + F_2.$$

- Уравнение для моментов в точке В

$$R_A(a + b) + F_2 c = F_1 b.$$

Типичными примерами простых закреплённых балок с точечной нагрузкой являются мосты, балки зданий и основания механических станков.

Например, для балки, показанной на **Рис. 12.5**, рассчитаем 1) силу R_A , действующую на опору А; 2) расстояние d от конца балки (силами, создаваемыми массой балки, пренебрегаем).

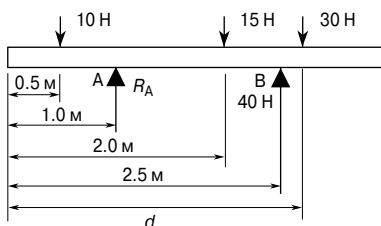


Рис. 12.5

1. Силы, действующие вверх, равны силам, действующим вниз, то есть

$$(R_A + 40) \text{ Н} = (10 + 15 + 30) \text{ Н},$$

откуда

$$R_A = 10 + 15 + 30 - 40 = 15 \text{ Н}.$$

2. Движение по часовой стрелке равно движению против часовой стрелки. Тогда моменты вокруг левого конца бруса и правило моментов дают следующее:

$$(10 \times 0.5) + (15 \times 2.0) + 30 \times d = (15 \times 1.0) + (40 \times 2.5),$$

то есть

$$35 \text{ Н} \cdot \text{м} + 30 \text{ Н} \times d = 115 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

откуда можно определить **расстояние**

$$d = \frac{(115 - 35) \text{ Н} \cdot \text{м}}{30 \text{ Н}} = 2.67 \text{ м}.$$

13. СИЛЫ СДВИГА И ИЗГИБАЮЩИЙ МОМЕНТ

Силы сдвига

У балки, находящейся в равновесии, силы слева от любой точки, например X на **Рис. 13.1**, должны быть равны силам справа от неё, а момент сил слева в районе точки X должен быть равен моменту сил справа от этой точки.

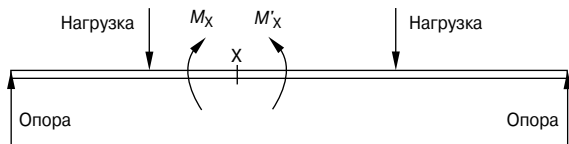


Рис. 13.1

Хотя при равновесии как силы, так и моменты уравниваются, величина и природа сил и моментов должны приниматься в расчёт, так как именно они определяют нагрузку в точке X , изгиб балки и отклонение. Равнодействующая слева от X и равнодействующая справа (силы или вертикальные составляющие сил) формируют пару сил, стремящихся расколоть брус в этом сечении. *Силу сдвига* определяют как силу, в данном сечении направленную поперёк балки и стремящуюся расколоть её в этом сечении.

Условно принято, что если направление сил, стремящихся разломить брус, таково, как это показано на **Рис. 13.2а**, то такую силу сдвига считают положительной, то есть $+F$; если же направление сил соответствует показанному на **Рис. 13.2б**, то такую силу считают отрицательной, то есть $-F$.

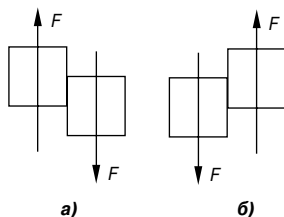


Рис. 13.2

Изгибающий момент

Изгибающий момент в данном сечении балки определён как результирующий момент всех сил либо слева от сечения, либо справа.

На **Рис. 13.1** это M_x или M'_x . Эти моменты, направленные по часовой стрелке слева и против часовой стрелки справа, заставят балку выгнуться вверх. Это явление называется *прогибом*. Такой прогиб принято считать положительным, а изгибающие моменты — положительными изгибающими моментами. Когда искривление происходит вниз, то такое явление называется *изгибом*, а изгибающий момент считается отрицательным.

Сила сдвига и изгибающие моменты различны по всей длине бруса. Диаграммы, показывающие силу сдвига и изгибающий момент для каждой точки бруса, называют *диаграммами силы сдвига* и *изгибающего момента* соответственно.

Силы сдвига и диаграммы силы сдвига менее важны, чем изгибающие моменты, но могут оказаться полезными при построении графиков изгибающего момента. К примеру, там, где сила сдвига равна нулю, изгибающий момент максимальный или минимальный.

Например, построим диаграмму силы сдвига и диаграмму изгибающего момента для балки, изображённой на **Рис. 13.3**.

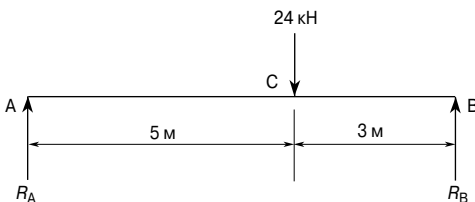


Рис. 13.3

Сначала необходимо подсчитать реакции опор в точках А и В. Рассмотрим балку с фиксацией в этих точках. Это означает, что балка опирается в этих точках на опоры и испытывает вертикально направленную силу реакции опор. В обычных условиях для равновесия необходимо, чтобы результирующий момент около любой точки был равен нулю, а сумма сил, направленных вверх, равнялась сумме сил, направленных вниз. Следовательно, вычисляя моменты у точки А, момент R_B должен уравновешивать момент нагрузки в точке С, то есть

$$R_B \times 8 \text{ м} = 24 \text{ кН} \times 5 \text{ м} = 120 \text{ кН},$$

откуда

$$R_B = \frac{120 \text{ кН} \cdot \text{м}}{8 \text{ м}} = 15 \text{ кН}.$$

Тогда реакция опоры в точке А

$$R_A = 24 \text{ кН} - 15 \text{ кН} = 9 \text{ кН}.$$

Сразу справа от точки А сила сдвига равна R_A , то есть 9 кН. Так как эта сила влево от сечения считается направленной

вверх, сила сдвига положительна. Сила сдвига не изменится на всём протяжении от А до С, так как на этом участке не действуют никакие другие силы.

Рассматривая любую точку правее точки С, надо принимать во внимание нагрузку в С, а также реакцию опоры R_A или же аналогично только одну реакцию опоры R_B . Сила сдвига равна 15 кН. Это значение можно получить, либо зная, что $R_B = 15$ кН, либо вычитая из нагрузки в точке С реакцию опоры R_A , что также равно 15 кН. Для любой точки между С и В сила справа будет положительной, а сила сдвига, следовательно, отрицательной. Отметим, что сила сдвига резко меняется в точке С.

Изгибающий момент в точке А равен нулю, так как слева не действуют никакие силы. В точке на расстоянии 1 м вправо от А, реакция опоры R_A , момент единственной там силы, влево от этой точки, равен $R_A \times 1 \text{ м} = 9 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Так как этот момент направлен по часовой стрелке, изгибающий момент положителен и равен +9 кН·м. В точках, расположенных в 2, 3, 4, и 5 метрах вправо от А, изгибающие моменты соответственно равны:

$$R_A \times 2 \text{ м} = 9 \text{ кН} \times 2 \text{ м} = 18 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$R_A \times 3 \text{ м} = 9 \text{ кН} \times 3 \text{ м} = 27 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$R_A \times 4 \text{ м} = 9 \text{ кН} \times 4 \text{ м} = 36 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$R_A \times 5 \text{ м} = 9 \text{ кН} \times 5 \text{ м} = 45 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Все эти моменты положительны.

Для точек справа от С надо учитывать нагрузку в этой точке, а также реакцию опоры R_A или просто использовать момент R_B . В точках, находящихся в 5, 6 и 7 метрах от А, соответствующие изгибающие моменты равны:

$$R_B \times 3 \text{ м} = 15 \text{ кН} \times 3 \text{ м} = 45 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$R_B \times 2 \text{ м} = 15 \text{ кН} \times 2 \text{ м} = 30 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$R_B \times 1 \text{ м} = 15 \text{ кН} \times 1 \text{ м} = 15 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Так как моменты вправо от этих точек отсчитывают против часовой стрелки, все они являются положительными изгибающими моментами. В точке В изгибающий момент равен нулю, так как справа от неё никакие силы не действуют. Ниже в таблице приведён окончательный результат.

Расстояние от точки А [м]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Сила сдвига [кН]	+9	+9	+9	+9	+9	+9	-15	-15	-15
						-15			
Изгибающий момент [кН·м]	0	+9	+18	+27	+36	+45	+30	+15	0

Используя приведённые выше значения, строим диаграммы сил сдвига и изгибающего момента (**Рис. 13.4**).

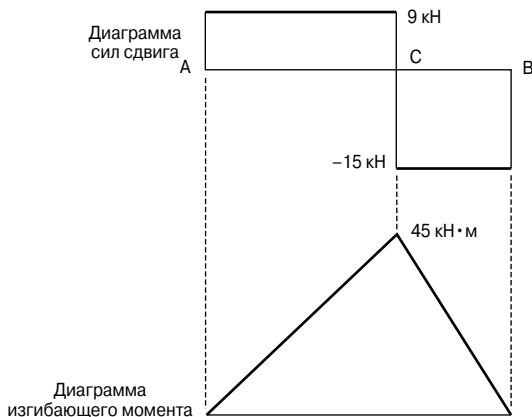


Рис. 13.4

Пошаговая диаграмма сил сдвига, только с горизонтальными и вертикальными линиями, получается всегда, когда балка испытывает только сосредоточенные нагрузки. Изменение силы сдвига скачком происходит там, где есть сосредоточенные нагрузки, в том числе силы реакции опор. Для такой простой балки с нагрузками изгибающий момент всегда состоит из прямых линий, обычно идущих под наклоном. Резкое изменение изгибающего момента может возникнуть только в необычных условиях, когда момент добавляется к балке как удалённый от нагрузки.

14. НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ ИЗГИБЕ

Ниже приведено основное уравнение изгиба балки:

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I} \left(= \frac{E}{R} \right)$$

где σ — напряжение, возникшее от изгиба на расстоянии y от нейтральной оси,

M — изгибающий момент,

I — второй момент области сечения балки около его нейтральной оси,

E — модуль упругости,

R — радиус кривизны.

Момент сопротивления сечения

$$Z = \frac{I}{y_{\max}}$$

Ко вторым моментам области сечения бруса, которые встречаются наиболее часто, относятся (вокруг центральной оси XX):

- *сплошной многоугольник* (Рис. 14.1)

$$I = \frac{BD^3}{12},$$

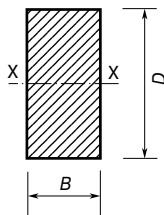


Рис. 14.1

- *многоугольник с симметричными выемками* (Рис. 14.2)

$$I = \frac{BD^3 - bd^3}{12},$$

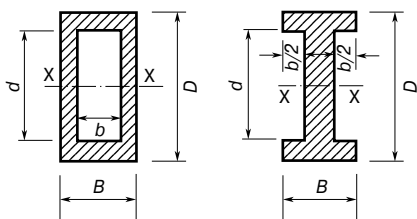


Рис. 14.2

- цельный прут (Рис. 14.3)

$$I = \frac{\pi D^4}{64},$$

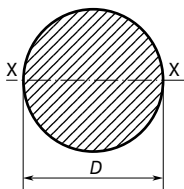


Рис. 14.3

- полый цилиндр (труба) (Рис. 14.4)

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}.$$

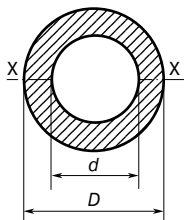


Рис. 14.4

Нейтральная ось любого сечения, где изгиб не производит никакого натяжения, а следовательно, и никакого напряжения, всегда проходит через центр сечения. Для вышеперечисленных симметричных сечений это означает, что для вертикальной нагрузки нейтральная ось является горизонтальной осью симметрии.

Например, вычислим максимальное напряжение в условиях следующей задачи. Допустим, максимальный изгибающий момент на балке равен 120 Н·м. Если сечение балки представляет собой треугольник с основанием 18 мм и высотой 36 мм, то максимальное напряжение при изгибе вычисляется в следующей последовательности.

Второй момент области сечения вокруг нейтральной оси:

$$I = \frac{bD^3}{12} = \frac{(18) \cdot (36)^3}{12} = 6.9984 \times 10^4 \text{ мм}^4.$$

Максимальное расстояние от нейтральной оси:

$$y = \frac{36}{2} = 18 \text{ мм.}$$

Так как

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I},$$

то σ — максимальное напряжение при изгибе появится там, где M и y принимают максимальные значения.

То есть

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{My}{I} = \frac{120 \text{ Н}\cdot\text{м} \times 18 \text{ мм}}{6.9984 \times 10^4 \text{ мм}^4} = \frac{120 \text{ Н}\cdot\text{м} \times 18 \times 10^{-3} \text{ м}}{6.9984 \times 10^4 \times 10^{-12} \text{ м}^4} = \\ &= 30.86 \text{ МН/м}^2 = \mathbf{30.86 \text{ МПа}}.\end{aligned}$$

Другой пример. У консоли трубчатой конструкции внешний и внутренний радиусы равны 100 и 120 мм соответственно. Определим максимальную нагрузку, которую она может выдержать на конце при максимальном напряжении не выше 50 МПа (предполагается, что вес балки не учитывается), если длина консоли равна 800 мм.

Второй момент области сечения равен

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (120^4 - 100^4) = 5.27 \times 10^6 \text{ мм}^4.$$

Из $\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I}$ получаем, что максимально допустимый изгибающий момент M даёт максимально допустимое напряжение на максимальном расстоянии y от нейтральной оси, то есть

$$\begin{aligned}M &= \frac{\sigma I}{y} = \frac{50 \text{ МПа} \times 5.27 \times 10^6 \text{ мм}^4}{60 \text{ мм}} = \\ &= \frac{50 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \times 5.27 \times 10^6 \text{ м}^4}{60 \times 10^3 \text{ м}} = \\ &= \frac{50 \times 5.27 \times 10^3}{60} \text{ Н}\cdot\text{м} = 4.392 \text{ кН}\cdot\text{м}.\end{aligned}$$

Если W — нагрузка (в кН) на свободном конце консоли, то изгибающий момент в точке на расстоянии x от этого свободного конца равен W_x , при этом максимальное его значение, где консоль встроена в стену, определено как

$$W \text{ кН} \times 0.8 \text{ м}, \text{ или } 0.8W \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Приравняв это к подсчитанному ранее максимально допустимому изгибающему моменту, получим

$$0.8W = 4.392 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

откуда **максимальная нагрузка на свободном конце**

$$W = \frac{4.392 \text{ кН}\cdot\text{м}}{0.8 \text{ м}} = \mathbf{5.49 \text{ кН}}.$$

15. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ И ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Линейная и угловая скорости

Радян

Радян [рад] — это единица *углового смещения*. Один радиан равен углу с вершиной в центре окружности, образованному дугой, длина которой равна радиусу этой окружности, как это показано на **Рис. 15.1**.

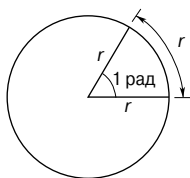


Рис. 15.1

Угол в радианах (θ), длина дуги (s) и радиус окружности (r) связаны между собой соотношением

$$\boxed{s = r\theta} \quad (1)$$

Так как длина дуги полной окружности равна $2\pi r$, а угол с вершиной в центре окружности равен 360° , то для полной окружности уравнение (1) принимает вид

$$2\pi r = r\theta,$$

или

$$\theta = 2\pi \text{ рад.}$$

Отсюда

$$2\pi \text{ рад равносильно } 360^\circ. \quad (2)$$

Линейная скорость

Линейная скорость v определена, как скорость изменения линейного перемещения s в течение времени t . Для движения по прямой получаем:

$$\text{линейная скорость} = \frac{\text{изменение положения}}{\text{затраченное время}},$$

то есть

$$\boxed{v = \frac{s}{t}} \quad (3)$$

Единица линейной скорости — метр в секунду [м/с].

Угловая скорость

Скорость вращения колеса или вала часто измеряют в *оборотах в минуту* или в *оборотах в секунду*, но эти единицы измерения не входят в состав когерентной системы единиц измерений. В системе СИ угловая скорость — это угол поворота за одну секунду.

Угловая скорость ω определена как изменение углового смещения θ за время этого изменения t . Для тела, вращающегося вокруг закреплённой оси при постоянной скорости

$$\text{угловая скорость} = \frac{\text{угол поворота}}{\text{затраченное время}},$$

то есть

$$\boxed{\omega = \frac{\theta}{t}} \quad (4)$$

Единица угловой скорости — *радиан в секунду* [рад/с].

Тело, вращающееся с постоянной скоростью, равной n оборотов в секунду, смещается на угол, равный $2\pi n$ радиан за одну секунду, то есть его угловая скорость равна

$$\boxed{\omega = 2\pi n \text{ рад/с}} \quad (5)$$

Зная, что $s = r\theta$, (уравнение (1)), а $\theta = \omega t$ (из уравнения (4)), получаем

$$s = r\omega t,$$

откуда

$$\frac{s}{t} = \omega r.$$

Однако поскольку $v = \frac{s}{t}$ (уравнение (3)), то

$$\boxed{v = \omega r} \quad (6)$$

Уравнение (6) устанавливает соотношение между линейной скоростью v и угловой скоростью ω .

Например, колесо диаметром 540 мм вращается со скоростью 1 500/ π оборотов в минуту. Требуется определить угловую скорость колеса и линейную скорость точки на ободе колеса.

В соответствии с уравнением (5)

$$\omega = 2\pi n,$$

где n — скорость вращения в оборотах в секунду.

Переводим данную скорость n в обороты в секунду:

$$n = \frac{1500}{60\pi} \text{ оборотов в секунду.}$$

Тогда **угловая скорость**

$$\omega = 2\pi \frac{1500}{60\pi} = 50 \text{ рад/с.}$$

Линейная скорость точки на ободу

$$v = \omega r,$$

где r — радиус колеса.

Зная диаметр, находим радиус:

$$r = 0.54/2, \text{ или } 0.27 \text{ м.}$$

Следовательно,

$$\text{линейная скорость } v = 50 \times 0.27 = 13.5 \text{ м/с.}$$

Линейное и угловое ускорение

Линейное ускорение a определено как быстрота изменения линейной скорости со временем (как показано в гл. 8). Линейное ускорение тела, скорость которого увеличивается равномерно, определено как

$$\text{линейное ускорение} = \frac{\text{изменение линейной скорости}}{\text{затраченное время}},$$

то есть

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} \quad (7)$$

Единица линейного ускорения — метр в секунду в квадрате [м/с^2]. Преобразуя уравнение (7), получаем

$$v_2 = v_1 + at \quad (8)$$

Угловое ускорение α определено как быстрота изменения угловой скорости со временем. Угловое ускорение тела, у которого угловая скорость увеличивается равномерно, определено как

$$\text{угловое ускорение} = \frac{\text{изменение угловой скорости}}{\text{затраченное время}},$$

то есть

$$\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} \quad (9)$$

Единица углового ускорения — радиан в секунду в квадрате [рад/с^2].

Преобразуя уравнение (9), получаем

$$\boxed{\omega_2 = \omega_1 + \alpha t} \quad (10)$$

В соответствии с уравнением (6)

$$v = \omega r.$$

Так как при движении по кругу радиус r постоянен, то

$$v_2 = \omega_2 r$$

и

$$v_1 = \omega_1 r.$$

Следовательно, уравнение (7) примет вид

$$a = \frac{\omega_2 r - \omega_1 r}{t} = \frac{r(\omega_2 - \omega_1)}{t}.$$

Тогда, имея в виду уравнение (9), получаем

$$\boxed{a = r\alpha} \quad (11)$$

Например, определим угловое ускорение, если скорость вала увеличивается равномерно от 300 оборотов в минуту до 800 оборотов в минуту за 10 сек.

Первоначальная угловая скорость

$$\omega_1 = 300 \text{ об/мин} = \frac{300}{60} \text{ об/с} = \frac{300 \times 2\pi}{60} \text{ рад/с};$$

конечная угловая скорость

$$\omega_2 = \frac{800 \times 2\pi}{60} \text{ рад/с};$$

а время t равно 10 с.

Подставляя полученные выражения в уравнение (9), найдем **угловое ускорение**

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\frac{800 \times 2\pi}{60} - \frac{300 \times 2\pi}{60}}{10} \text{ рад/с}^2 = \\ &= \frac{500 \times 2\pi}{60 \times 10} = \mathbf{5.24 \text{ рад/с}^2}. \end{aligned}$$

Если диаметр вала равен 50 мм, то в соответствии с уравнением (11) **линейное ускорение** будет равно

$$a = r\alpha = \frac{50}{2} \times 10^{-3} \times 5.24 = \mathbf{0.131 \text{ м/с}^2}.$$

Другие уравнения движения

Из уравнения (3) следует, что

$$s = vt.$$

При условии, что линейная скорость изменяется равномерно от v_1 до v_2 ,

$$s = \text{средняя линейная скорость} \times \text{время},$$

то есть

$$s = \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) t \quad (12)$$

Из уравнения (4)

$$\theta = \omega t,$$

поэтому при условии, что угловая скорость изменяется равномерно от ω_1 до ω_2 , имеем

$$\theta = \text{средняя угловая скорость} \times \text{время},$$

то есть

$$\theta = \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \right) t \quad (13)$$

Два уравнения прямолинейного движения могут быть получены из уравнений (8) и (12):

$$s = v_1 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (14)$$

и

$$v_2^2 = v_1^2 + 2as \quad (15)$$

Два уравнения вращательного движения могут быть получены из уравнений (10) и (13):

$$\theta = \omega_1 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (16)$$

и

$$\omega_2^2 = \omega_1^2 + 2\alpha\theta \quad (17)$$

В Табл. 15.1 собраны все основные уравнения для прямолинейного и вращательного движения в условиях равномерного изменения скорости и постоянного ускорения. Там же даны соотношения между линейными и угловыми величинами.

Таблица 15.1

s — длина дуги [м]	r — радиус круга [м]	
t — время [с]	θ — угол [рад]	
v — линейная скорость [м/с]	ω — угловая скорость [рад/с]	
v_1 — начальная скорость [м/с]	ω_1 — начальная угловая скорость [рад/с]	
v_2 — конечная скорость [м/с]	ω_2 — конечная угловая скорость [рад/с]	
a — линейное ускорение [м/с ²]	α — угловое ускорение [рад/с ²]	
n — скорость вращения [об/с]		
Номер уравнения	Линейное движение	Круговое движение
(1)	$s = r\theta$ м	
(2)		2π рад = 360°
(3) и (4)	$v = \frac{s}{t}$ м/с	$\omega = \frac{\theta}{t}$ рад/с
(5)		$\omega = 2\pi n$ рад/с
(6)	$v = \omega r$ м/с	
(8) и (10)	$v_2 = (v_1 + at)$ м/с	$\omega_2 = (\omega_1 + \alpha t)$ рад/с
(11)	$a = r\alpha$ м/с ²	
(12) и (13)	$s = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)t$	$\theta = \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)t$
(14) и (16)	$s = v_1 t + \frac{1}{2}at^2$	$\theta = \omega_1 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$
(15) и (17)	$v_2^2 = v_1^2 + 2as$	$\omega_2^2 = \omega_1^2 + 2\alpha s$

Например, вал находящегося в покое электромотора, начиная равномерно разгоняться с ускорением 15 рад/с^2 в течение 0.4 с . Требуется определить угол поворота вала (в радианах) за это время.

Из уравнения (16)

$$\theta = \omega_1 t + \frac{1}{2}\alpha t^2.$$

Так как вал находился в покое, то

$$\omega_1 = 0$$

и соответственно

$$\theta = \frac{1}{2}\alpha t^2.$$

Так как угловое ускорение $\alpha = 15 \text{ рад/с}^2$, а время $t = 0.4 \text{ с}$, то **угол поворота**

$$\theta = \frac{1}{2} \times 15 \times 0.4^2 = \mathbf{1.2 \text{ рад.}}$$

Относительная векторная скорость

Как показано в главе 3, векторная величина изображается отрезком прямой, направленным по линии действия этой величины и имеющим длину, пропорциональную этой величине. Следовательно, отрезок ab на **Рис. 15.2** отражает векторную скорость, равную 20 м/с и имеющую направление на запад.

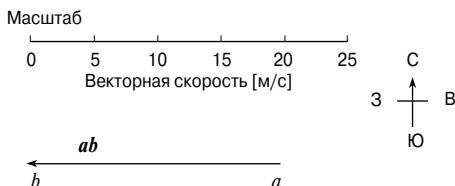


Рис. 15.2

Поскольку буквы набраны «жирным» шрифтом — ab , это означает, что величина векторная, а порядок букв показывает, что действие направлено из a в b .

Например, рассмотрим случай, когда два самолёта, А и В, летят на постоянной высоте. Самолёт А направляется на север со скоростью 200 м/с, а курс самолёта В, летящего со скоростью 300 м/с, составляет 30° на северо-восток. Эта ситуация отражена на **Рис. 15.3**.

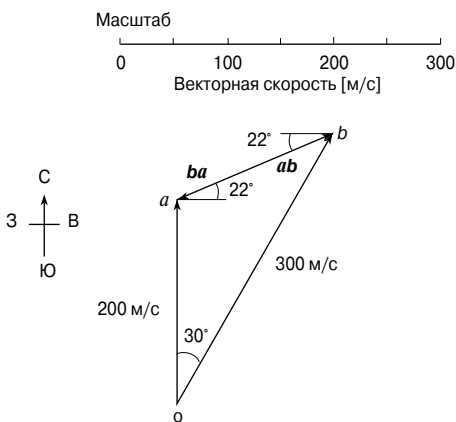


Рис. 15.3

Вектор oa характеризует скорость самолёта А, а вектор ob — самолёта В относительно фиксированной точки o .

Векторная скорость В относительно А (то есть скорость, при которой движущимся пассажирам самолёта А видится движение

самолёта В) представлена вектором ab , численно равна **160 м/с** и имеет направление **22° на северо-восток**.

Векторная скорость А относительно В (при которой движущимся пассажирам самолёта В видится движение самолёта А) представлена вектором ba , численно равна **160 м/с** и имеет направление **22° на юго-запад**.

Другой пример. Кран движется по прямой с постоянной горизонтальной скоростью 2 м/с. Одновременно с этим он поднимает груз с вертикальной скоростью 5 м/с. Подсчитаем векторную скорость груза относительно фиксированной точки на поверхности земли.

На **Рис. 15.4** показана векторная диаграмма, отображающая движение крана и груза.

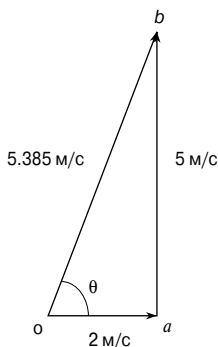


Рис. 15.4

Вектор oa характеризует векторную скорость крана относительно фиксированной точки на земле, а ab характеризует векторную скорость груза относительно крана. Векторная скорость груза относительно точки на земле выражена вектором ob . По теореме Пифагора получаем

$$(ob)^2 = (oa)^2 + (ab)^2 = 4 + 25 = 29,$$

отсюда

$$ob = \sqrt{29} = 5.385 \text{ м/с},$$

$$\text{tg } \theta = \frac{5}{2} = 2.5,$$

откуда

$$\theta = \text{arctg } 2.5 = 68.20^\circ,$$

то есть **векторная скорость груза относительно фиксированной точки на земле равна 5.385 м/с в направлении 68.20° относительно направления движения крана**.

16. ТРЕНИЕ

Сила трения

Если взять брусок дерева, положить его на пол и приложить к нему довольно большую силу, направленную параллельно бруску, то брусок начнёт скользить по полу. Если приложенную силу удалить, брусок остановится, что говорит о существовании некоей силы, препятствующей скольжению. Эту силу называют *силой трения движения* или *трения скольжения*. Если сила, воздействующая на брусок, недостаточна, чтобы его сдвинуть, то равную ей противодействующую силу называют *силой опорного трения* или *трения покоя*. Следовательно, есть две категории, на которые делится сила трения:

- сила трения движения или трения скольжения, возникающая тогда, когда имеет место движение,
- сила опорного трения, то есть сила, недостаточная для начала движения.

Существует три фактора, влияющих на величину и направление силы трения:

- величина силы трения зависит от вида поверхности (деревянный брусок легче скользит по гладкой поверхности, чем по неровной, шершавой, например по бетону);
- величина силы трения зависит от величины силы, действующей под прямым углом к контактирующим поверхностям. Такую силу называют *силой нормального давления*. Если вес бруска удвоить, сила трения тоже удваивается (при условии, что тип поверхности не меняется);
- направление силы трения всегда противоположно направлению движения. Следовательно, сила трения препятствует движению, как это показано на **Рис. 16.1**.

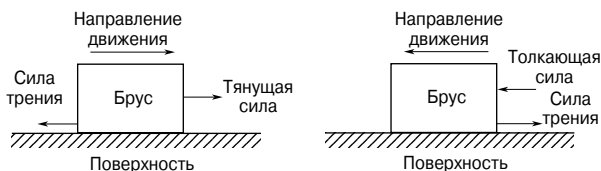


Рис. 16.1

Коэффициент трения

Коэффициент трения μ необходим для количественной оценки трения, существующего между двумя поверхностями. Малый коэффициент трения означает, что сила, необходимая для скольжения, может быть меньше силы, необходимой для начала

движения при большом коэффициенте трения. Коэффициент трения определяют как отношение силы трения к силе нормального давления, то есть

$$\mu = \frac{\text{сила трения } F}{\text{сила нормального давления } N},$$

откуда

сила трения = $\mu \times$ сила нормального давления,

то есть

$$F = \mu N$$

Направление сил, данных в этом уравнении, показано на **Рис. 16.2**.

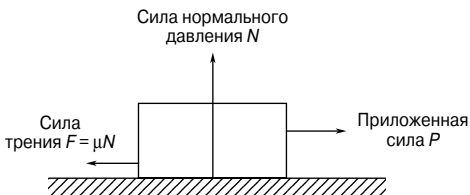


Рис. 16.2

Коэффициент трения — это отношение одной силы к другой силе, поэтому коэффициент трения — величина безразмерная. Ниже даны типичные значения коэффициента трения при возникновении скольжения:

для полированных, покрытых смазкой металлических поверхностей	менее 0.1
для стекла по стеклу	0.4
для резины по бетону	около 1.0

Например, определим силу нормального давления кирпича на стальную поверхность, если сила трения составляет 0.728 кН, а коэффициент трения скольжения между кирпичом и сталью равен 0.91.

Так как $F = \mu N$, то сила нормального давления

$$N = \frac{F}{\mu} = \frac{728}{0.91} = 800 \text{ Н},$$

то есть **сила нормального давления равна 800 Н**.

Использование трения

Иногда желателен минимальный коэффициент трения, как, например, в случаях работы подшипников, поршней, или при беге на лыжах. Но когда надо передать силу с помощью ременного привода или в тормозной системе, необходим высокий коэффициент трения.

Положительные и отрицательные стороны сил трения

Во многих случаях силы трения приносят пользу.

- Почти все крепёжные устройства (например, шурупы, болты, гвозди, гайки, скобы и зажимы) работают за счёт силы трения, которая прочно удерживает их на месте.
- Сила трения обеспечивает нормальную работу тормозов.
- В отсутствие сил трения в большинстве случаев невозможно придать телу ускорение в горизонтальной плоскости. Например, проскальзывают ботинки, и человек не может идти, или колеса прокручиваются, не продвигая машину вперёд.

С другой стороны, силы трения часто оказываются вредны.

- Во время работы приводов, валов или осей в механических устройствах энергия тратится на бесполезное выделение тепла.
- Трение приводит к износу, например, ботинок, тормозных колодок и крепежа.
- Бесполезно тратится энергия на преодоление движения воздуха (гораздо легче ехать на велосипеде по ветру, чем против него).

Практическое применение

Ниже приведены два примера того, как смазка может помочь снизить силу трения или же наоборот.

- Крепёж делают из сплава, называемого белым металлом, температура плавления которого довольно низкая. Когда вращающийся вал трётся о крепёж из белого металла, выделяется тепло. Обычно это происходит в каком-то одном месте, и поэтому здесь-то металл и начинает плавиться, и крепёж оказывается бесполезным. Правильно подобранная смазка (масло или жир) создаёт прослойку между валом и белым металлом, сохраняя низким коэффициент трения и препятствуя износу крепежа. Во всех крупных конструкциях такого рода масло к крепежу подаётся под давлением (к тому же оно охлаждает механизмы, для чего его в процессе рециркуляции зачастую пропускают через масляные радиаторы).
- Во многих цехах для передачи энергии из одного места в другое используют приводные колёсные ремни. Коэффициент трения между колесом и приводом должен быть большим, и увеличить его помогает дёгтеобразная оболочка для привода. Так как сила трения пропорциональна силе нормального давления, проскальзывающий ремень работает более эффективно, если его сильнее натянуть. Это помогает увеличить нормальное давление, а следовательно, и силу трения. При разработке таких систем в них необходимо включать механизм натяжения привода.

17. ВОЛНЫ

Волновое движение

Волновое движение — это распространение возмущения в некоей среде или в пространстве, где энергия передаётся от одной точки к другой без переноса самого вещества.

К волнам относят:

- распространение колебаний воды, возникающих, например, при падении камня в водоём со стоячей водой;
- колебания, распространяющиеся по струне после щипка;
- периодические сжатия и растяжения пружины;
- колебания воздуха, создающие звуки;
- распространение света (световые волны) (см. стр. 96);
- распространение радиоизлучения (радиоволны);
- инфракрасное излучение нагретыми телами (инфракрасные волны);
- ультрафиолетовое излучение сильно нагретыми телами и некоторыми газоразрядными лампами (ультрафиолетовые волны);
- рентгеновское излучение металлами, когда их облучают потоками электронов с высокой энергией (рентгеновские волны);
- гамма-лучи, излучаемые радиоактивными элементами.

Первые четыре примера волн, из числа перечисленных выше, относятся к *механическим волнам*. Им необходима среда распространения (такая, как вода или воздух). Следующие примеры имеют *электромагнитную* природу, и для них среда не обязательна, — они могут распространяться и в вакууме.

Типы волн

Существует два типа волн: поперечные и продольные.

- *Поперечные волны* возникают тогда, когда частицы среды перемещаются перпендикулярно направлению движения волны. Например, когда камень падает в лужу, рябь распространяется от центра падения к краям лужи по радиусу, но если тело плывёт по течению, вода в определённой точке двигается вверх и вниз. К поперечным волнам относятся также световые и радиоволны.
- *Продольные волны* возникают тогда, когда частицы среды вибрируют, сжимаясь и разжимаясь параллельно направлению распространения волны. К таким волнам относятся звуковые волны и волны, возникающие от щипка струны.

На **Рис. 17.1** показано сечение типичной волны.

Длина волны, частота и скорость распространения

Длина волны — это расстояние между двумя последовательными одинаковыми частями волны (например, между двумя максимумами, как показано на **Рис. 17.1**). Длина волны обозначается символом λ (лямбда) и измеряется в метрах [м].



Рис. 17.1

Частота — это число полных волн (или циклов), проходящих через одну точку за одну секунду. Частота обозначается буквой f и измеряется в герцах [Гц].

Скорость распространения волны v определяется как произведение частоты и длины волны, то есть

$$\text{скорость} = \text{частота} \times \text{длина волны},$$

или

$$v = f\lambda$$

Единица скорости — метр в секунду [м/с].

Например, если Би Би Си (BBC) транслирует свои передачи на частоте 198 кГц, а длина волны равна 1 500 м, то скорость распространения этой радиоволны равна

$$v = f\lambda = (198 \times 10^3)(1\,500) = 2.97 \times 10^8 \text{ м/с.}$$

Отражение и рефракция

Отражение волны — это изменение направления движения волны, пока она находится в одной среде. Скорость отражённой волны остаётся такой же, как до отражения. Волны всех типов отражаются, когда они встречают поверхность, сквозь которую не могут пройти. Например:

- световые волны отражаются от зеркал;
- волны воды отражаются от края ванны или от волнореза;
- звуковые волны отражаются от стены (и могут создавать эхо);
- волны, достигающие конца струны или пружины, тоже отражаются;
- волны, передающие телевизионный сигнал, отражаются космическими спутниками.

Увидеть, как отражаются волны, можно, если в ёмкость с водой под прямым углом к её поверхности поместить стекло.

Рефракция — это изменение направления волны (преломление волны) при её переходе из одной среды в другую. Преломляться могут волны всех типов.

Примеры:

- световая волна меняет направление на границе между воздухом и стеклом, как показано на **Рис. 17.2**;



Рис. 17.2

- морская волна преломляется, когда доходит до мелководья;
- звуковая волна меняет направление, когда входит в слои воздуха с другой температурой (см. ниже).

На практике можно показать, что если с одной стороны бак для воды сделать мелким, то можно увидеть, что волны в этом месте распространяются медленнее. Направление их также изменится, как только они окажутся на мелководье. Чем больше изменение скорости, тем больше изгиб или преломление.

Звуковые волны и их характеристики

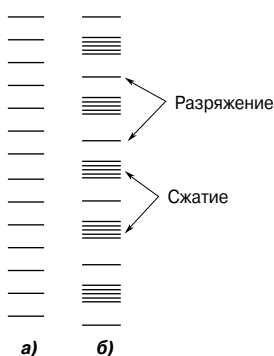


Рис. 17.3

Звуковая волна — это серия чередующихся слоёв воздуха. Слой, находящийся под давлением чуть выше атмосферного, называется *сжатием*, а находящийся под давлением чуть ниже атмосферного — *разряжением*. Другими словами, **звук — это волна сжатого воздуха**. На **Рис. 17.3а** условно показаны невозмущённые слои воздуха, а на **Рис. 17.3б** показано, что происходит с воздухом, когда по нему распространяются звуковые волны.

Звуковые волны обладают следующими характеристиками:

- Звуковая волна может распространяться через твёрдые, жидкие и газообразные среды, но не через вакуум.

- Звук обладает конечной, то есть фиксированной, скоростью, значение которой зависит от среды распространения, а также от температуры среды. Вот некоторые примеры скорости звука: в воздухе — 331 м/с при 0°C и 342 м/с при $+18^{\circ}\text{C}$; в воде — 1 410 м/с при $+20^{\circ}\text{C}$, в железе — 5 100 м/с при $+20^{\circ}\text{C}$.
- Звуковые волны могут отражаться, и самым распространённым результатом этого служит эхо. Эхолокацию используют для измерения морских глубин.
- Звуковые волны могут преломляться. Это случается, когда, например, звуковая волна наталкивается на воздушные слои иной температуры. Если звуковая волна попадает в область с повышенной температурой, то среда распространения там обладает иными свойствами, и поэтому волна преломляется, как это показано на **Рис. 17.4**. Такие ситуации типичны для ночного времени суток.

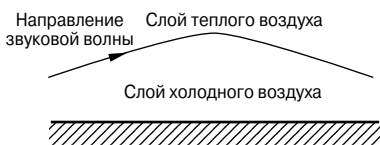


Рис. 17.4

Звуковые волны появляются в результате *колебаний*.

- В духовых инструментах, таких, как труба и тромбон, кларнет или гобой, звук издаётся за счёт колебаний в них столбиков воздуха.
- Струнные инструменты, такие, как скрипка и гитара, издают звук вследствие колебаний струны, которая заставляет колебаться воздух. Похожим образом колеблются наши голосовые связки во время разговора.
- Камертон издаёт звук благодаря колебаниям его металлических окончаний (зубьев).
- В громкоговорителе звук возникает за счёт колебаний внутри его конуса.

Высота звука зависит от частоты колебаний: чем выше частота, тем выше звук.

Частота звука зависит от формы источника колебаний. Клапаны трубы или скользящий элемент тромбона удлиняют или укорачивают воздушный столбик внутри инструмента, а в случае гитары или скрипки роль регулятора длины струны выполняют пальцы. Чем короче воздушный столбик или вибрирующая струна, тем выше частота, а следовательно, и выше звук. Аналогично камертон с короткими зубьями издаёт более высокий звук, чем более длинный камертон.

Ухо человека воспринимает частоты от 20 Гц до 20 кГц.

18. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ

Интерференция

В точке пересечения двух волн общее результирующее смещение определяется векторной суммой смещения каждой из волн по отношению к другой волне в этой точке.

Это правило называют *принципом суперпозиции*. Волны могут быть либо поперечными, либо продольными — эффект *интерференции* наблюдается в обоих случаях. В этой главе рассмотрен механизм интерференции двух волн, имеющих одинаковые частоту и амплитуду, хотя для появления интерференции это совсем необязательно.

Рассмотрим две поперечные волны, имеющие одинаковые частоты и амплитуды, которые распространяются в противоположных направлениях. Согласно принципу суперпозиции между двумя этими волнами имеет место интерференция, и образуется *стоячая*, или *стационарная волна*, показанная на **Рис. 18.1**.

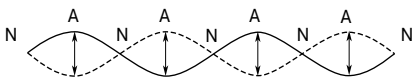


Рис. 18.1

Эта волна не распространяется ни влево, ни вправо, и определённые её части, называемые *узлами* (на рисунке они обозначены буквой N), не колеблются. Точки волны, подвергающиеся наибольшему возмущению, называют *пучностями* (обозначены буквой A). Расстояние между соседними узлами или *пучностями* равно $\frac{\lambda}{2}$, где λ — длина волны. Стоячие волны могут образовывать цепочку, например, когда волна отражается на конце цепочки и находится в суперпозиции с входящей волной. В таких условиях стоячие волны возникают только на определённых частотах. Узлы также могут быть неидеальными, потому что отражённая волна может иметь немного меньшую амплитуду.

Две звуковые (продольные) волны с одинаковыми амплитудами и частотами, распространяющиеся в противоположных направлениях и находящиеся друг к другу в суперпозиции, также формируют стоячую волну. В этом случае образуются узлы смещения там, где среда не колеблется, и *пучности* там, где смещение максимально.

Упомянутые выше эффекты интерференции не всегда ограничены прямой между двумя волновыми источниками. Например, двухмерную интерференцию можно наблюдать на поверхности пруда, по которой идёт рябь. В этом случае от двух источников, обычно создающих колебания одной фазы и частоты,

волны по поверхности расходятся кругами, и там, где они встречаются друг с другом, имеет место интерференция. Её результат показан на **Рис. 18.2**. Источники обозначены как S_1 и S_2 .

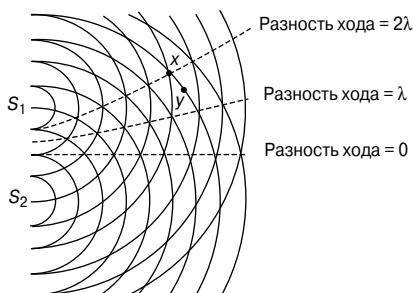


Рис. 18.2

Рассмотрим положение волн в точке X на поверхности. Расстояние $(S_2X - S_1X)$ называют *разностью хода*. Если $(S_2X - S_1X) = n\lambda$, где n — целое число, а λ — длина волны, то волны, приходящие в точку X от источников S_1 и S_2 , должны находиться в фазе. (На **Рис. 18.2** $S_2X - S_1X = 2\lambda$.) В точке X имеет место *конструктивная (усиливающая) интерференция*, и результирующая амплитуда максимальна. Во вторую точку, Y , расположенную так, что $(S_2Y - S_1Y) = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ волны от источников приходят в противофазе. Результирующая амплитуда в точке Y минимальна, и имеет место *деструктивная (гасящая) интерференция*. (На **Рис. 18.2** $(S_2Y - S_1Y) = \lambda$, то есть $n = 1$.)

Дифракция

Когда морские волны наталкиваются на барьер, который параллелен направлению их движения, возмущение наблюдается за барьером в том месте, где, как можно подумать, вода останется спокойной. Это происходит от того, что волны могут огибать препятствия и оказываться там, где было бы тихо, если бы энергия распространялась строго по прямой линии. Это явление называется *дифракцией*. Все волны, и продольные, и поперечные, обладают этим свойством. Если свет попадает в узкую щель, имеет место дифракция. Картина дифракции, образуемая на экране позади щели, не идеально чёткая. Интенсивность излучения различна, как это видно на **Рис. 18.3**.

Последствия дифракции состоят в том, что свет, идущий от двух близко расположенных источников, проходит через щель или маленькое круглое отверстие, и дифракционные картины от двух источников могут так перекрыть друг друга, что может по-

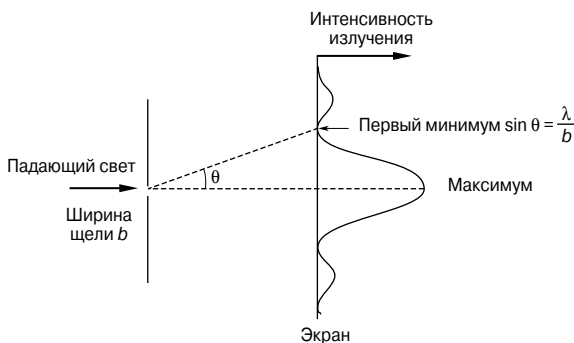


Рис. 18.3

казаться, что источник один. Если их можно различить, то угол θ , под которым видно это отличие, измеряемый в радианах, должен быть больше, чем $\frac{\lambda}{b}$, где λ — длина световой волны, а b — ширина щели (Рис. 18.4).

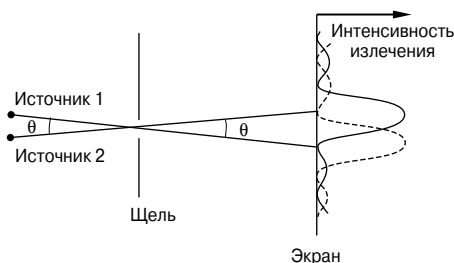


Рис. 18.4

Для круглого отверстия условия изменяются:

$$\theta > \frac{1.22\lambda}{b}.$$

Это неравенство называют *критерием Рэля*.

Если свет проходит через две параллельные узкие щели с малым расстоянием между ними, то из-за дифракции в области за плоскостью со щелями возникает частичное перекрытие света, то есть имеет место интерференция, как это показано на Рис. 18.5.

Эффект интерференции схож с тем, что описан в случае ряби на воде.

Предположим, что лучи света, пройдя через обе щели, встречаются в точке на удалённом экране. Так как расстояние между

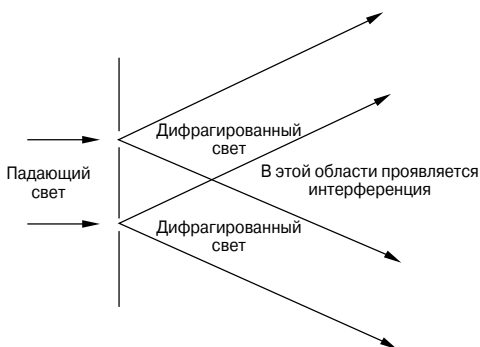


Рис. 18.5

щелями намного меньше, чем расстояние от экрана до щели, два световых пучка будут идти практически параллельно, как это показано на **Рис. 18.6**.

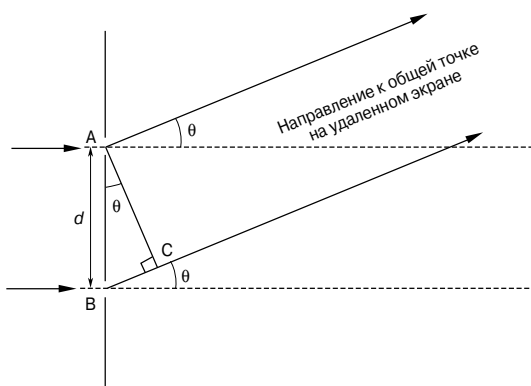


Рис. 18.6

Если разность путей двух падающих лучей равна $n\lambda$ (n — целое число, λ — длина волны), то на экране появится конструктивная интерференция с максимумами интенсивности.

Однако на **Рис. 18.6** разность путей равна BC , то есть $d \sin\theta$. Следовательно, для максимальной интенсивности на экране должно выполняться условие $n\lambda = d \sin\theta$, откуда

$$\sin\theta = \frac{n\lambda}{d}.$$

Максимумы появляются при выполнении условий

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{d}, \frac{2\lambda}{d}, \frac{3\lambda}{d} \text{ и так далее.}$$

Интенсивность интерференции на экране на различных расстояниях от полярной оси показана на **Рис. 18.7**. Картина меняется в зависимости от типа дифракционного изображения, создаваемого одной щелью.

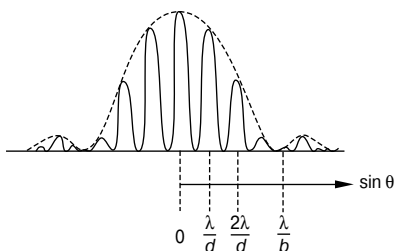


Рис. 18.7

Дифракционная решётка похожа на устройство с двумя щелями, с той лишь разницей, что щелей очень много. В этом случае бывают очень резкие значения максимальной интенсивности. Если расстояние между щелями равно d , а направление света перпендикулярно плоскости решётки, то положение максимумов определяют из условия

$$n\lambda = d \sin \theta.$$

Когда $n = 0$, то $\sin \theta = 0$, и свет идёт перпендикулярно плоскости решётки, давая максимум **нулевого порядка** (на **Рис. 18.7** это 0).

При $n = 1$ $\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$, что определяет максимум первого порядка, и разность путей от соседних щелей до максимума **первого порядка**, равную λ .

Аналогично при $n = 2$ $\sin \theta = \frac{2\lambda}{d}$ и соответственно для максимума **второго порядка** разность путей равна 2λ .

Если на дифракционную решётку падает дневной свет, так как угол, при котором возникает максимум первого порядка, зависит от длины волны. Следовательно, дифракционную решётку можно использовать для определения длин волн, присутствующих в источнике света.

Дифракция рентгеновского излучения

Рентгеновские лучи, падающие на атомы кристалла, также подвержены дифракции, и, проведя анализ полученной дифракционной картины, можно извлечь информацию о структуре этого кристалла. Когда рентгеновские лучи встречаются с атомами кристалла, каждый атом рассеивает их во всех направле-

ниях. Но в некоторых направлениях наблюдается конструктивная интерференция. На **Рис. 18.8** показана модель атомной решётки, на которую падают, а затем рассеиваются рентгеновские лучи.

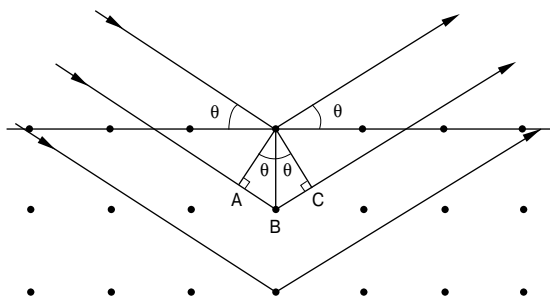


Рис. 18.8

Рассмотрим ход лучей в произвольно выбранном направлении.

На рисунке показаны три атомных уровня. Лучи, отражённые от верхних и средних уровней (и любых других соседних уровней), находятся в одной фазе, если разность их путей равна $n\lambda$, где n — целое число, а λ — длина волны рентгеновского луча.

$$\begin{aligned} \text{Разность путей} &= AB + BC = \\ &= d \sin\theta + d \sin\theta = \\ &= 2d \sin\theta, \end{aligned}$$

где d — расстояние между уровнями.

Следовательно, условия для конструктивной интерференции возникают, когда

$$n\lambda = 2d \sin\theta.$$

Угол θ называют *углом скольжения*, а уравнение известно как *закон Брэгга*.

19. СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ

Свет — это электромагнитная волна (см. стр. 86), а прямолинейные траектории, по которым следуют очень узкие световые пучки, переносящие энергию светового излучения, называют *лучами*.

Поведение световых лучей можно изучать с помощью лампы, помещенной в коробку с узкой щелью, через которую распространяются световые лучи.

Свет всегда распространяется по прямой, хотя направление хода лучей может измениться из-за отражения или рефракции.

Отражение света

На **Рис. 19.1** показан луч света, называемый падающим лучом, который достигает плоскости зеркала в точке O , образуя с нормалью, восстановленной в точке O под прямым углом к зеркалу, угол α .

Угол α называют *углом падения*, угол β — *углом отражения*. Существует два *закона отражения*.

1. Угол отражения равен углу падения (на **Рис. 19.1** $\angle\alpha = \angle\beta$).

2. Падающий луч, нормаль в точке падения и отражённый луч лежат в одной плоскости.

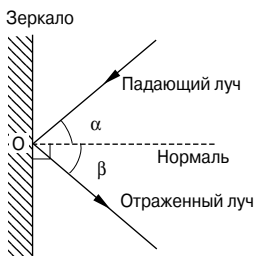


Рис. 19.1

Простейший перископ

Устройство простейшего *перископа* показано на **Рис. 19.2**.

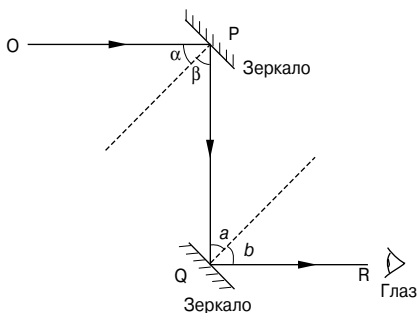


Рис. 19.2

Луч света, идущий из точки O , падает на плоское зеркало под углом 45° в точке P . Так как по законам отражения угол падения α равен углу отражения β , то $\angle\alpha = \angle\beta = 45^\circ$. Следовательно, угол $OPQ = 90^\circ$, и световой луч после отражения идёт под углом 90° к первоначальному направлению. Затем луч падает на другое зеркало под углом 45° в точке Q . Следовательно, ситуация повторяется, и $\angle a = \angle b = 45^\circ$, а угол $PQR = 90^\circ$, и световой луч снова уходит под углом 90° . В результате свет из точки O распространяется в направлении QR , параллельном OP , и отклоняется от направления PQ . Такая конструкция и лежит в основе перископа.

Рефракция света

Луч света, переходя из одной среды в другую, изменяет направление. Это смещение световых лучей называют *рефракцией*.

На **Рис. 19.3** показана траектория луча света, проходящего через стеклянный параллелепипед.

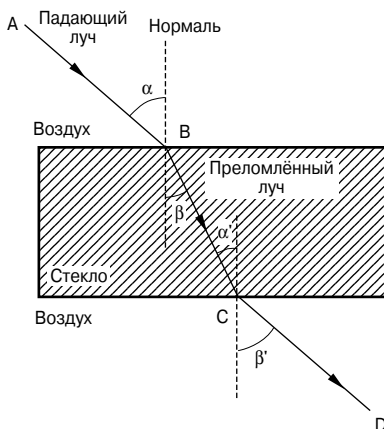


Рис. 19.3

Луч AB падает на верхнюю плоскость параллелепипеда в точке B под углом α . Его направление меняется на BC , так, что угол β оказывается меньше угла α . Угол β называют *углом рефракции*. Из стеклянного блока луч выходит в точке C , и его направление ещё раз меняется. Теперь его направление — CD , а угол β' больше, чем угол α' . В итоге луч CD оказывается параллельным лучу AB .

Линзы

Как правило, луч, входящий из менее плотной среды в более плотную, преломляется, приближаясь к нормали, а выходя из более плотной среды в менее плотную, отклоняется от нормали.

Линзы — это фрагменты стекла или другого прозрачного материала со сферической поверхностью с одной или с обеих сторон. Когда свет проходит сквозь линзу, он подвергается рефракции.

Линзы используют для изготовления очков, луп, микроскопов, телескопов, фотоаппаратов, проекторов и других оптических приборов.

Линзы могут иметь различную форму, и две наиболее часто встречающиеся разновидности показаны на **Рис. 19.4**.

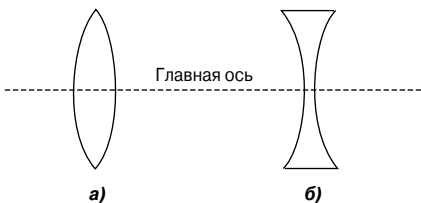


Рис. 19.4

На **Рис. 19.4а** показана *двояковыпуклая линза*, названная так потому, что обе её поверхности выпуклые. На **Рис. 19.4б** показана *двояковогнутая линза*, названная так потому, что её поверхности вогнуты.

Линию, проходящую через центр кривизны поверхности линзы, называют *главной осью*.

На **Рис. 19.5** показаны параллельные лучи света, проходящие через выпуклую линзу. Как видно, они сходятся в точке F на главной оси.

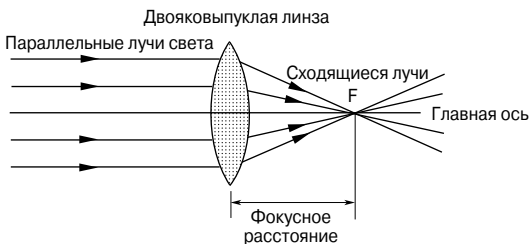


Рис. 19.5

На **Рис. 19.6** показаны параллельные лучи света, проходящие через вогнутую линзу.

Как видно, они расходятся так, что кажется, будто они выходят из точки F , лежащей между источником света и линзой, на главной оси.

На обоих рисунках точка F называется *главным фокусом*, а расстояние от F до центра линзы — *фокусным расстоянием линзы*.

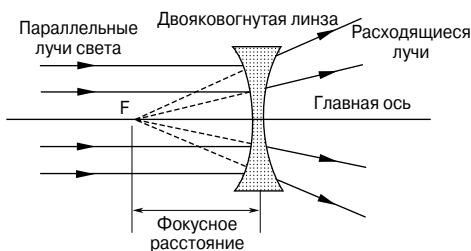


Рис. 19.6

Изображение — это точка, из которой, как нам кажется, исходят отраженные лучи, попадая в глаз. Если лучи действительно проходят через эту точку, то формируется *действительное изображение*. Такое изображение можно отобразить на экране.

На Рис. 19.7 показано, как глаз собирает лучи от предмета после отражения от плоского зеркала.

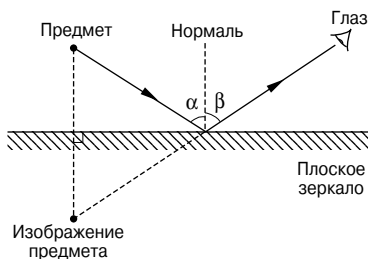


Рис. 19.7

Наблюдателю кажется, что лучи идут с другой стороны зеркала и предмет находится по ту сторону зеркала на таком же расстоянии, на каком он в действительности стоит перед зеркалом. Такое изображение называют *мнимым*, и его невозможно показать на экране.

Выпуклые линзы и их применение

Линзы формируют изображение в зависимости от того, на каком расстоянии от линзы находится предмет.

На Рис. 19.8 показан предмет *O* (источник света), находящийся от линзы на расстоянии более чем два её фокусных расстояния.

Определим местоположение и размер изображения по двум лучам, один из которых параллелен главной оси линзы, а второй проходит через её центр. Получаемое изображение *I*, действительное, перевёрнутое, меньше по размеру, чем сам предмет, то есть уменьшенное, и находится на расстоянии не превышаю-

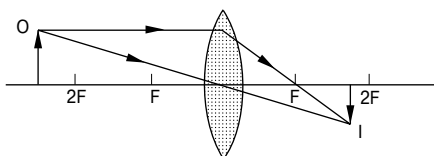


Рис. 19.8

шем двух длин фокусного расстояния от линзы. Такая установка используется в *фотокамерах*.

На **Рис. 19.9** показан предмет O , отстоящий от линзы на расстоянии двух её фокусных расстояний.

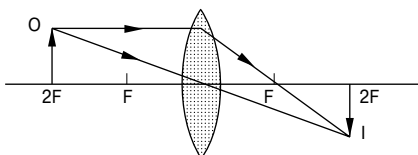


Рис. 19.9

В этом случае размер изображения равен размеру предмета. Такая установка используется в *фотокопировальном устройстве*.

На **Рис. 19.10** показан предмет O , находящийся от линзы на расстоянии не более двух её фокусных расстояний.

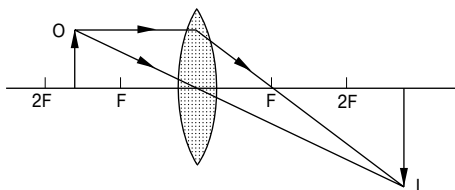


Рис. 19.10

В результате изображение получается действительным, перевёрнутым, увеличенным и расположенным на расстоянии более чем два её фокусных расстояния. Такая установка применяется в *проекторах*.

На **Рис. 19.11** показан предмет O , отстоящий от линзы на её фокусное расстояние.

Лучи после прохождения через линзу становятся параллельными. Следовательно, можно считать, что изображение I появится где-то в бесконечности, будет действительным, перевёрнутым и очень сильно увеличенным. Такая установка используется в *прожекторах*.

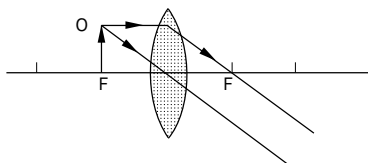


Рис. 19.11

На **Рис. 19.12** показан предмет O , находящийся в пределах фокусного расстояния линзы.

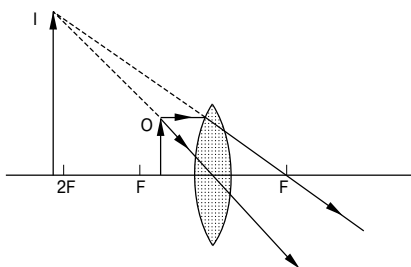


Рис. 19.12

Изображение I получается мнимым, так как только кажется, что лучи света идут от предмета. Изображение, увеличенное и не перевернутое, находится по ту же сторону от линзы, что и сам предмет. Такая установка применяется в *увеличительных стёклах*.

Вогнутые линзы

Как показано на **Рис. 19.13**, в случае вогнутой линзы предмет может находиться на любом расстоянии от линзы, всё равно изображение получается мнимым, не перевернутым, уменьшенным и видимым на той же стороне линзы, что и сам предмет.

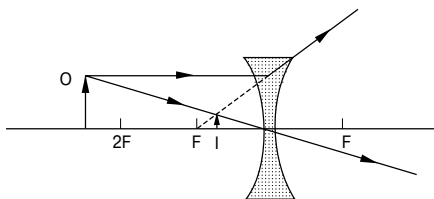


Рис. 19.13

Такая установка применяется в *очках* некоторых видов.

Микроскоп

Микроскоп даёт большое увеличение благодаря двум (или более) линзам. Как показано на **Рис. 19.14**, предмет O находится за пределами фокусного расстояния F_o выпуклой линзы, называемой линзой *объектива* (так как она расположена ближе всего к объекту).

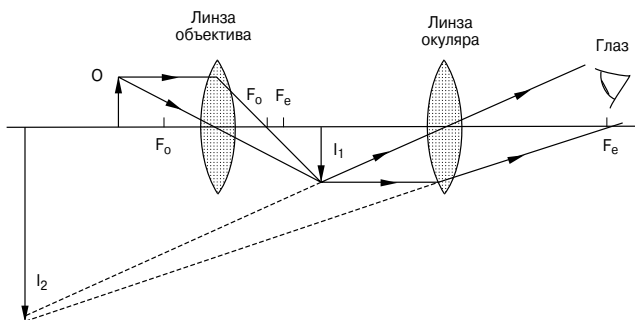


Рис. 19.14

Такая постановка даёт действительное, перевёрнутое, увеличенное изображение I_1 .

Для линзы *окуляра*, то есть линзы, которая ближе всего к глазу, это изображение подобно предмету, который попадает в пределы фокусного расстояния F_e линзы. Линза окуляра даёт увеличенное, мнимое, перевёрнутое изображение I_2 , как это видно на рисунке.

Простейший проектор

Устройство *простейшего проектора* показано на **Рис. 19.15**.

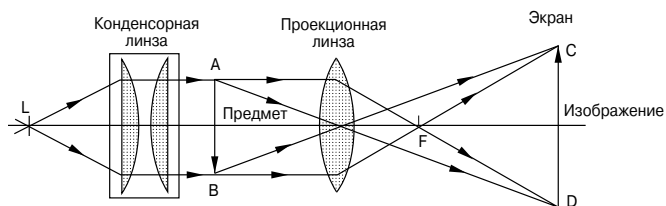


Рис. 19.15

Он состоит из источника очень яркого света L , например вольфрамовой нити накала, и системы двух линз. Первая система линз, называемая *конденсором* (как правило, состоящая из двух собирательных линз), используется для интенсивной подсветки предмета AB , на практике являющегося диапозитивом или киноплёнкой. Вторая линза, называемая *проекционной*, используется для формирования увеличенного, действительного, перевёрнутого изображения предмета на удалённом экране CD .

20. РАБОТА, ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ

Работа

Если тело движется в результате действия на него силы, то говорят, что сила совершает работу с телом. Количество совершённой *работы* — это произведение приложенной силы и расстояния, то есть

$$\text{совершённая работа} = \text{сила} \times \left(\begin{array}{l} \text{расстояние, пройденное} \\ \text{в направлении действия силы} \end{array} \right).$$

Единица работы — *джоуль* [Дж], который определён как количество работы, совершённой за время, в течение которого сила в один ньютон действует на расстоянии в 1 м в направлении действия силы. Следовательно, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

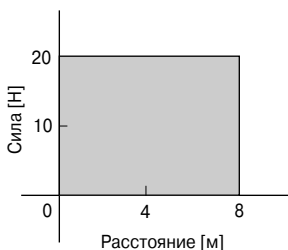


Рис. 20.1

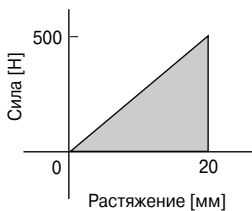


Рис. 20.2

Если по вертикальной оси координат отложить полученные опытным путём значения силы, а по горизонтальной — расстояние, то в результате будет построен график зависимости силы от расстояния или диаграмма работы. Область под построенной кривой характеризует совершённую работу.

Например, груз поднимают на высоту 8 м, прикладывая постоянную силу 20 Н. Это действие можно изобразить с помощью графика «сила/расстояние» (Рис. 20.1).

Затемнённая область под кривой определяет совершённую работу. Получаем:

$$\text{совершённая работа} = 20 \text{ Н} \times 8 \text{ м} = 160 \text{ Дж}.$$

Другой пример. Сила, растягивающая пружину, пропорциональна величине растяжения пружины (закон Гука), поэтому работу пружины, растянутой на 20 мм при помощи силы 500 Н, можно охарактеризовать диаграммой, показанной на Рис. 20.2.

Здесь

$$\begin{aligned} \text{совершённая работа} &= \text{затемнённая область} = \\ &= \frac{1}{2} \times \text{основание} \times \text{высота} = \\ &= \frac{1}{2} \times (20 \times 10^{-3} \text{ м}) \times 500 \text{ Н} = 5 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

В главе 9 показано, что сила = масса × ускорение и что тело, сброшенное с некоторой высоты, имеет постоянное ускорение около 9.81 м/с^2 .

Например, если тело массой 8 кг поднять вертикально на 4 м, то совершённую работу определяют в соответствии с уравнением

$$\begin{aligned} \text{совершённая работа} &= \text{сила} \times \text{расстояние} = \\ &= (\text{масса} \times \text{ускорение}) \times \text{расстояние} = \\ &= (8 \times 9.81) \times 4 = \mathbf{313.92 \text{ Дж}}. \end{aligned}$$

Работу, совершённую переменной силой, можно вычислить, если определить область, ограниченную кривой на графике «сила/расстояние», методом приближения (например, с помощью правила средней ординаты).

Энергия

Энергия — это способность или возможность выполнить работу. Единица энергии — джоуль, та же, что единица работы. Энергия затрачивается в процессе выполнения работы, переходя при этом из одной формы в другую. Ниже показаны формы существования энергии.

- Механическая энергия
- Тепловая (термическая) энергия
- Электрическая энергия
- Химическая энергия
- Ядерная энергия
- Световая энергия
- Энергия звука

Закон сохранения энергии гласит, что при преобразованиях полное количество энергии остается неизменным, то есть энергию нельзя создать или уничтожить.

Некоторые примеры преобразования энергии

- Генератор преобразует механическую энергию в электрическую.
- Электромотор преобразует электрическую энергию в механическую.
- Паровой двигатель преобразует тепловую энергию в механическую.
- Трение преобразует механическую энергию в тепловую.
- Солнечная батарея преобразует энергию света в электрическую.
- Электронагреватель преобразует электрическую энергию в тепловую.
- Растения преобразуют тепловую энергию в химическую.
- Горящее топливо преобразует химическую энергию в тепловую.

- Термопара преобразует тепловую энергию в электрическую.
- Батарея преобразует химическую энергию в электрическую.
- Лампочка преобразует электрическую энергию в световую.
- Микрофон преобразует звуковую энергию в электрическую.
- Электролиз преобразует электрическую энергию в химическую.

Коэффициент полезного действия определяют как отношение полезно затраченной энергии ко всей затраченной энергии и обозначают символом η (греческая буква «эта»).

По определению

$$\eta = \frac{\text{полезно затраченная энергия}}{\text{вся затраченная энергия}}$$

Коэффициент полезного действия — безразмерная величина, и часто представлена в виде процентов. Идеальная машина имеет коэффициент полезного действия 100%, однако из-за трения и других потерь ни одна машина таким коэффициентом не обладает.

Например, если энергия, затраченная мотором, равна 1 000 Дж, а полезно использовано только 800 Дж, то коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{800}{1000} \times 100\% = 80\%.$$

Другой пример. Найдём коэффициент полезного действия машины, которая прикладывает силу 200 Н для поднятия тела на высоту 6 м, при условии, что к ней подается 2 кДж энергии.

$$\begin{aligned} \text{Работа, совершённая для поднятия тела} &= \\ &= \text{сила} \times \text{пройденное расстояние} = \\ &= \text{вес тела} \times \text{пройденное расстояние} = \\ &= 200 \text{ Н} \times 6 \text{ м} = 1\,200 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Полезная энергия на выходе} &= \\ &= \text{совершённая работа} = 1\,200 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

$$\text{Энергия на входе} = 2 \text{ кДж} = 2\,000 \text{ Дж}.$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{полезная энергия на выходе}}{\text{энергия на входе}} = \\ &= \frac{1\,200}{2\,000} = 0.6, \text{ или } 60\%. \end{aligned}$$

Мощность

Мощность, P — это темп, в котором выполняется работа или энергия из одной формы переходит в другую. По определению

$$\text{мощность} = \frac{\text{использованная энергия}}{\text{затраченное время}}$$

или

$$\text{мощность} = \frac{\text{совершённая работа}}{\text{затраченное время}}$$

Единица мощности — *ватт* [Вт]. Один ватт равен одному джоулю в секунду. Ватт — не очень крупная единица, хотя находит применение во многих случаях. Для других целей есть и более крупная единица мощности — киловатт [кВт]. 1 кВт = 1 000 Вт.

Например, выходная мощность мотора, совершающего работу 120 кДж за 30 с, равна

$$P = \frac{120 \text{ кДж}}{30 \text{ с}} = 4 \text{ кВт.}$$

(Об электрической мощности см. кн. 2, гл. 40.)

Так как совершённая работа = сила × расстояние, то

$$\begin{aligned} \text{мощность} &= \frac{\text{совершённая работа}}{\text{затраченное время}} = \\ &= \frac{\text{сила} \times \text{расстояние}}{\text{затраченное время}} = \\ &= \text{сила} \times \frac{\text{расстояние}}{\text{затраченное время}}. \end{aligned}$$

Однако

$$\frac{\text{расстояние}}{\text{затраченное время}} = \text{скорость.}$$

Отсюда

$$\text{мощность} = \text{сила} \times \text{скорость.}$$

Например, если грузовик едет с постоянной скоростью 72 км/ч, а противодействующая движению сила равна 800 Н, то необходимая для движения грузовика на данной скорости тяговая мощность равна

$$\begin{aligned} \text{мощность} &= \text{сила} \times \text{скорость} = (800 \text{ Н}) \left(\frac{72}{3.6} \text{ м/с} \right) = \\ &= 16\,000 \text{ Н} \cdot \text{м/с} = 16\,000 \text{ Дж/с} = \\ &= \mathbf{16\,000 \text{ Вт, или } 16 \text{ кВт.}} \end{aligned}$$

21. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Механика в основном имеет дело с двумя видами энергии: потенциальной и кинетической.

Потенциальная энергия

Потенциальная энергия — это энергия, определяемая положением тела. Сила, приложенная к телу массой m килограмм, равна mg ньютон (где $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ — ускорение, возникающее из-за силы притяжения). Когда тело поднимают на высоту h метров, выше некоторого заданного уровня, совершённая работа равна

$$\text{сила} \times \text{расстояние} = (mg) (h) \text{ Дж.}$$

Эта совершённая силой работа сохраняется в виде потенциальной энергии тела.

Отсюда

$$\text{потенциальная энергия} = mgh \text{ Дж}$$

(Потенциальную энергию на заданном уровне считают равной 0.)

Например, машина массой 800 кг едет в гору под углом 10° к горизонтали. Определим увеличение потенциальной энергии машины, прошедшей расстояние 50 м.

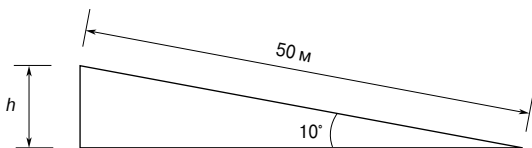


Рис. 21.1

Из **Рис. 21.1** видно, что

$$\sin 10^\circ = \frac{\text{противолежащий катет}}{\text{гипотенуза}} = \frac{h}{50},$$

откуда

$$h = 50 \sin 10^\circ = 8.682 \text{ м.}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \text{увеличение потенциальной энергии} &= mgh = \\ &= 800 \text{ кг} \times 9.81 \text{ м/с}^2 \times 8.682 \text{ м} = \\ &= \mathbf{68\ 140 \text{ Дж}}, \text{ или } \mathbf{68.14 \text{ кДж}}. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия

Кинетическая энергия — это энергия, которой обладает движущееся тело. Предположим, что сила F действует на тело массой m , находящееся в покое, то есть $u = 0$, и разгоняет его с ускорением a до скорости v на расстоянии s .

Если нет потерь энергии, то

$$\begin{aligned} \text{совершённая работа} &= \text{сила} \times \text{расстояние} = \\ &= Fs = (ma)(s), \end{aligned}$$

где a — ускорение.

Так как

$$v^2 = u^2 + 2as \text{ (см. гл. 15) и } u = 0,$$

то

$$v^2 = 2as.$$

Откуда

$$a = \frac{v^2}{2s}.$$

$$\text{Тогда, совершённая работа} = (ma)(s) = (m) \left(\frac{v^2}{2s} \right) (s) = \frac{1}{2} m v^2.$$

Сила, совершив работу, придала телу энергию, называемую кинетической энергией тела массой m , то есть

$$\text{кинетическая энергия} = \frac{1}{2} m v^2 \text{ Дж}$$

Например, если в момент удара молот массой 30 кг обладает скоростью 15 м/с, то

$$\text{кинетическая энергия} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (30 \text{ кг})(15 \text{ м/с})^2 = 3 \text{ 375 Дж}.$$

Закон сохранения энергии

Энергия может переходить из одной формы в другую. *Закон сохранения энергии* гласит, что при таких преобразованиях полное количество энергии остается неизменным, то есть энергию нельзя создать или уничтожить.

В механике потенциальная энергия, которой обладает тело, обычно переходит в кинетическую, и наоборот. Когда тело свободно падает вниз, его потенциальная энергия уменьшается, так как тело теряет высоту, а кинетическая возрастает, так как увеличивается его скорость. Без учета потерь от трения о воздух имеем:

$$\text{потенциальная энергия} + \text{кинетическая энергия} = \text{константа}.$$

Если трение присутствует, то учитывается работа по преодолению силы трения, в результате чего выделяется тепло.

Тогда,

$$\text{начальная энергия} = \left(\begin{array}{c} \text{конечная} \\ \text{энергия} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{работа по преодолению} \\ \text{силы трения} \end{array} \right).$$

Кинетическая энергия при ударе сохраняется не всегда. Удары, при которых кинетическая энергия сохраняется (то есть не изменяется), называют *упругими*, а удары, при которых энергия расходуется (то есть принимает другую форму), называют *неупругими*.

Кинетическая энергия вращения

У частицы массой m , движущейся по окружности радиусом r метров (Рис. 21.2) с угловой скоростью ω рад/с, скорость по касательной v равна

$$v = \omega r \text{ рад/с.}$$

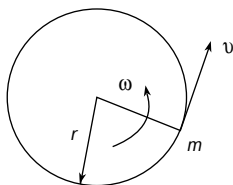


Рис. 21.2

Кинетическая энергия частицы массой m равна

$$\text{кинетическая энергия} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (\omega r)^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 r^2 \text{ Дж.}$$

Полная кинетическая энергия системы тел, вращающихся по окружностям с разными радиусами вокруг фиксированной оси, но с одной угловой скоростью ω , как показано на Рис. 21.3, равна

$$\begin{aligned} \text{полная кинетическая энергия} &= \frac{1}{2} m_1 \omega^2 r_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \omega^2 r_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \omega^2 r_3^2 = \\ &= (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2) \frac{\omega^2}{2}. \end{aligned}$$

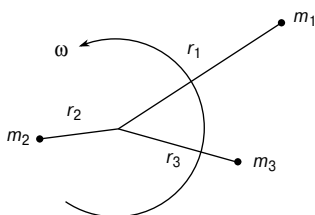


Рис. 21.3

В общем случае

$$\text{полная кинетическая энергия} = \left(\sum m r^2 \right) \frac{\omega^2}{2} = I \frac{\omega^2}{2},$$

где $I (= \sum m r^2)$ называют *моментом инерции* системы относительно оси вращения.

Момент инерции системы показывает, какая работа была выполнена, чтобы система получила угловую скорость ω радиан в секунду, или какая работа совершена системой, вращающейся со скоростью ω радиан в секунду.

В общем случае получаем

$$\text{полная кинетическая энергия} = I \frac{\omega^2}{2} = M k^2 \frac{\omega^2}{2},$$

где $M (= \sum m)$ — суммарная масса, а k — *радиус вращения* системы вокруг данной оси.

Если массы всех тел системы сконцентрировать на радиусе вращения, то момент инерции окажется таким же, как и у исходной системы.

Например, определим кинетическую энергию системы, состоящей из трёх небольших тел, вращающихся с одной скоростью, равной 1 250 оборотов в минуту, вокруг фиксированной оси. Массы тел и радиусы их вращения следующие:

1.16 г, радиус 256 мм; 2.23 г, радиус 192 мм; 3.31 г, радиус 176 мм.

$$\begin{aligned} \text{Момент инерции системы} &= \sum m r^2 = \\ &= 16 \text{ г} \times (0.256 \text{ м})^2 + 23 \text{ г} \times (0.192 \text{ м})^2 + 31 \text{ г} \times (0.176 \text{ м})^2 = \\ &= 1.0486 \text{ г} \cdot \text{м}^2 + 0.8479 \text{ г} \cdot \text{м}^2 + 0.9603 \text{ г} \cdot \text{м}^2 = \\ &= \mathbf{2.857 \text{ г} \cdot \text{м}^2}, \text{ или } \mathbf{2\ 857 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2}. \end{aligned}$$

Это то же самое, что и $M k^2$, где $M = 16 + 23 + 31 = 70$ г, а k — общий радиус вращения. Следовательно,

$$70 \text{ г} \times k^2 = 2.857 \text{ г} \cdot \text{м}^2,$$

откуда радиус вращения

$$k = \sqrt{\left(\frac{2.857}{70}\right)} = 0.202 \text{ м} = \mathbf{202 \text{ мм.}}$$

Зная момент инерции, можно найти кинетическую энергию системы.

$$\begin{aligned} & \text{Кинетическая энергия системы} = \\ & = I \frac{\omega^2}{2} = (2.857 \times 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м}^2)) \left(\frac{\left(\frac{1\,250 \times 2\pi}{60} \text{ рад/с} \right)^2}{2} \right) = \mathbf{24.48 \text{ Дж.}} \end{aligned}$$

Маховики

Функция *маховика* заключается в ограничении колебания скорости за счёт поглощения или высвобождения большого количества кинетической энергии во время небольших изменений скорости.

Для этого маховики должны обладать большим моментом инерции, не обладая при этом чрезмерной массой. Такое условие можно выполнить, обеспечивая как можно больший радиус вращения. Обычно большая часть массы сосредоточена в ободе маховика.

Например, определим ширину обода чугунного маховика, высвобождающего 2.10 кДж кинетической энергии, когда его скорость падает с 3 020 до 3 010 об/мин. Считается, что момент инерции маховика сконцентрирован в его ободе, который имеет прямоугольное сечение с внешним и внутренним диаметрами 670 и 600 мм соответственно. Радиус вращения обода можно принять равным усреднённому радиусу. Плотность чугуна равна 7 800 кг/м³.

Сначала определим момент инерции маховика.

Изменение кинетической энергии определено как $\frac{I(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2}$, поэтому момент инерции I , необходимый в данном случае, равен

$$\begin{aligned} I &= \frac{(\text{изменение кинетической энергии}) \times 2}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)} = \\ &= \frac{2\,100 \text{ Дж} \times 2}{\left(\frac{3\,020 \times 2\pi}{60} \text{ рад/с}\right)^2 - \left(\frac{3\,010 \times 2\pi}{60} \text{ рад/с}\right)^2} = 6.3515 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 . \end{aligned}$$

Теперь определим массу маховика.

Момент инерции определяется также, как Mk^2 , где M — масса обода, а k — радиус вращения, который в данном случае принят как усреднённый радиус обода, то есть

$$\frac{\frac{670 \text{ мм}}{2} + \frac{600 \text{ мм}}{2}}{2} = 317.5 \text{ мм, или } 0.3175 \text{ м.}$$

Так как $I = Mk^2$, то

$$M = \frac{I}{k^2} = \frac{6.3515 \text{ кг} \cdot \text{м}^2}{(0.3175 \text{ м})^2} = 63.007 \text{ кг}.$$

Зная массу, вычислим объём маховика. Масса маховика характеризуется величиной его объёма V и плотностью чугуна ρ .

Так как $M = V \times \rho$, то

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{63.007 \text{ кг}}{7800 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}} = 0.00800778 \text{ м}^3.$$

Наконец, определим ширину обода.

Объём V задан как

$$V = \frac{\pi b}{4}(D^2 - d^2),$$

где b — ширина обода,

D и d — его внешний и внутренний диаметры соответственно.

Отсюда ширина обода

$$b = \frac{4V}{\pi(D^2 - d^2)} = \frac{4 \times 0.00800778 \text{ м}^3}{\pi(0.67^2 - 0.60^2)\text{м}^2} = 0.1157 \text{ м} = \mathbf{115.7 \text{ мм}}.$$

22. ПРОСТЫЕ МАШИНЫ

Машины

Машина — устройство для изменения величины или направления действия силы или и того, и другого одновременно. Обычно простая машина увеличивает силу на входе, называемую *усилием*, чтобы на выходе получить большую силу, которую называют *нагрузкой*. К простым машинам относят системы блоков, винтовые домкраты, зубчатые передачи и систему рычагов.

Отношение сил, отношение движения и коэффициент полезного действия

Отношение сил, или *передаточное отношение*, определяют как отношение нагрузки к воздействию, то есть

$$\text{отношение сил} = \frac{\text{нагрузка}}{\text{усилие}} \quad (1)$$

Так как нагрузку и усилие измеряют в ньютонах, отношение сил равно отношению одних и тех же величин, а значит, не имеет единицы измерения.

Отношение движений, определяют, как отношение расстояния, пройденного точкой, к которой приложено усилие, к расстоянию, пройденному нагрузкой, то есть

$$\text{отношение движений} = \frac{\text{расстояние, пройденное усилием}}{\text{расстояние, пройденное нагрузкой}} \quad (2)$$

Так как и числитель, и знаменатель измеряют в метрах, их отношение, то есть отношение движений, не имеет единицы измерения.

Коэффициент полезного действия (кпд) простейшей машины определяют как отношение коэффициента сил к передаточному отношению, то есть

$$\text{коэффициент полезного действия} = \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}}$$

Так как и числитель, и знаменатель не имеют единицы измерения, коэффициент полезного действия тоже не имеет единицы измерения. Обычно его представляют в процентах, и тогда

$$\text{коэффициент полезного действия} = \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}} \times 100\% \quad (3)$$

Из-за влияния силы трения и инерции, возникающих при движении тела, некоторая часть энергии, поступающей на вход машины, преобразуется в тепло, создавая потери. Из-за этих потерь энергия на выходе машины меньше, чем энергия на входе, следовательно, ни одна машина не может иметь коэффициент полезного действия равным 100%.

Например, определим кпд простой машины, перемещающей нагрузку массой 160 кг на расстояние 1.6 м. Приложенное к машине усилие 200 Н действует на расстоянии 16 м.

Из уравнения (1) имеем

$$\text{отношение сил} = \frac{\text{нагрузка}}{\text{усилие}} = \frac{160 \text{ кг} \times 9.8 \text{ м/с}^2}{200 \text{ Н}} = 7.84.$$

Из уравнения (2) имеем

$$\text{отношение движений} = \frac{\text{пройденное усилием расстояние}}{\text{пройденное нагрузкой расстояние}} = \frac{16 \text{ м}}{1.6 \text{ м}} = 10.$$

Из уравнения (3) имеем

$$\begin{aligned} \text{коэффициент полезного действия} &= \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}} \times 100\% = \\ &= \frac{7.84}{10} \times 100 = 78.4\%. \end{aligned}$$

Для простых машин зависимость между усилием и нагрузкой имеет вид

$$F_e = aF_l + b,$$

где F_e — усилие,
 F_l — нагрузка,
 a и b — константы.

Из уравнения (1) имеем

$$\text{отношение сил} = \frac{\text{нагрузка}}{\text{усилие}} = \frac{F_l}{F_e} = \frac{F_l}{aF_l + b}.$$

Разделив числитель и знаменатель на F_l , получаем

$$\frac{F_l}{aF_l + b} = \frac{1}{a + \frac{b}{F_l}}.$$

Когда нагрузка большая, F_l тоже большое, а $\frac{b}{F_l}$ мало по

сравнению с a . Отношение сил становится примерно равным $\frac{1}{a}$ и называется *предельным отношением сил*, то есть

$\text{предельное отношение} = \frac{1}{a}$

Предельный коэффициент полезного действия простейшей машины определяют как отношение предельного отношения сил к отношению движений, то есть

$$\text{предельный коэффициент полезного действия} = \frac{1}{a \times \text{отношение движений}} \times 100\%,$$

где a — константа из закона простых машин:

$$F_e = aF_l + b.$$

За счет трения и инерции предельный коэффициент полезного действия простых машин практически всегда ниже 100%.

Например, график «усилие/нагрузка» для простой машины представляет собой прямую линию, выраженную формулой $F_e = aF_l + b$, с двумя парами точек:

$$\text{при } F_e = 10 \text{ Н} - F_l = 30 \text{ Н},$$

$$\text{а при } F_e = 74 \text{ Н} - F_l = 350 \text{ Н}.$$

Отношение движений машины равно 17.

Определим предельный коэффициент полезного действия.

Уравнение $F_e = aF_l + b$ имеет форму $y = mx + c$, где m — наклон кривой. Наклонная линия, проходящая через точки $(x_1 \text{ и } y_1)$ и $(x_2 \text{ и } y_2)$ графика $y = mx + c$, задана в виде

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Следовательно, для $F_e = aF_l + b$ наклон кривой

$$a = \frac{74 - 10}{350 - 30} = \frac{64}{320} = 0.2.$$

Предельное отношение сил равно $\frac{1}{a}$, то есть $\frac{1}{0.2} = 5$.

$$\begin{aligned} \text{Предельный коэффициент полезного действия} &= \frac{1}{a \times \text{отношение движений}} \times 100 = \\ &= \frac{1}{0.2 \times 17} \times 100 = \mathbf{29.4\%}. \end{aligned}$$

Блоки

Система *блоков* — это тоже простая машина. Система из одного блока, показанная на **Рис. 22.1а**, изменяет направление действия усилия, но не меняет его величину.

Система из двух блоков, показанная на **Рис. 22.1б**, изменяет как направление действия, так и величину силы.

Теоретически каждая из верёвок, обозначенных (1) и (2), делит нагрузку поровну, следовательно, усилие равно всего половине нагрузки, то есть теоретическое отношение сил равно 2. На практике его значение меньше из-за потерь.

Система из трёх блоков показана на **Рис. 22.1в**.

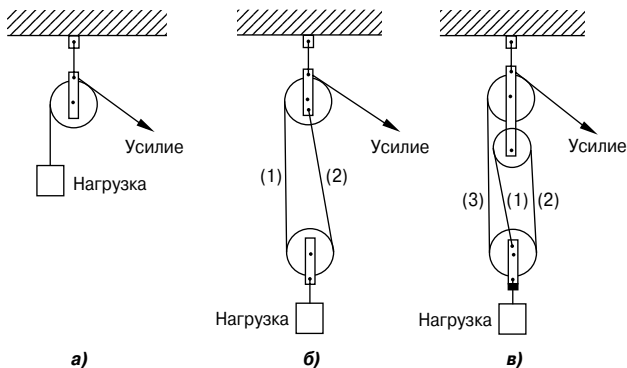


Рис. 22.1

Каждая из верёвок (1), (2) и (3) несет одну треть от общей нагрузки, следовательно, теоретически отношение сил равно 3. В общем случае у системы, состоящей из n блоков, отношение сил равно n . Так как теоретический коэффициент полезного действия системы блоков (потерями пренебрегаем) равен 100%, то из уравнения (3)

$$\text{коэффициент полезного действия} = \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}} \times 100\%$$

следует, что когда отношение сил равно n , то есть

$$100 = \frac{n}{\text{отношение движений}} \times 100,$$

отношение движений тоже равно n .

Например, определим КПД системы из трёх блоков, поднимающей нагрузку 80 кг, если прикладываемое усилие равно 392 Н.

Из уравнения (1) имеем

$$\text{отношение сил} = \frac{\text{нагрузка}}{\text{усилие}} = \frac{80 \text{ кг} \times 9.8 \text{ м/с}^2}{392 \text{ Н}} = 2.$$

Отношение движений = 3 (так как система состоит из трёх блоков).

Из уравнения (3) имеем

$$\begin{aligned} \text{коэффициент полезного действия} &= \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}} \times 100\% = \\ &= \frac{2}{3} \times 100 = \mathbf{66.67\%}. \end{aligned}$$

Винтовой домкрат

Простейший *винтовой домкрат* показан на **Рис. 22.2**.

Это тоже простая машина, которая изменяет как величину, так и направление действия силы.

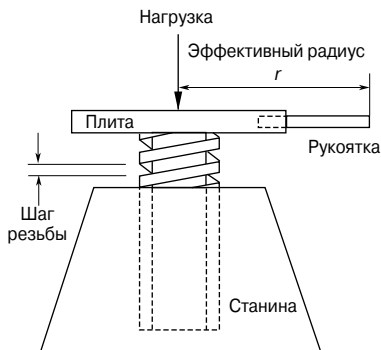


Рис. 22.2

Винт с плитой домкрата расположен на закреплённой муфте в теле устройства (на станине). Когда плиту поворачивают с помощью рукоятки, домкрат вместе с плитой поднимает или опускает находящийся на ней груз. Для винтовой резьбы, как показано на **Рис. 22.2**, за полный оборот винта усилие (то есть прикладываемая сила) перемещается на расстояние $2\pi r$, а нагрузка поднимается на расстояние, равное шагу резьбы l .

$$\text{Отношение движений} = \frac{2\pi r}{l}. \quad (4)$$

Например, определим КПД домкрата, поддерживающего ось автомобиля (нагрузка 2,4 кН). Чтобы поднять ось автомобиля, требуется приложить усилие 60 Н. Эффективный радиус действия усилия — 200 мм, а шаг винтовой резьбы — 5 мм.

Из уравнения (1) имеем

$$\text{Отношение сил} = \frac{\text{нагрузка}}{\text{усилие}} = \frac{2400 \text{ Н}}{60 \text{ Н}} = 40.$$

Из уравнения (4) имеем

$$\text{отношение движений} = \frac{2\pi r}{l} = \frac{2\pi(200) \text{ мм}}{5 \text{ мм}} = 251.3.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \text{коэффициент} \\ \text{полезного действия} &= \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}} \times 100 = \\ &= \frac{40}{251.3} \times 100 = 15.9\%. \end{aligned}$$

Зубчатая передача

Простейшая *зубчатая передача* применяется для передачи вращательного движения. Поскольку с её помощью можно изменять как величину, так и направление действия силы, то её можно отнести к классу простых машин. На **Рис. 22.3** показана зубчатая передача, состоящая из прямозубых цилиндрических колёс, к одному из которых, называемому *движителем (привод)*, прикладывается усилие, которое передаётся другому, называемому *ведомым звеном или ведомым колесом*.

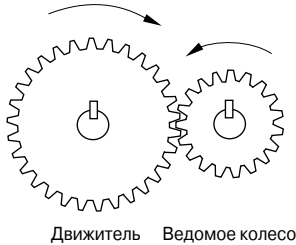


Рис. 22.3

В этой системе зубья колёс размещены так, что при взаимодействии колёс зубья одного колеса совпадают с впадинами между зубьями второго колеса, и поэтому колёса вращаются без помех. При таких условиях количество зубьев движителя и ведомого колеса прямо пропорционально длине окружностей этих колёс, то есть

$$\frac{\text{число зубьев движителя}}{\text{число зубьев ведомого колеса}} = \frac{\text{длина окружности движителя}}{\text{длина окружности ведомого колеса}}. \quad (5)$$

Если у движителя есть, допустим, 40 зубьев, а у ведомого колеса — 20, то ведомое колесо совершает два оборота за время, пока движитель совершает один оборот. В общем случае

$$\frac{\text{число оборотов движителя}}{\text{число оборотов ведомого колеса}} = \frac{\text{число зубьев ведомого колеса}}{\text{число зубьев движителя}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что скорости (угловые) колёс зубчатой передачи обратно пропорциональны числу зубьев. Отношение скорости движителя к скорости ведомого колеса равно отношению движений, то есть

$$\text{Отношение движений} = \frac{\text{скорость движителя}}{\text{скорость ведомого устройства}} = \frac{\text{число зубьев ведомого колеса}}{\text{число зубьев движителя}}. \quad (7)$$

Когда необходимо, чтобы оба колеса вращались в одном направлении, используют *холостой ролик*, как показано на **Рис. 22.4**.

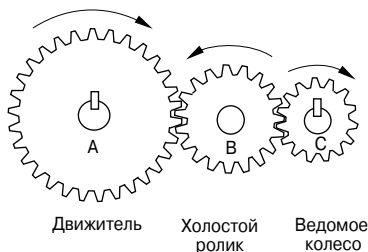


Рис. 22.4

Назовём двигатель, холостой ролик и ведомое колесо А, В и С соответственно. Если N — угловая скорость вращения, а T — число зубьев, то в соответствии с уравнением (7) получаем

$$\frac{N_B}{N_A} = \frac{T_A}{T_B} \text{ и } \frac{N_C}{N_B} = \frac{T_B}{T_C}.$$

Следовательно,

$$\frac{\text{скорость А}}{\text{скорость С}} = \frac{N_A}{N_C} = \frac{N_B \frac{T_B}{T_A}}{N_B \frac{T_B}{T_C}} = \frac{T_B}{T_A} \times \frac{T_C}{T_B} = \frac{T_C}{T_A}.$$

Отсюда следует, что отношение движений не зависит от холостого ролика. Изменяется лишь направление вращения ведомого колеса.

На **Рис. 22.5** показана *сложная зубчатая передача*, где колеса В и С закреплены на одном валу, и поэтому $N_B = N_C$.

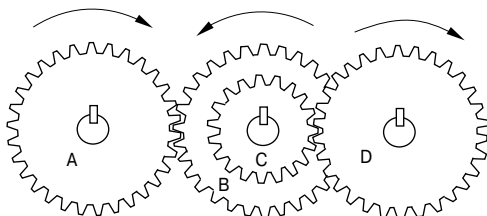


Рис. 22.5

Из уравнения (7) следует

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{T_B}{T_A},$$

откуда

$$N_B = N_A \times \frac{T_A}{T_B}.$$

Аналогично

$$\frac{N_D}{N_C} = \frac{T_C}{T_D},$$

откуда

$$N_D = N_C \times \frac{T_C}{T_D}.$$

Но так как $N_B = N_C$, то

$$N_D = N_A \times \frac{T_A}{T_B} \times \frac{T_C}{T_D}. \quad (8)$$

Для сложных зубчатых передач, имеющих в общем случае P колёс,

$$N_P = N_A \times \frac{T_A}{T_B} \times \frac{T_C}{T_D} \times \frac{T_E}{T_F} \times \dots \times \frac{T_O}{T_P},$$

откуда

$$\text{отношение движений} = \frac{N_A}{N_P} = \frac{T_B}{T_A} \times \frac{T_D}{T_C} \times \dots \times \frac{T_P}{T_O}. \quad (9)$$

Например, сложная зубчатая передача состоит из движителя А, имеющего 40 зубьев и соединяющегося с колесом В со 160 зубьями. Присоединённый к тому же валу, что и В, вал С имеет 48 зубьев и соединяется с последним валом D с 96 зубьями.

Из уравнения (9)

$$\text{отношение движений} = \frac{\text{скорость А}}{\text{скорость D}} = \frac{T_B}{T_A} \times \frac{T_D}{T_C} = \frac{160}{40} \times \frac{96}{48} = 8.$$

Если отношение сил равно 6, то

$$\text{коэффициент полезного действия} = \frac{6}{8} \times 100 = 75\%.$$

Рычаги

Рычаг может изменять как величину, так и направление действия силы и поэтому тоже является простой машиной. Есть три типа, или уровня, рычагов, показанных на **Рис. 22.6**.

У *рычага первого рода* точка опоры расположена между усилием и нагрузкой, как показано на **Рис. 22.6а**.

У *рычага второго рода* нагрузка расположена между усилием и точкой опоры, как показано на **Рис. 22.6б**.

У *рычага третьего рода* усилие прикладывается между нагрузкой и точкой опоры, как показано на **Рис. 22.6в**.

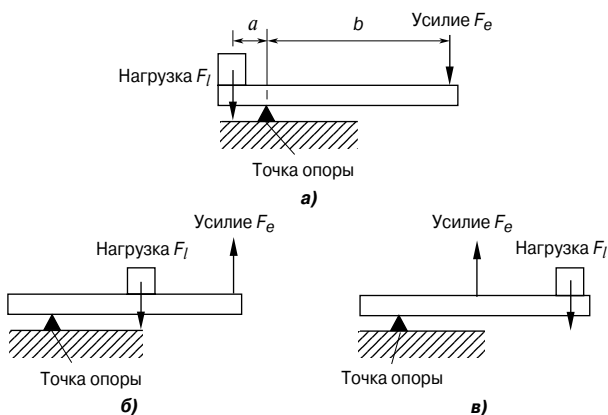


Рис. 22.6

Задачи, решаемые с помощью рычагов, в основном используют правило моментов сил (см. гл. 12). Следовательно, для рычага, показанного на **Рис. 22.6а**, когда рычаг находится в равновесии,

момент против часовой стрелки = моменту по часовой стрелке,

то есть

$$a \times F_l = b \times F_e.$$

Следовательно,

$$\text{отношение сил} = \frac{F_l}{F_e} = \frac{b}{a} = \frac{\text{расстояние от усилия до точки опоры}}{\text{расстояние от нагрузки до точки опоры}}.$$

Например, нагрузка на рычаг первого рода равна 1.2 кН, расстояние между точкой опоры и нагрузкой равно 0.5 м, а расстояние между точкой опоры и усилием — 1.5 м.

Применяя правило моментов при равновесии, получаем:

момент против часовой стрелки = моменту по часовой стрелке,

то есть

$$1\,200 \text{ Н} \times 0.5 \text{ м} = \text{усилие} \times 1.5 \text{ м},$$

откуда

$$\text{усилие} = \frac{1\,200 \times 0.5}{1.5} = 400 \text{ Н}.$$

Зная нагрузку и усилие, можно найти отношение сил.

$$\text{Отношение сил} = \frac{F_l}{F_e} = \frac{1\,200}{400} = 3 .$$

Аналогично отношение силы находят, зная расстояния между точкой опоры и нагрузкой, точкой опоры и усилием.

$$\text{Отношение сил} = \frac{b}{a} = \frac{1.5}{0.5} = 3 .$$

Этот результат показывает, что для поднятия нагрузки, допустим, в 300 Н требуется усилие равное 100 Н.

В соответствии с уравнением (3)

$$\text{коэффициент полезного действия} = \frac{\text{отношение сил}}{\text{отношение движений}} \times 100\% ,$$

откуда получаем

$$\text{отношение движений} = \frac{\text{отношение сил}}{\text{коэффициент полезного действия}} \times 100 = \frac{3}{100} \times 100 = 3 .$$

Этот результат показывает, что для подъёма нагрузки, допустим, на 100 мм усилие следует прикладывать на расстоянии 300 мм.

23. МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЫ НА ТВЁРДОЕ ТЕЛО

Виды механического воздействия на тело

Приложенная к телу сила может вызывать изменение либо его формы, либо направления его движения. Единица силы — *ньютон* [Н].

Нет ни одного идеально твёрдого тела. И когда к телу прикладывают силу, изменяются его размеры. Эти изменения не всегда заметны невооружённым глазом, так как они очень малы. Например, пролёт моста проседает под весом грузовика, а гаечный ключ слегка изгибается, затягивая гайку. Инженерам и конструкторам очень важно помнить о влиянии сил на материалы, из которых создаются устройства, а также о механических свойствах этих материалов.

К трем основным видам механического воздействия на тело относятся:

- растяжение;
- сжатие;
- сдвиг.

Растяжение

Растяжение — это действие сил, стремящихся растянуть материал, из которого сделано тело, как это показано на **Рис. 23.1**.

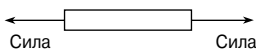


Рис. 23.1

Примеры:

- растягивается верёвка или трос у крана, переносящего груз;
- в натяжении находится растянутая резиновая лента;
- растянут болт, когда гайка закручена.

Сила, растягивающая тело, увеличивает его длину в направлении своего действия.

Сжатие

Сжатие — это действие сил, стремящихся сдвинуть или сжать материал, из которого сделано тело, как это показано на **Рис. 23.2**.

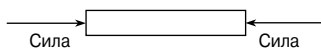


Рис. 23.2

Примеры:

- под давлением находится опора моста;
- сжимается подошва ботинка;
- под давлением находится стрела крана.

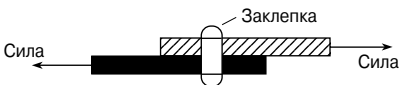
Сила сжатия, то есть сила, сжимающая тело, уменьшает его длину в направлении своего действия.

Сдвиг

Сдвиг — это сила, которая стремится сдвинуть параллельно часть материала тела относительно другой его части.

Примеры:

- заклёпка, скрепляющая две плиты, сдвигается, если между плитами прикладывается сила растяжения, как это показано на **Рис. 23.3**;

**Рис. 23.3**

- машина, режущая лист металла, или садовые ножницы, выполняя свою работу, используют силу сдвига;
- горизонтально лежащий брус можно сместить силой сдвига;
- узлы трансмиссии в автомобиле можно сместить силой сдвига.

Сила сдвига может деформировать материал: согнуть, продвинуть одну часть тела по отношению к другой или перекрутить.

Напряжение

Силы, действующие на тело, вызывают изменение параметров материала из которого оно сделано, и в этом случае говорят, что материал напряжён. *Напряжение* — это отношение приложенной силы F к площади поперечного сечения материала S . Для обозначения напряжения при растяжении и сжатии используют символ σ (греческая буква сигма). Единица механического напряжения — *паскаль* [Па]. $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Отсюда

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ Па}$$

где F — сила, измеряемая в ньютонах [Н],

A — площадь поперечного сечения, измеряемая в квадратных метрах [м²].

(Условно считается, что при растяжении σ — положительно, а при сжатии — отрицательно.— *Прим. редактора перевода.*)

Для сил растяжения и сжатия площадь поперечного сечения такая же, как для сил, направленных под прямым углом к направлению действия.

Например, на прямоугольный брусок, площадь поперечного сечения которого равна 75 мм^2 , действует сила растяжения, равная 15 кН . Тогда **напряжение в бруске**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{15 \times 10^3 \text{ Н}}{75 \times 10^{-6} \text{ м}^2} = 0.2 \times 10^9 = \mathbf{200 \text{ МПа}}.$$

Линейная деформация

Изменение параметров тела под действием силы называют *линейной деформацией*. Для сил растяжения и сжатия линейная деформация есть отношение изменения длины к начальной длине материала. (Термин «линейная деформация» имеет синоним «относительное удлинение». — *Прим. редактора перевода*.) Для обозначения линейной деформации (относительное удлинение) используют символ ε (греческая буква эпсилон). Для предмета длиной l метров, длина которого изменяется на x метров в результате напряжения,

$$\varepsilon = \frac{x}{l}$$

(Условно считается, что при растяжении значения x , а следовательно, и ε — положительны, а при сжатии — отрицательны. — *Прим. редактора перевода*.)

Линейная деформация не имеет единицы измерения и зачастую выражается в процентах, то есть

$$\text{линейная деформация (в процентах)} = \frac{x}{l} \times 100.$$

Например, когда к палке длиной 1.60 м прикладывается сжимающая нагрузка, её длина уменьшается на 0.1 мм .

Отсюда

$$\text{линейная деформация} = \frac{\text{сжатие}}{\text{начальная длина}} = \frac{0.1 \text{ мм}}{1.6 \times 10^3 \text{ мм}} = \frac{0.1}{1600} = \mathbf{0.0000625};$$

линейная деформация в процентах = $0.0000625 \times 100 = \mathbf{0.00625\%}$.

Напряжение сдвига и деформация сдвига

Для силы сдвига напряжение сдвига равно отношению $\frac{\text{сила}}{\text{площадь}}$, где площадь параллельна направлению действия силы. Напряжение сдвига обозначается греческой буквой τ (тау).

Следовательно, как видно из **Рис. 23.4**, напряжение сдвига

$$\tau = \frac{F}{bd}.$$

(Термин «напряжение сдвига» имеет синоним «касательное напряжение». — Прим. редактора перевода.)

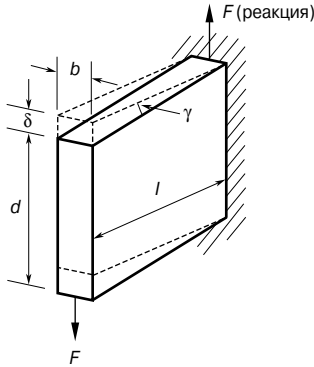


Рис. 23.4

Деформация сдвига (сдвиговая деформация) обозначается греческой буквой γ (гамма), и на **Рис. 23.4** видно, что деформация сдвига $\gamma = \frac{\delta}{l}$.

Модулем сдвига называют отношение напряжения сдвига к деформации сдвига, то есть

$$G = \frac{\text{напряжение сдвига}}{\text{деформация сдвига}},$$

или

$$G = \frac{\tau}{\gamma}.$$

(Для любого металла модуль сдвига G приблизительно равен 0.4 модуля упругости E .)

Напряжение кручения и деформация кручения

Из **Рис. 23.5** следует, что

$$\frac{\tau}{r} = \frac{M}{J} = \frac{G\theta}{l}$$

где τ — напряжение при сдвиге на радиусе r ,

M — крутящий момент вала,

J — полярный момент инерции сечения вала,

G — модуль сдвига,

θ — угол закручивания (в радианах) на длине l вала.

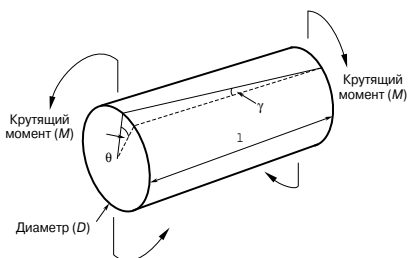


Рис. 23.5

Полярный момент инерции сечения цельного вала равен

$$J = \frac{\pi D^4}{32},$$

где D — диаметр.

Полярный момент сечения полого вала равен

$$J = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4),$$

где D — внешний диаметр,

d — внутренний диаметр.

Например, определим угол закручивания полого вала длиной 2.4 м, имеющего внешний и внутренний диаметры 80 и 10 мм соответственно. Вал может передавать вращающий момент, если максимально допустимое напряжение сдвига равно 45 МПа.

Известно, что

$$\frac{\tau}{r} = \frac{M}{J} = \frac{G\theta}{l},$$

откуда

$$\begin{aligned} \text{крутящий момент } M &= \frac{\tau J}{r} = \\ &= \frac{(45 \times 10^6 \text{ Па}) \left(\frac{\pi}{32} (100^4 - 80^4) \times 10^{-12} \text{ м}^4 \right)}{50 \times 10^{-3} \text{ м}} = 5.217 \text{ кН}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Если модуль сдвига равен 80 ГПа, то угол закручивания между концами определяется из уравнения

$$\frac{\tau}{r} = \frac{G\theta}{l},$$

откуда **угол закручивания** равен

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\tau l}{Gr} = \frac{(45 \times 10^6 \text{ Па})(2.4 \text{ м})}{(80 \times 10^9 \text{ Па})(50 \times 10^{-3} \text{ м})} = \\ &= 0.027 \text{ рад} = 0.027 \times \frac{180}{\pi} = 1.547^\circ. \end{aligned}$$

Упругость и предел упругости

Упругость — это способность материала принимать свою первоначальную форму и размер, когда действие внешних сил прекращается.

Пластичность — это свойство материала под действием силы изменять форму без нарушения структуры. Следовательно, если материал не принимает свою первоначальную форму после воздействия внешних сил, то говорят, что он пластичен.

При ограниченных нагрузках мягкая сталь, медь, полиэтилен и резина относятся к упругим материалам; свинец и пластилин — к пластичным.

Если силу растяжения, приложенную к однородному бруску мягкой стали, постепенно увеличивать и измерять соответствующее удлинение бруска, то при условии, что сила не слишком велика, по полученным результатам можно построить график, похожий на тот, что изображен на **Рис. 23.6**.



Рис. 23.6



Рис. 23.7

Так как график имеет вид прямой, удлинение прямо пропорционально приложенной силе.

Если приложенная сила достаточно велика, выясняется, что наступает момент, когда после прекращения воздействия силы материал больше не восстанавливается до первоначальной длины. В таком случае говорят, что материал достиг *предела упругости*, и график «сила/удлинение» больше не представляет собой прямую.

Напряжение $\sigma = \frac{F}{A}$, и так как для определенного бруска

площадь A постоянна, то $F \sim \sigma$.

Линейная деформация $\epsilon = \frac{x}{l}$, и так как для определенного

бруска l — константа, то $x \sim \epsilon$. Следовательно, если напряжение материала ниже предела упругости, график «напряжение/линейная» деформация будет таким, как показано на **Рис. 23.7**, а график «сила/удлинение» таким, как показано на **Рис. 23.6**.

Закон Гука

Закон Гука гласит:

|| *Если предел упругости не превышен, то удлинение материала пропорционально прикладываемой к нему силе.*

Из этого следует, что

|| *Если предел упругости не превышен, то возникшее напряжение прямо пропорционально давлению, вызвавшему его.*

Модуль Юнга

Если предел упругости не превышен, то напряжение σ равно
напряжение = константа \times линейная деформация.

Этот коэффициент пропорциональности называется *модулем Юнга* или *модулем упругости* и обозначается символом E . Значение E можно определить из градиента начальной части прямой графика «напряжение/линейная деформация». Единица E — *паскаль* (совпадает с единицей напряжения, поскольку линейная деформация — величина относительная).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ Па}$$

Ниже приведены значения модуля Юнга E для наиболее часто встречающихся материалов (значения даны в ГПа, то есть численное значение следует умножить на 10^9 Па):

Алюминий	70	Сталь	210
Латунь	90	Свинец	18
Медь	96	Вольфрам	410
Алмаз	1 200	Чугун	110
		Цинк	85

Жёсткость

Если модуль Юнга данного материала велик, говорят, что он имеет большую *жёсткость*, определяемую отношением силы к линейной деформации.

$$\text{Жёсткость} = \frac{\text{сила}}{\text{линейная деформация}} = \frac{F}{x}.$$

Например, мягкая сталь намного жёстче свинца.

Так как

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad \text{и} \quad \varepsilon = \frac{x}{l},$$

то

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{x}{l}} = \frac{Fl}{Ax} = \left(\frac{F}{x}\right)\left(\frac{l}{A}\right),$$

то есть

$$E = (\text{жёсткость}) \times \left(\frac{l}{A}\right).$$

Жёсткость $\left(= \frac{F}{x}\right)$, так же как и модуль Юнга, является градиентом зависимости «сила/линейная деформация», поэтому

$$E = (\text{градиент зависимости «сила/линейная деформация»}) \left(\frac{l}{A}\right)$$

Так как l и A для определенного образца постоянны, то чем больше модуль Юнга, тем больше жёсткость.

Например, для определения модуля упругости фрагмента мягкой стали нагружают провод. При этом возникает соответствующая линейная деформация. По результатам эксперимента составляют таблицу.

Нагрузка [Н]	0	40	110	160	200	250	290	340
Растяжение [мм]	0	1.2	3.3	4.8	6.0	7.5	10.0	16.2

Средний диаметр провода равен 1.3 мм, а его длина — 8 м.

На **Рис. 23.8** показан график зависимости «нагрузка/линейная деформация».

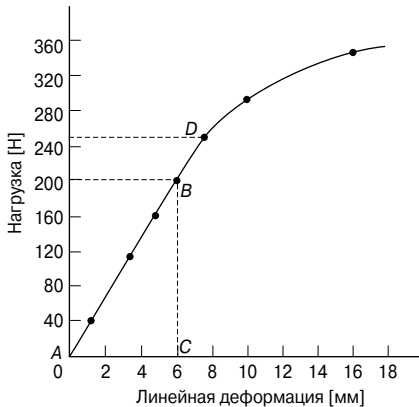


Рис. 23.8

Известно, что

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \left(\frac{F}{x}\right)\left(\frac{l}{A}\right),$$

где $\frac{F}{x}$ — градиент прямой линии, являющейся частью графика.

$$\text{Из графика градиент } \frac{F}{x} = \frac{BC}{AC} = \frac{200 \text{ Н}}{6 \times 10^{-3} \text{ м}} = 33.33 \times 10^3 \text{ Н/м}.$$

$$\text{Модуль упругости} = (\text{градиент графика}) \left(\frac{l}{A}\right),$$

длина образца $l = 8 \text{ м}$,

а площадь поперечного сечения

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0.0013)^2}{4} = 1.327 \times 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Следовательно, **модуль упругости**

$$E = (33.33 \times 10^3) \left(\frac{8.0}{1.327 \times 10^{-6}}\right) = \mathbf{201 \text{ ГПа}}.$$

На **Рис. 23.8** видно, что предел упругости находится в точке D, где график больше не является прямой линией. Как видно из рисунка, эта точка соответствует нагрузке 250 Н.

$$\begin{aligned} \text{Напряжение в точке предела упругости} &= \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \\ &= \frac{250}{1.327 \times 10^{-6}} = 188.4 \times 10^6 \text{ Па} = \mathbf{188.4 \text{ МПа}}. \end{aligned}$$

Вязкость, хрупкость и ковкость

Вязкость — это способность материала пластично деформироваться благодаря вытягиванию без разрывов. Именно это свойство позволяет вытягивать материал в проволоку. У гибких материалов, таких, как мягкая сталь, медь и золото, можно добиться значительного удлинения, не доводя материал до разрыва. У гибких материалов удлинение обычно достигает 15% и более.

Хрупкость — это свойство материала подвергаться разрывам без какой-либо значимой пластической деформации вначале. Хрупкость — это отсутствие вязкости. Такие хрупкие материалы, как чугун, стекло, бетон, кирпич и керамика, практически не проходят стадию вытягивания, а за стадией упругости сразу же следует разрыв. Во время испытания на упругость на материале не образуется практически никакого «сужения» перед тем, как происходит разрыв.

Тягучесть (ковкость) — это свойство материала, благодаря которому с помощью молота или катка материалу можно придавать форму, не нагревая его. Тягучие материалы могут подвергаться пластической деформации без разрыва. К таким материалам относятся свинец, золото, шпаклёвка, мягкая сталь и др.

24. ИСПЫТАНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ

Во время такой проверки к образцу материала прикладывают нагрузку и постепенно её увеличивают. При этом наблюдается соответствующее удлинение материала. Этот процесс можно продолжать до тех пор, пока образец не разорвётся на две части. Такое испытание называют *разрушающим*. Испытание обычно выполняют на универсальном испытательном стенде-автомате, который может прикладывать либо растягивающее, либо сжимающее усилие к образцу в небольших, точно отмеренных дозах. В *Британском стандарте 18* (British Standard 18) описаны стандартизованные процедуры для такой проверки. Испытуемые образцы материала изготовлены по стандартным шаблонам. Два типичных образца, готовых к испытаниям, показаны на **Рис. 24.1**.

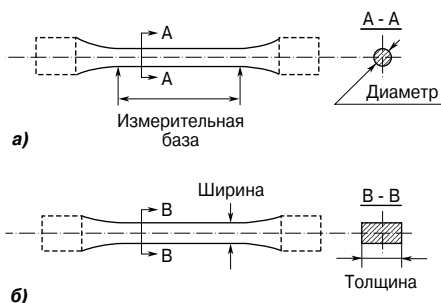


Рис. 24.1

Результаты испытания на прочность могут быть представлены в виде графика «нагрузка/удлинение». Типичный график для образца мягкой стали показан на **Рис. 24.2**.

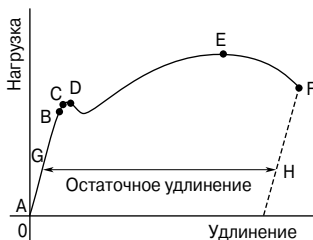


Рис. 24.2

- Между точками А и В находится область, где применим закон Гука, и напряжение прямо пропорционально линейной деформации. Напряжение определяют как отношение прило-

женной силы к площади поперечного сечения измерительной базы. Градиент АВ используется при определении модуля Юнга (см. гл. 23).

- Точка В — это *предел пропорциональности*, где напряжение больше не пропорционально линейной деформации, при условии, что сила продолжает действовать.
- Точка С — это *предел упругости*, и если образец нагрузить до этого предела, то при удалении нагрузки он примет свою первоначальную длину, то есть остаточное удлинение незначительно.
- Точку D называют *пределом текучести*. В этой точке наблюдается резкое удлинение образца, притом что нагрузка не увеличивается. Предел текучести задается как отношение нагрузки, при которой начинается растяжение, к начальной площади поперечного сечения образца,

то есть

$$\text{предел текучести} = \frac{\text{нагрузка, при которой начинается растяжение}}{\text{начальная площадь поперечного сечения}}$$

Предел текучести является индикатором вязкости материала (см. гл. 23).

- Между точками D и E удлинение происходит по всей протяженности измерительной базы образца.
- Точка E характеризует максимальную нагрузку, которую можно приложить к образцу, и используется для определения *окончательного предела прочности* образца (чаще ее называют просто *пределом прочности*),

то есть

$$\text{окончательный предел прочности} = \frac{\text{максимальная нагрузка}}{\text{начальная площадь поперечного сечения}}.$$

- Между точками E и F, перед тем как произойдет разрыв, образуется *сужение* или *горлышко*. Площадь поперечного сечения уменьшается, как правило, до половины начальной площади,

то есть

$$\text{сокращение площади (в процентах)} = \frac{\text{начальная площадь сечения} - \text{конечная площадь сечения}}{\text{начальная площадь сечения}} \times 100\%.$$

Процентное сокращение площади определяет ковкость материала (см. гл. 23).

Величина напряжения в точке F больше, чем в точке E, так как, несмотря на то, что нагрузка на образец уменьшается по

мере роста удлинения, площадь поперечного сечения также сокращается.

- В точке F происходит разрыв образца.
- Расстояние GH называется *остаточным удлинением* и определяется отношением увеличения длины образца, произошедшего во время испытания, к начальной длине образца (в процентах),

то есть

$$\text{остаточное удлинение} = \frac{\text{увеличение длины, произошедшее во время испытания}}{\text{начальная длина}} \times 100\%.$$

Например, ниже приведены данные испытания на разрыв образца с сечением прямоугольной формы, изготовленного из цинка. Длина образца — 40 мм; ширина образца — 2.5 мм; измерительная база — 120 мм.

Нагрузка [кН]	10	17	25	30	35	37.5	38.5	37	34	32
Удлинение [мм]	0.15	0.25	0.35	0.55	1.00	1.50	2.50	3.50	4.50	5.50

Разрыв происходит, когда удлинение достигает 5 мм, а максимальная нагрузка равна 38.5 кН.

График «нагрузка/удлинение» показан на Рис. 24.3.

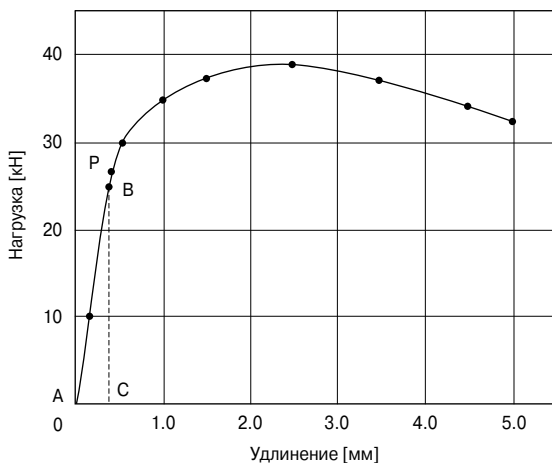


Рис. 24.3

Предел пропорциональности находится в точке P. Здесь начальный градиент кривой начинает изменяться, а нагрузка достигает 26.5 кН.

Напряжение в точке Р задается отношением приложенной силы в точке Р к площади поперечного сечения измерительной базы, то есть

$$\sigma = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \frac{26.5 \times 10^3 \text{ Н}}{40 \times 2.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2} = 265 \times 10^6 \text{ Па} = \mathbf{265 \text{ МПа}}.$$

Градиент прямого участка графика задается отношением максимальной нагрузки на линейном участке к удлинению образца, произошедшему при этой нагрузке, то есть

$$\frac{BC}{AC} = \frac{25\,000 \text{ Н}}{0.35 \times 10^{-3} \text{ м}} = 71.43 \times 10^6 \text{ Н/м}.$$

$$\begin{aligned} \text{Модуль Юнга} &= (\text{градиент зависимости}) \left(\frac{l}{A} \right) = \\ &= (71.43 \times 10^6) \left(\frac{120 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}} \right) = 85.72 \times 10^9 \text{ Па} = \mathbf{85.72 \text{ ГПа}}. \end{aligned}$$

$$\text{Предел прочности при растяжении} = \frac{\text{максимальная нагрузка}}{\text{начальная площадь сечения}} =$$

$$= \frac{38.5 \times 10^3 \text{ Н}}{100 \times 10^{-6} \text{ м}^2} = 385 \times 10^6 \text{ Па} = \mathbf{385 \text{ МПа}}.$$

$$\text{Растяжение (в процентах)} = \frac{\text{удлинение в точке разрыва}}{\text{начальная длина}} =$$

$$= \frac{5.0 \text{ мм}}{120 \text{ мм}} \times 100 = \mathbf{4.17\%}.$$

25. ИСПЫТАНИЕ НА ТВЁРДОСТЬ И УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

Твёрдость

Твёрдость материала может быть определена несколькими способами:

- по способности царапать другие материалы;
- по способности сопротивляться царапанью;
- по способности сопротивляться пластическому распространению отпечатка;
- по способности сопротивляться эластичной деформации под отпечатком;
- по способности сопротивляться деформации путем скатывания.

Испытания на твёрдость

Во время *испытаний на твёрдость* на испытуемый материал оказывают давление каким-нибудь твёрдым образцом, например алмазом или стальным шариком определенных размеров. Тогда твёрдость можно определить по размеру отпечатка, остающегося от определённой нагрузки. Существует три основных метода оценки твёрдости:

- метод Бринелля;
- метод Виккерса;
- метод Роквелла.

Метод Бринелля

По стандартному *методу Бринелля* шарик из закалённой стали размером 10 мм вдавливают в материал под нагрузкой 3 000 кг. Диаметр получившегося отпечатка измеряют под микроскопом. Число твёрдости по Бринеллю H_B задается как

$$H_B = \frac{\text{нагрузка}}{\text{сферическая площадь отпечатка}} = \frac{F}{\frac{\pi D}{2} [D - \sqrt{D^2 - d^2}]},$$

где F — нагрузка, измеряемая в килограммах (обычно 3 000 кг),

D — диаметр стального шара, измеряемый в миллиметрах (обычно 10 мм),

d — диаметр отпечатка, измеряемый в миллиметрах.

Для более мягких материалов стандартное испытание предусматривает меньшие нагрузки и шары разных диаметров (как правило, размером 1, 2 и 5 мм), а при испытаниях очень твёрдых материалов шары иногда заменяют наконечником из карбида

вольфрама. Значения числа твёрдости по Бринеллю находятся в диапазоне примерно от 900 для твёрдых материалов (с пределом прочности на разрыв, эквивалентным пределу прочности стали, равному 3 000 МПа) до примерно 100 (у материалов с пределом прочности на разрыв, эквивалентным пределу прочности стали, равному 350 МПа).

При испытаниях по методу Бринелля необходимо соблюдать меры предосторожности.

- Образец материала должен быть достаточно широким и толстым. Центр оттиска должен находиться от края образца на расстоянии, не меньшем, чем два с половиной диаметра самого оттиска. Толщина должна быть, как минимум, в десять раз больше глубины отпечатка и вычисляется как $\frac{F}{\pi DH}$,

где H — подсчитанное число твёрдости по Бринеллю.

- Поверхность материала должна быть по мере возможности абсолютно плоской и отполированной.
- Нагрузка должна удерживаться 5 с.
- Под прямыми углами должны различаться два диаметра оттиска, и при вычислении числа твёрдости следует использовать их среднее значение.
- При записи результата испытаний необходимо указывать значения диаметра шара и величину нагрузки (например, $H 10/3\ 000 = 410$).

Операцию измерения выполняют на специальных автоматах, но в большинстве случаев пригодны и универсальные испытательные стенды-автоматы.

Для материалов с одинаковыми свойствами и для семейств похожих материалов существует прямо пропорциональная зависимость между пределом прочности на разрыв и числом твёрдости по Бринеллю. Предел прочности на разрыв = $k \times$ твёрдость. Например, предел прочности никелево-хромовой стали, которую сначала закаляли, а потом отпускали при различной температуре, колеблется от 1 900 до 1 070 МПа, а число твёрдости по Бринеллю — от 530 до 300. Коэффициент пропорциональности k в этом случае равен 3.57 для любой температуры отпуска. Похожим образом у семейства углеродистой стали предел прочности на разрыв растёт от 380 до 790 МПа по мере увеличения содержания углерода. Число твёрдости по Бринеллю колеблется от 115 до 230 в таком же диапазоне концентрации углерода, а коэффициент пропорциональности в этом случае равен 3.35. Из-за общего характера соотношений между пределом прочности и твёрдостью существуют таблицы пересчёта этих величин. Обычно в основе этих таблиц лежит коэффициент пропорциональности 3.35.

Метод Виккерса

По методу Виккерса твёрдость измеряют с помощью алмаза, имеющего форму пирамиды. Этот алмаз с квадратным основанием вдавливают в исследуемый образец. Угол между противоположными плоскостями алмаза равен 136° , а прикладываемая нагрузка равна 5, 10, 30, 50 или 120 кг — в зависимости от твёрдости материала. Число твёрдости по Виккерсу H_V , задано как

$$H_V = \frac{\text{нагрузка}}{\text{сферическая площадь отпечатка}} = \frac{F}{\frac{d^2}{1.854}},$$

где F — нагрузка в килограммах,

d — длина диагонали квадрата отпечатка, измеряемая в миллиметрах.

Метод Роквелла

Метод Роквелла на твёрдость в основном применяют для быстрой проверки конечной трансформации материала. Число твёрдости отображается непосредственно на шкале измерения. Принцип тестирования основан на прямом измерении глубины отпечатка либо от стального шара, либо от индентора — алмаза в форме конуса со сферически закруглённым концом. Выбор шара или конуса зависит от твёрдости тестируемого материала (стальной шар используется для материалов, твёрдость которых соизмерима с твёрдостью средней углеродистой стали).

На панели прибора расположено несколько шкал, среди которых могут быть как шкалы Роквелла от А до Н, так и шкалы Роквелла К, N и Т. Вот некоторые примеры шкал:

- шкала А: используется с индентором и нагрузкой 60 кг;
- шкала В: используется с индентором и нагрузкой 150 кг;
- шкала С: используется со стальным шаром диаметром 1/16 дюйма и нагрузкой 100 кг, и т.д.

Большое преимущество метода Роквелла в отличие от методов Бринелля и Виккерса — оперативность его проведения. Кроме того, что на показания не влияет состояние поверхности, метод очень хорошо подходит для конвейерного тестирования. Однако Британские Стандарты требуют, чтобы число твёрдости базировалось на площади поверхности любого полученного отпечатка.

Другие методы испытаний на твёрдость

Методы Бринелля, Виккерса и Роквелла — это примеры статических испытаний на твёрдость. Ещё одним примером подобных испытаний является проба на *твёрдомере Ферта*. Он очень похож на испытание по методу Виккерса.

К динамическим методам относятся, например, измерение твёрдости *тестером с маятником Герберта*, а также *склероскопом Шора*. В первом применяется коромысло в виде арки, лежащее

на стальном или алмазном стержне; твёрдость можно определить по времени, затраченному на десять колебаний, или по разности между первоначальным угловым смещением и первым колебанием.

Склероскоп — это переносной аппарат, в котором молоточек с алмазным наконечником падает на тестируемый материал. Высота отскока даёт число твёрдости.

Нерушающие методы

Трещину в отлитом изделии можно обнаружить методами с использованием рентгеновского излучения. Поверхностные трещины можно выявить электромагнитными методами, а также методами с использованием ультрафиолетового излучения. Первый способ применим только к чёрным металлам, а последними можно проверять другие металлы и такие материалы, как пластмасса и керамика.

Испытания на ударную вязкость

Испытания на ударную вязкость выполняются для получения информации о прочности материала, то есть для определения энергии, необходимой для его разрыва. К таким методам испытаний относятся испытание по *методу Изода*, который в основном применяют в Британии, и по *методу Шарпи*, широко распространённому в континентальной Европе.

Метод Изода

В испытаниях по методу Изода испытуемый образец имеет в сечении квадрат со стороной 10 мм и треугольный надрез под углом 45° к одной из сторон. Образец крепко зажат в тиски аппарата Изода у треугольного надреза (**Рис. 25.1**). Тяжёлый маятниковый копёр с размаха опускается, ударяет по образцу и раскалывает его. Разность между углом к вертикали, под которым отпущен маятник,

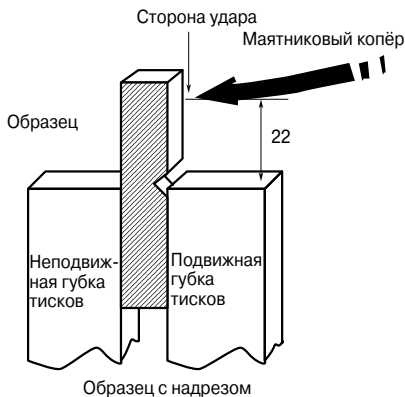


Рис. 25.1

и углом перехлеста после того, как образец треснул, пропорциональна энергии, затраченной на раскол образца. Её можно оценить по шкале, установленной на тестирующем аппарате.

В основном метод Изода — это приемочный тест, то есть значение поглощенной при ударе энергии либо приемочное, либо не приемочное. Результаты этого испытания можно использовать для определения силы удара в других условиях.

Метод Шарпи

Метод Шарпи похож на метод Изода, различие только в том, что иначе крепится образец и есть возможность изменять массу маятника. В методе Изода образец зажат на одном конце и поддерживается, как консоль, а в методе Шарпи образец поддерживается с каждого конца, как балка. Еще одно различие заключается в том, что надрез находится в центре поддерживаемой балки и смотрит в противоположную сторону от удара (**Рис. 25.2**).

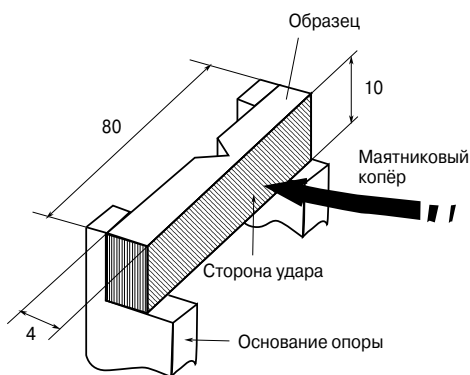


Рис. 25.2

26. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Необходимое требование к инженерному проекту — это точная оценка напряжений и линейных деформаций в компонентах сооружения в рабочих условиях. «Соппротивление материалов» — это вопрос, относящийся к физическим свойствам веществ и возникающий каждый раз при воздействии внешней силы. Ни одно твёрдое тело не обладает абсолютной твёрдостью, и под воздействием сил его параметры изменяются. Такие изменения не всегда заметны невооружённому глазу, так как они весьма незначительны. Например, гаечный ключ слегка выгибается, когда им закручивают гайку, а опора моста проседает под весом машины.

Линейная деформация

Изменение величины линейного размера тела, равное x , отнесённое к первоначальному значению этой величины l , даёт очень много информации о том, что произошло с самим материалом. Это отношение безразмерно и называется *линейной деформацией* ε , то есть

$$\varepsilon = \frac{x}{l}.$$

Напряжение

Сила F , действующая на площадь тела A , называют *напряжением* σ , единица измерения которого паскаль [Па], или ньютон на квадратный метр [$\text{Н}/\text{м}^2$], то есть

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

(В формулах этой книги использовались международные обозначения величин. Соответствие между международными и отечественными обозначениями приведены в гл. 6. — *Прим. редактора перевода.*)

Модуль упругости Юнга

Если твёрдое тело подвергается постепенно увеличивающемуся давлению и если измерять растущее напряжение и возникающую при этом линейную деформацию, то можно построить график зависимости линейной деформации от напряжения. До определённой величины напряжения, которую называют пределом пропорциональности и которая зависит от свойств конкретного вещества, график представляет собой прямую. Градиент прямой — константа, называемая *модулем упругости* E (модуль Юнга).

$$E = \frac{\text{напряжение (до предела пропорциональности)}}{\text{линейная деформация}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{x}{l}} = \frac{Fl}{xA} \text{ Па. (1)}$$

Каждый материал имеет свою величину модуля Юнга. Например, модуль Юнга мягкой стали равен примерно 210×10^9 Па (или 210 ГПа).

Предел упругости

Если сила прекращает своё действие и тело принимает первоначальную форму и размер, говорят, что материал упругий. Если тело не принимает первоначальную форму, говорят, что материал пластичный. Медь, сталь и резина относятся к упругим материалам, а свинец и пластилин — к пластичным. Однако даже для упругих материалов существует предел напряжения, после которого они могут вернуться к исходным параметрам. Этот предел называют *пределом упругости* материала. Предел упругости и предел пропорциональности для всех машиностроительных материалов практически один и тот же. Если тело испытывает напряжение, превышающее предел упругости, то возникает *остаточная деформация*. (Подробнее о модуле Юнга и пределе упругости см. стр. 129, 130.)

Необходимость измерения напряжения

При разработке конструкций, таких, как опоры линий электропередачи, опорные колонны или пролёты мостов, проектировщик уделяет особое внимание механическим свойствам материалов, используемых в работе. Для получения данных о материалах разработано множество методов испытаний, проводимых в лабораторных условиях. Среди них испытания на разрыв, сжатие, кручение, ударную вязкость, ползучесть и усталость. Каждое из них даёт информацию о поведении материалов в рабочих условиях. (Типовой метод испытаний на разрыв описан в гл. 24.)

Спроектировать конструкцию, достаточно устойчивую, чтобы выдержать нагрузки, возникающие при эксплуатации, возможно, но нет смысла из-за количества упругой деформации. Однако проводимые на материалах испытания, когда предел упругости не превышает, имеют очень большое значение. Говорят, что материал, имеющий относительно высокое значение модуля Юнга, имеет и высокое значение *жёсткости*. Жёсткость — это отношение силы к относительному удлинению, то есть F/x .

Из уравнения (1)

$$E = \frac{\text{напряжение}}{\text{линейная деформация}} = \left(\frac{F}{x}\right)\left(\frac{l}{A}\right) = \text{жёсткость} \times \left(\frac{l}{A}\right).$$

Следовательно, когда требуется определить модуль Юнга, необходимо построить график зависимости «напряжение/линейная деформация» или график «нагрузка/удлинение». На практике напряжение зачастую очень мало, а это значит, что очень малые удлинения должны измеряться с высокой степенью точности.

Измерения удлинения материала, а следовательно, и напряжения выполняются в лабораторных условиях с помощью инструмента, называемого *тензометром*. Хотя некоторые тензометры можно использовать в условиях эксплуатации материала, например для крана с нагрузкой, чаще в реальных условиях применяется электрический прибор под названием *датчик деформации*.

Знание о напряжении и линейной деформации лежит в основе обеспечения безопасности и правильного распределения средств при проектировании.

Тензометры

Тензометр — это инструмент для точного измерения очень малых упругих удлинений материала, для того чтобы предсказать его поведение при эксплуатации. Есть несколько вариантов тензометров, среди которых тензометры Линдлея, Гугенберга и Хоунсфильда.

Тензометр Линдлея

Тензометр Линдлея, возможно, самый распространённый тип тензометра, применяемый для измерения деформации растяжения. Это устройство состоит из двух плеч, А и В, соединённых полоской пружинной стали, действующей как шарнир. Испытуемый образец зажимают в точках С и D заточенными шурупами. Расстояние между С и D обычно равно 50 мм. Эти 50 мм получили название «измерительная база». Индикатор с циферблатом помещается между плечами А и В, как показано на **Рис. 26.1**, где изображено типичное устройство тензометра Линдлея.

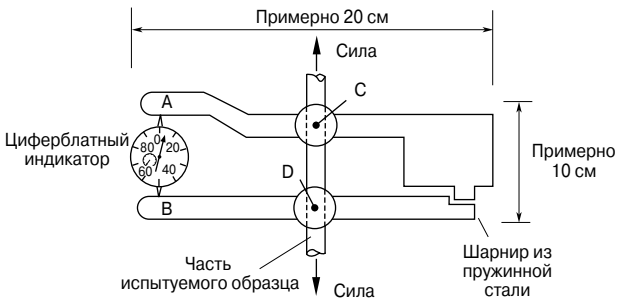


Рис. 26.1

Точка D расположена на полпути между шарниром и индикатором; следовательно, движение стрелки на индикаторе будет показывать удвоенное значение реального удлинения тестируемого образца. Однако индикатор обычно отградуирован так, чтобы его показания соответствовали истинному значению удлинения. Каждое деление характеризует удлинение в 1 микрометр, то есть 10^{-6} м, или 0.001 мм. На тензомере Линдлея удлинение может измеряться с точностью до 0.0001 мм.

Тензомер Гугенберга

Тензомер Гугенберга — простой, износостойкий и точный инструмент, который можно использовать для измерения деформации растяжения или сжатия. В его основе находится увеличивающая рычаг система, способная получать усиление порядка 2 000. На **Рис. 26.2** показано упрощённое устройство прибора (вид спереди).

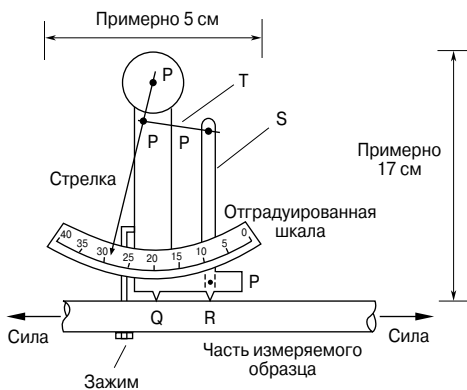


Рис. 26.2

Тензомер Гугенберга прижимают к тестируемому образцу. Q и R — два режущих края, отстоящих друг от друга обычно на 10 или на 20 мм. Любое напряжение, которое испытывает образец, изменит измерительную базу QR. На **Рис. 26.2** показан образец под действием приложенной к нему силы, и, следовательно, длина QR должна увеличиться. Изменение длины передаётся по стержням (обозначенным P) и по рычагам S и T к стрелке, которая покажет на шкале величину удлинения в соответствии с коэффициентом усиления. Поставщик, калибрующий каждое такое устройство после его изготовления, предоставляет этот коэффициент (равный примерно 2 000) потребителю.

Такой тип тензомера позволяет фиксировать удлинения с точностью, сравнимой с точностью тензомера Линдлея, и может использоваться и в лаборатории, и на производстве.

Тензометр Хоунсфильда

Тензометр Гугенберга можно использовать совместно с *тензометром Хоунсфильда*, который представляет собой универсальное переносное измерительное устройство, способное прикладывать силы сжатия или растяжения к металлическим и пластмассовым изделиям, тканям, древесине, бумаге и т. д. или с любым другим измерительным устройством. Тензометр — это точный прибор для измерения удлинения испытуемого образца более чем на 50 мм измерительной базы, когда испытуемый образец подвергается нагрузке в измерительном устройстве. Этот инструмент можно присоединять к образцам круглой формы с диаметром вплоть до 25 мм или к прямоугольным фрагментам материала с площадью сечения вплоть до 25 мм² при измерительной базе 50 мм без предварительной маркировки образца. На **Рис. 26.3** показан типичный тензометр Хоунсфильда с двух точек осмотра.

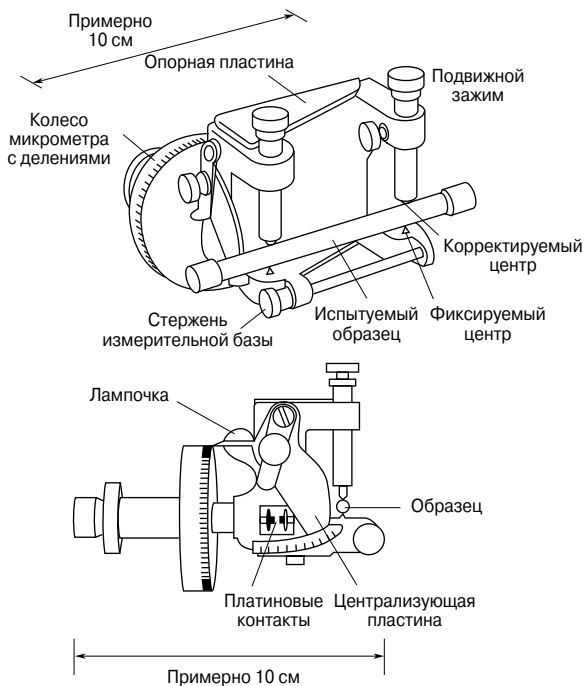


Рис. 26.3

Стержень измерительной базы привернут в определённом положении, обеспечивая расстояние между зафиксированными центрами ровно 50 мм. Затем тензометр прижимают к тестируе-

тому фрагменту, но до того, как отвернуть стержень измерительной базы. Фрагмент по-прежнему остаётся без нагрузки, а микрометр закручивают до тех пор, пока не встретятся платиновые контакты, тем самым замыкая электрическую цепь (о чём свидетельствует загорающаяся лампочка). Затем снимают показания микрометра, и его головку раскручивают. После того как к образцу приложили нагрузку, головка микрометра снова закручивается, и при загорании лампы снимаются новые показания. Разность между двумя показаниями микрометра — это конечное удлинение испытуемого образца при определённой нагрузке. Каждое деление колеса микрометра равно 0.002 мм. Точность тензометра Хоунсфильда сравнима с точностью других тензометров, а преимуществом этого устройства, в определённых обстоятельствах, являются его небольшие габаритные размеры.

Датчики деформации

Датчик деформации — это электрический прибор, используемый для измерения механической деформации, то есть для измерения длины вследствие приложения силы.

Датчик деформации состоит по существу из очень тонкого провода, плотно прикреплённого к той части объекта, где требуется измерить деформацию. Когда в результате натяжения длина провода меняется, возникает изменение его электрического сопротивления, и это изменение сопротивления пропорционально изменению длины провода. Следовательно, когда провод примыкает к части, подверженной деформации, изменение электрического сопротивления провода возникает из-за изменения его длины. Замерив изменение сопротивления, можно определить величину деформации. Впервые датчик деформации был применен в 1939 г. в США и с тех пор получил широкое распространение, особенно в авиастроении. Сейчас он является основой одной из наиболее эффективных методик анализа деформации. Типичный простой датчик деформации показан на **Рис. 26.4**.

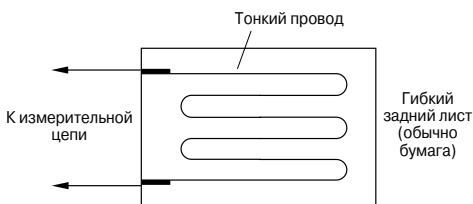


Рис. 26.4

В основе создания современного датчика деформации лежит процесс формирования тонкой фольги резистивного материала с последующим удалением ненужных частей фольги с помощью

процесса фотогравировки, создающей требуемую конфигурацию резистивного элемента. Такой прибор называется *фольговый датчик деформации*, типичное устройство которого показано на **Рис. 26.5**.

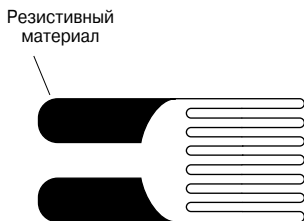


Рис. 26.5

Фольговый датчик деформации имеет ряд преимуществ по сравнению с предыдущими методами. Это:

- лучшее сцепление между проводником и материалом подложки;
- лучший теплоотвод;
- простая и прочная конструкция;
- его легче прикреплять к исследуемому образцу;
- точное воспроизводство показаний;
- возможность уменьшения размеров.

Для того чтобы стрелка гальванометра G отклонилась пропорционально возникшей деформации, датчик должен быть подсоединен к одному плечу мостика сопротивлений, как показано на **Рис. 26.6**.

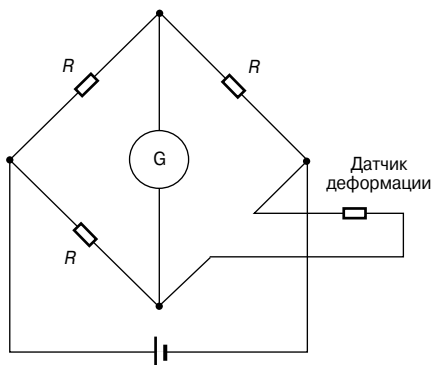


Рис. 26.6

Цепь мостика сопротивлений с двумя одинаковыми сопротивлениями в плечах, имеет нулевое отклонение стрелки гальванометра, но, когда сопротивление одного плеча изменяется,

стрелка гальванометра отклоняется от нулевого положения и величина отклонения характеризует изменение сопротивления. Если в результате приложенной силы в датчике возникает изменение сопротивления, то величина изменения показаний гальванометра и есть величина деформации. Для более точных измерений деформации существует несколько возможных способов усложнения датчика. В этой главе они подробно не описаны, но вот их перечень:

- введение дополнительного датчика, компенсирующего колебания температуры. Он необходим для того, чтобы выход мостика не зависел от температуры, так как температура влияет на собственное сопротивление датчика, и изменение сопротивления может быть ошибочно принято за деформацию материала;
- введение дополнительного мостика, уравнивающего цепь для получения нулевого отклонения на гальванометре при нулевой деформации;
- добавление усилителя для усиления выходного сигнала от мостика в тех случаях, когда уровень деформации такой, что отклонение сопротивления слишком мало, чтобы отразиться на показаниях гальванометра;

Типичные примеры использования датчиков деформации:

- корпус и обшивка самолёта во время полета;
- опоры линий электропередачи, краны, опоры и пролёты мостов новых конструкций, когда информацию о деформациях необходимо проверять для утверждения проекта;
- удалённые участки или жёсткие внешние условия, например, внутри ядерной установки (котла), на лопатках турбин, в двигателях автомобилей, на вертолётных винтах во время полёта, под водой на опорах нефтедобывающих платформ, и в других случаях, когда необходимы данные о степени деформации.

27. КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ И ИМПУЛЬС СИЛЫ

Количество движения (импульс тела)

Количество движения, или *импульс тела*, определяют как произведение его массы и скорости, то есть

$$\text{количество движения} = m\nu,$$

где m — масса [кг],
 ν — скорость [м/с].

Единица количества движения — кг·м/с, или Н·с.

Так как скорость — векторная величина, количество движения также векторная величина, имеющая не только численное значение, но и направление.

Например, количество движения (импульс тела) свабойного молота массой 400 кг, который движется вниз со скоростью 12 м/с, задается как

$$\begin{aligned} \text{количество движения} &= \text{масса} \times \text{скорость} = 400 \text{ кг} \times 12 \text{ м/с} = \\ &= 4\,800 \text{ кг}\cdot\text{м/с}, \text{ направленные вниз.} \end{aligned}$$

Первый закон Ньютона гласит:

|| *Тело остаётся неподвижным или продолжает равномерно и прямолинейно двигаться до тех пор, пока на него не подействует внешняя сила.*

Следовательно, количество движения тела (или его импульс) остается неизменным при условии, что на тело не действуют внешние силы.

Закон сохранения импульса для замкнутой системы (то есть системы, на которую не действуют внешние силы) можно сформулировать так:

|| *Суммарное количество движения замкнутой системы постоянно.*

Суммарное количество движения системы перед столкновением в заданном направлении равно суммарному количеству движения системы после столкновения в том же направлении. На **Рис. 27.1** изображены два тела, массы которых, m_1 и m_2 , движутся в одном направлении со скоростями $u_1 > u_2$.

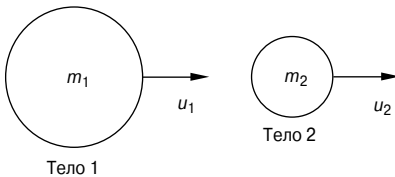


Рис. 27.1

Происходит столкновение, и, применяя принцип сохранения импульса, получаем:

$$\left(\begin{array}{l} \text{суммарное количество} \\ \text{движения перед ударом} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{суммарное количество} \\ \text{движения после удара} \end{array} \right),$$

то есть

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2,$$

где v_1 и v_2 — скорости тела 1 и тела 2 после удара.

Например, вагон массой 10 т движется со скоростью 6 м/с и сталкивается с другим вагоном массой 15 т, стоящим неподвижно. После удара вагоны движутся вместе. Определим их общую скорость после удара.

$$\begin{aligned} \text{Суммарное количество движения перед ударом} &= \\ &= m_1 u_1 + m_2 u_2 = (10\,000 \times 6) + (15\,000 \times 0) = 60\,000 \text{ кг}\cdot\text{м/с}. \end{aligned}$$

Пусть общая скорость вагонов после удара будет v м/с.

Так как суммарное количество движения перед ударом равно суммарному количеству движения после удара, то

$$60\,000 = m_1 v_1 + m_2 v_2 = v(m_1 + m_2) = v(25\,000),$$

откуда

$$v = \frac{60\,000}{25\,000} = 2.4 \text{ м/с},$$

то есть **общая скорость после удара равна 2.4 м/с в направлении, совпадающем с направлением движения вагона массой 10 т до его столкновения.**

Импульс силы и импульсные силы

Второй закон Ньютона в одной из редакций гласит:

|| *Скорость изменения количества движения прямо пропорциональна приложенной силе, приведшей к изменению, и совпадает с направлением этой силы.*

Приложенная сила = скорость изменения количества движения, или

$$\text{приложенная сила} = \frac{\text{изменение импульса}}{\text{затраченное время}}. \quad (1)$$

Когда на тело внезапно начинает действовать сила, в результате столкновения с другим телом или от удара другого тела, например молота, затраченное время в формуле (1) очень мало и его трудно измерить. В таких случаях суммарный эффект силы определяется по произведённому изменению количества движения.

Силы, действующие в течение очень короткого периода времени, называют *импульсными силами*. Произведение импульсной силы и времени, в течение которого она действовала на тело, называют *импульсом силы*.

Импульс силы равен изменению количества движения в результате действия импульсной силы, то есть

$$\begin{aligned} \text{импульс силы} &= \text{приложенная сила} \times \text{время} = \\ &= \text{изменение количества движения.} \end{aligned}$$

(Следует различать *импульс тела*, то есть количество движения, и *импульс силы*, то есть изменение количества движения. — *Прим. редактора перевода.*)

Например, средняя сила прессы, действующая на обрабатываемую деталь во время операции прессования, равна 150 кН, а пресс находится в контакте с деталью в течение 50 мс.

Из вышесказанного известно, что

$$\text{изменение количества движения} = \left(\begin{array}{c} \text{приложенная} \\ \text{сила} \end{array} \right) \times (\text{время}) = \text{импульс силы} .$$

Тогда

$$\begin{aligned} \text{импульс силы детали} &= 150 \times 10^3 \text{ Н} \times 50 \times 10^{-3} \text{ с} = \\ &= 7\,500 \text{ кг}\cdot\text{м/с} \text{ (так как } 1 \text{ Н} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м/с}^2\text{)}. \end{aligned}$$

К случаям, когда возникают импульсные силы, относятся, например, огнестрельное оружие, дающее отдачу, или свободно падающее тело, ударяющееся о землю. Для решения проблемы возникновения сил в таких случаях обычно можно применить уравнение движения: $v^2 = u^2 + 2as$, рассмотренное в гл. 15.

Например, молот свайного копёра массой 1 т до удара по свае преодолевает расстояние 1.5 м. Удар наступает через 25 мс, и молот при этом не отскакивает. Определим силу удара свайного копёра.

Используя уравнение движения

$$v^2 = u^2 + 2gs,$$

получаем

$$v^2 = 0^2 + 2(9.81)(1.5),$$

откуда скорость молота в момент удара,

$$v = \sqrt{(2)(9.81)(1.5)} = 5.425 \text{ м/с} .$$

Пренебрегая малым расстоянием между молотом и сваей после удара, получаем

$$\begin{aligned} & \text{количество движения, потерянного молотом} = \\ & = \text{изменение количества движения} = \\ & = mv = 1\,000 \text{ кг} \times 5.425 \text{ м/с}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{скорость изменения}}{\text{количества движения}} &= \frac{\text{изменение количества движения}}{\text{интервал времени}} = \\ &= \frac{1\,000 \times 5.425}{25 \times 10^{-3}} = 217\,000 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Так как импульсная сила равна скорости изменения количества движения, **среднее значение силы, действующей на сваю, равно 217 кН.**

Когда с помощью молота сваю забивают в почву, почва сопротивляется (противодействует) продвижению сваи, и такое сопротивление называют *силой реакции*.

Третий закон Ньютона можно трактовать так:

|| Сила действия равна силе противодействия.

Сила противодействия, приложенная к свае, — это сила сопротивления земли: свая действует на землю с равной, но противоположно направленной силой.

На практике, когда возникают импульсные силы, энергия сохраняется не полностью, часть её преобразуется в тепло, в шум и в другие физические эффекты.

28. МОМЕНТ СИЛЫ

Пара сил и момент силы

Когда на тело действуют две одинаковые силы, как это показано на **Рис. 28.1**, они заставляют тело поворачиваться, и такая система сил называется *парой сил*.



Рис. 28.1

Момент вращения пары называют *моментом силы M* или *вращающим моментом*. Из показанного на **Рис. 28.1** расположения сил следует что

момент силы = $\left(\begin{array}{l} \text{численное значение} \\ \text{любой из этих сил} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{перпендикуляр} \\ \text{между векторами сил} \end{array} \right)$,

то есть

$$M = Fd$$

Единица момента силы — ньютон-метр [Н·м].

Когда сила, равная F ньютон, прикладывается на расстоянии r метров, предположим, от оси гайки, как показано на **Рис. 28.2**, момент силы M , приложенный к гайке, равен

$$M = Fr \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

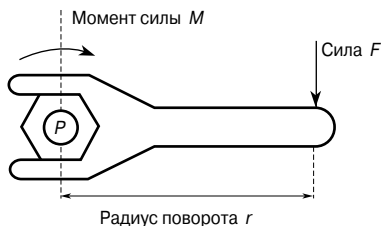


Рис. 28.2

Например, вращающий момент, созданный силой 80 Н и приложенный к ободу приводного ременного шкива диаметром 300 мм, равен

$$M = Fr = (80) \left(\frac{300}{2} \times 10^3 \right) = 12 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Совершённая работа и мощность, передаваемая постоянным моментом силы

На Рис. 28.3а показан приводной ременный шкив, надетый на вал радиусом r метров. Сила, равная F ньютонов, приложена к ободу в точке P .

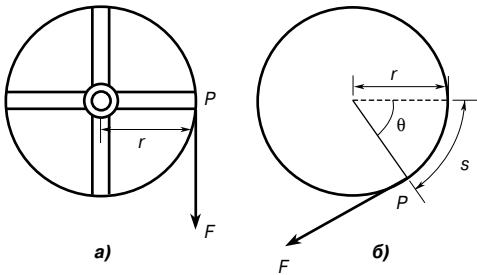


Рис. 28.3

На Рис. 28.3б показан приводной ременный шкив, повернутый на угол θ радиан в результате действия приложенной силы F . Сила действует на расстоянии s (где длина дуги $s = r\theta$).

$$\begin{aligned} \text{Совершённая работа} &= \text{сила} \times \left(\frac{\text{преодоленное}}{\text{силой расстояние}} \right) = \\ &= F \times r\theta = F r\theta \text{ Н}\cdot\text{м} = F r\theta \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Однако Fr — это момент силы M , следовательно,

$$\boxed{\text{совершённая работа} = M\theta \text{ Дж}}$$

Для постоянного момента силы M

$$\text{средняя мощность} = \left(\frac{\text{совершённая работа}}{\text{затраченное время}} \right) = \frac{M\theta}{t},$$

однако

$$\frac{\theta}{t} = \omega \text{ рад/с (угловая скорость)},$$

и, следовательно, мощность равна

$$\boxed{P = M\omega \text{ Вт}}$$

Угловая скорость, $\omega = 2\pi n$ рад/с, где n — скорость [об/с]. Поэтому

$$\boxed{P = 2\pi n M \text{ Вт}}$$

Например, определим момент силы, создаваемый мотором, ось которого вращается со скоростью 1 000 об/мин и развивает мощность 2.50 кВт. Мощность

$$P = 2\pi nM,$$

откуда момент силы

$$\begin{aligned} M &= \frac{P}{2\pi n} \text{ Н}\cdot\text{м} = \\ &= \frac{2\,500}{2\pi\left(\frac{1\,000}{60}\right)} = \frac{2\,500 \times 60}{2\pi \times 1\,000} = \mathbf{23.87 \text{ Н}\cdot\text{м}}. \end{aligned}$$

Выше было показано, что совершённая работа равна $M\theta$, и, если эта работа увеличит кинетическую энергию вращающегося тела с моментом инерции I , тогда

$$M\theta = I\left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}\right),$$

где ω_1 и ω_2 — начальная и конечная скорости, то есть

$$M\theta = I\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}\right)(\omega_2 - \omega_1).$$

Однако $\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}\right)$ — средняя угловая скорость, то есть $\frac{\theta}{t}$,

где t — время,

$(\omega_2 - \omega_1)$ — изменение угловой скорости (то есть αt , где α — угловое ускорение).

Тогда

$$M\theta = I\left(\frac{\theta}{t}\right)(\alpha t),$$

откуда **момент силы**

$$\boxed{M = I\alpha},$$

где I — момент инерции [$\text{кг}\cdot\text{м}^2$],

α — угловое ускорение [$\text{рад}/\text{с}^2$],

M — момент силы [$\text{Н}\cdot\text{м}$].

Например, если момент инерции системы валов равен $37.5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, то **момент силы**, необходимый для придания ей углового ускорения $5.0 \text{ рад}/\text{с}^2$, равен

$$M = I\alpha = (37.5)(5.0) = \mathbf{187.5 \text{ Н}\cdot\text{м}}.$$

Передача мощности с помощью ременного привода

Самый простой способ *передачи мощности* от одного вала к другому реализуется с помощью *ремня*, натянутого поверх обода шкивов, надетых на валы, как показано на **Рис. 28.4**.

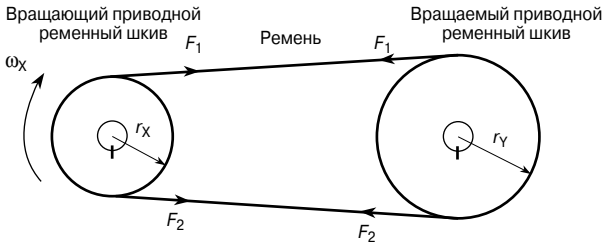


Рис. 28.4

Такие системы обычно применяют в электромоторах, приводящих в движение токарные станки или дрели, и в двигателях, работающих с насосом или генератором.

Чтобы ремень передавал энергию от одного шкива к другому, должна существовать разность натяжения ремня либо со стороны вращающегося шкива, либо со стороны раскручиваемого.

Рассмотрим случай, когда $F_2 > F_1$ (**Рис. 28.4**).

Момент силы M , требуемый для выполнения работы вращающим колесом, равен

$$M = (F_2 - F_1)r_x \text{ Н} \cdot \text{м}$$

а требуемая мощность P равна

$$P = M\omega = (F_2 - F_1)r_x\omega_x \text{ Вт}$$

Как показано в гл. 15, линейная скорость точки на ведущем колесе

$$v_x = r_x \omega_x.$$

Подобным образом линейная скорость точки на ведомом колесе равна

$$v_y = r_y \omega_y.$$

Полагая, что скольжение отсутствует, имеем

$$v_x = v_y, \text{ или } r_x \omega_x = r_y \omega_y, \text{ или } r_x (2\pi n_x) = r_y (2\pi n_y).$$

Откуда

$$\frac{r_x}{r_y} = \frac{n_x}{n_y}$$

$$\begin{aligned} \text{Коэффициент полезного действия (в процентах)} &= \\ &= \left(\frac{\text{полезная работа на выходе}}{\text{энергия на входе}} \right) \times 100, \end{aligned}$$

или

$\begin{aligned} \text{коэффициент} \\ \text{полезного действия} \end{aligned} = \left(\frac{\text{выходная мощность}}{\text{входная мощность}} \right) \times 100\%.$

Например, определим коэффициент полезного действия мотора мощностью 15 кВт, с помощью приводных ременных шкивов вращающего вал со скоростью 1 150 об/мин. Натяжение ремня на каждой из сторон ведущего колеса (то есть прикладываемая сила) равно 400 Н и 50 Н. Диаметр этого колеса равен 500 мм, а вращаемого колеса — 750 мм.

Выходная мощность мотора равна

$$\begin{aligned} \text{выходная мощность} &= (F_2 - F_1)r_x \omega_x = \\ &= (400 - 50) \left(\frac{500}{2} \times 10^{-3} \right) \left(\frac{1\,150 \times 2\pi}{60} \right) = \\ &= 10.54 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \text{коэффициент полезного действия} \\ \text{мотора} \end{aligned} &= \frac{\text{выходная мощность}}{\text{входная мощность}} = \\ &= \frac{10.54}{15} \times 100 = \mathbf{70.27\%}. \end{aligned}$$

Скорость вращаемого шкива находим из соотношения

$$\frac{r_x}{r_y} = \frac{n_x}{n_y},$$

откуда **скорость вращаемого приводного ременного шкива**

$$n_y = \frac{n_x r_x}{r_y} = \frac{1\,150 \times 0.25}{\frac{0.750}{2}} = \mathbf{767 \text{ об/мин.}}$$

Плоские и V-образные ремни

Отношение натяжений плоского ремня, когда он находится в точке касания, равно

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu\theta},$$

где μ — коэффициент трения между ремнем и шкивом,
 θ — угол поворота в радианах (см. **Рис. 28.5**),
 $e \approx 2.718$ (основание натуральных логарифмов).

Для V-образного ремня, показанного на **Рис. 28.6**, отношение натяжений равно

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\frac{\mu\theta}{\sin\alpha}},$$

где α — половина угла паза, в котором размещён ремень.

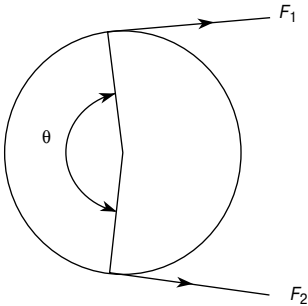


Рис. 28.5

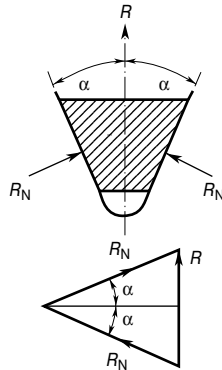


Рис. 28.6

Это отношение существенно больше, чем отношение для случая плоского ремня. V-образный ремень вдавлен в паз, поэтому вероятность его скольжения меньше. Из **Рис. 28.6** видно, что сила трения на каждой стороне ремня равна μR_N , где R_N — нормаль (перпендикуляр) силы реакции на каждой стороне. Из треугольника сил видно, что

$$R_N = \frac{R}{2 \sin\alpha},$$

где R — равнодействующая сил реакции.

Сила трения, усиливающая разницу между M_1 и M_2 , равна, следовательно,

$$\mu R_N = \left(\frac{\mu}{2 \sin\alpha} \right) R.$$

Соответствующая сила трения для плоского ремня равна μR . Сравнивая силу трения для плоского и V-образного ремня, можно сказать, что V-образный ремень является альтернативой плоскому ремню с коэффициентом трения равным $\frac{\mu}{2 \sin\alpha}$.

Равнодействующая сила, действующая на ремень со стороны вращающего шкива или на ремень вращаемого шкива, равна

$F_1 - F_2$. Следовательно, передаваемая ремнем мощность равна $(F_1 - F_2)v$, где v — скорость ремня. Если $(F_1 - F_2)$ измеряется в ньютонах, а v — в метрах в секунду, то единица мощности — Н·м/с, то есть ватты [Вт].

Скорость ремня задается в м/с (так как $v = \omega r$), где ω — угловая скорость шкива [рад/с], а r — его радиус [м].

Напомним, что угловая скорость [рад/с] — это

$$\omega = \frac{2\pi N}{60},$$

где N — скорость шкива [об/мин].

Следует заметить, что

- скольжение в первую очередь проявится на шкиве с меньшим углом оборота;
- на практике, чтобы избежать скольжения, необходимо регулярно проводить профилактику.

Например, шкив, скорость которого равна 1 920 об/мин, имеет V-образные пазы для обеспечения работы шести ремней, которым необходимо передать 125 кВт от этого шкива. Угол пазов составляет 45° , угол поворота равен 175° , а эффективный диаметр шкива равен 265 мм. Если коэффициент трения равен 0.32, минимальное из возможных значений натяжения на ведущей части каждого ремня подсчитывается следующим образом:

передаваемая шестью ремнями мощность равна $6(F_1 - F_2)v$,

где F_1 и F_2 — натяжения соответственно на ведущей и ведомой части каждого из ремней,

$v (= r\omega)$ — скорость ремня,

то есть

$$125\,000 = 6(F_1 - F_2) \left(\frac{1\,920 \times 2\pi}{60} \right) \left(\frac{0.265}{2} \right)$$

и

$$(F_1 - F_2) = \frac{125\,000 \text{ Вт}}{6 \times \frac{1\,920 \times 2\pi}{60} \text{ рад/с} \times 0.1325 \text{ м/с}} = 782.01 \text{ Н.}$$

Натяжение F_1 имеет самое меньшее из возможных значений, когда ремни находятся в точке скольжения. При таком условии

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\frac{\mu\theta}{\sin\alpha}} = e^{\frac{(0.32) \left(\frac{175\pi}{180} \right)}{\sin 25.5^\circ}} = 12.859,$$

то есть $F_1 = 12.859 F_2$,

откуда

$$F_2 = \frac{F_1}{12.859} .$$

Тогда

$$F_1 - F_2 = F_1 \left(1 - \frac{1}{12.859} \right) = 0.92223 F_1 .$$

Тогда величина $F_1 - F_2$ равна 782.01 Н.

Самое меньшее из возможных значений для F_1 равно

$$\frac{782.01}{0.92223} = \mathbf{848.0 \text{ Н}} .$$

29. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ

Теплота и температура

Теплота — это одна из многих форм энергии, измеряемой в джоулях.

Температура — это степень нагрева или охлаждения вещества. Следовательно, теплота и температура — разные величины. Например, для того, чтобы вскипятить полную ёмкость воды, нужно в 2 раза больше тепловой энергии, чем для половины ёмкости. То есть в случае одинакового вещества, но разного объёма для создания одинаковой температуры этого вещества необходимо затратить разное количество энергии.

Температуру можно измерить либо по *шкале Цельсия* (единица — *градус Цельсия* [$^{\circ}\text{C}$]), где температура таяния льда, то есть точка замерзания воды, считается 0°C , а точка кипения воды при нормальном атмосферном давлении равна 100°C , либо по *термодинамической шкале температур*, где единицей измерения служит *кельвин* [K]. Термодинамическую шкалу температур именуют также *абсолютной шкалой температур* или *шкалой Кельвина*. В системе температур Кельвина соблюдается тот же температурный интервал, как и в системе температур Цельсия, но за ноль принимается «абсолютный ноль», то есть -273°C .

Отсюда

температура по Кельвину = температура по Цельсию + 273,

то есть

$$\boxed{K = (^{\circ}\text{C}) + 273}$$

Например,

- $0^{\circ}\text{C} = 273 \text{ K}$;
- $25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$;
- $100^{\circ}\text{C} = 373 \text{ K}$.

Температура — единственная физическая величина, имеющая два обозначения (T — для кельвинов и t — для градусов Цельсия). Если оба обозначения встречаются в одном уравнении, то сокращать их нельзя.

Измерение температуры

Прибором для измерения температуры служит *термометр*. Любое вещество, обладающее одним или более свойствами, изменяющимися с температурой, можно использовать для измерения температуры. К таким свойствам относятся изменения длины, площади или объёма, электрического сопротивления

или цвета. В качестве примеров приборов, измеряющих температуру, можно привести:

- *стеклянный жидкостный термометр*, который использует свойство жидкости расширяться с увеличением температуры;
- *термопары*, учитывающие возникающую ЭДС при нагреве соединения двух разнородных металлов;
- *резистивный термометр*, учитывающий изменение электрического сопротивления, вызванного изменением температуры;
- *пирометры* — приборы для измерения очень высоких температур, использующие то обстоятельство, что все вещества при нагреве испускают лучистую энергию и что сила излучения зависит от температуры.

Каждый из этих измерительных приборов, а также и некоторые другие описаны в гл. 31.

Удельная теплоёмкость

Удельная теплоёмкость вещества — это количество тепловой энергии, необходимое для того, чтобы повысить температуру одного килограмма этого вещества на один градус.

Удельная теплоёмкость обозначается символом c и измеряется в Дж/(кг·°C) или Дж/(кг·К). (Заметим, что эти единицы могут также записываться как Дж·кг⁻¹·°C⁻¹ или как Дж·кг⁻¹·К⁻¹.)

Некоторые типичные значения удельной теплоёмкости в диапазоне температур от 0 до 100°C приведены в таблице.

Вода	4 190 Дж/(кг·°C)	Лёд	2 100 Дж/(кг·°C)
Алюминий	950 Дж/(кг·°C)	Медь	390 Дж/(кг·°C)
Железо	500 Дж/(кг·°C)	Свинец	130 Дж/(кг·°C)

Следовательно,

чтобы повысить температуру 1 кг железа на 1°C, требуется затратить 500 Дж;

чтобы повысить температуру 5 кг железа на 1°C, требуется (500 × 5) Дж;

чтобы повысить температуру 5 кг железа на 40°C, требуется (500 × 5 × 40) Дж, то есть 100 кДж.

В общем случае количество тепла Q , необходимое для повышения температуры тела массой m кг, с удельной теплоёмкостью c Дж/(кг·°C), от температуры t_1 до температуры t_2 , вычисляется по формуле

$$Q = mc(t_2 - t_1) \text{ Дж}$$

Например, определим количество тепла, необходимого для повышения температуры воды массой 5 кг от 0 до 100°C, учитывая, что удельная теплоемкость воды равна 4 200 Дж/(кг·°C).

$$\begin{aligned} \text{Количество тепловой энергии } Q &= mc(t_2 - t_1) = \\ &= 5 \text{ кг} \times 4\,200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}) \times (100 - 0)^\circ\text{C} = \\ &= 5 \times 4\,200 \times 100 = \\ &= \mathbf{2\,100\,000 \text{ Дж}}, \text{ или } \mathbf{2\,100 \text{ кДж}}, \text{ или } \mathbf{2.1 \text{ МДж}}. \end{aligned}$$

Изменение состояния

Вещество может находиться в одном из трех состояний — твёрдом, жидком или газообразном. Если к куску льда, начальная температура которого была, например, -30°C , с постоянной скоростью поступает тепло, то его температура будет расти так, как показано на **Рис. 29.1**.

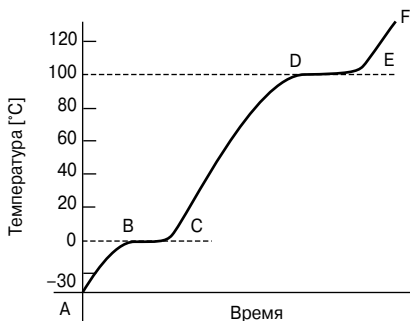


Рис. 29.1

Сначала температура растёт от -30 до 0°C , что отражает прямая АВ. Затем некоторое время она остается постоянной и равной 0°C , — ровно столько, сколько необходимо для того, чтобы весь лёд превратился в воду. Это отражено на участке ВС графика.

Когда лёд начинает таять, энергия, полученная от непрерывающегося нагрева, компенсируется энергией, необходимой для изменения состояния вещества, и поэтому температура остается постоянной, несмотря на то, что нагрев продолжается. Когда лёд полностью превратился в воду, продолжающийся нагрев поднимает температуру до 100°C , как это видно на участке CD графика. Затем при 100°C вода начинает кипеть, и температура снова перестает расти, до тех пор, пока вся вода не испарится, что отражает участок DE.

Дальнейшее нагревание поднимает температуру пара, как видно на отрезке EF; в этой области пар называют *перегретым*.

Переходы из твёрдого состояния в жидкое или из жидкого в газообразное происходят без изменения температуры, и эти про-

цессы обратимые. Когда тепловая энергия «перетекает» в вещество или из него, вызывая изменение температуры, как, например, на участках АВ, CD и EF на **Рис. 29.1**, то её называют *физической теплотой* (так как изменение можно заметить с помощью термометра).

Тепловую энергию, «перетекающую» в вещество или из него в период, когда температура его постоянна, как, например, на участках BC и DE на **Рис. 29.1**, называют *скрытой теплотой* (так как термометр не показывает увеличение или уменьшение количества теплоты).

Скрытая теплота плавления и парообразования

Удельная *скрытая теплота плавления* — это теплота, необходимая для того, чтобы вещество массой 1 кг перешло из твёрдого состояния в жидкое (или наоборот) при постоянной температуре.

Удельная *скрытая теплота парообразования* — это теплота, необходимая для того, чтобы вещество массой 1 кг перешло из жидкого состояния в газообразное (или наоборот) при постоянной температуре.

Единицей удельной скрытой теплоты плавления и парообразования является Дж/кг, но на практике значительно чаще применяют кДж/кг. Некоторые типичные значения этой величины для различных материалов даны в **Табл. 29.1**.

Таблица 29.1

Материал	Скрытая теплота плавления [кДж/кг]	Точка плавления [°C]
Ртуть	11.8	-39
Свинец	22	327
Серебро	100	957
Лёд	335	0
Алюминий	387	660
Материал	Скрытая теплота испарения [кДж/кг]	Точка кипения [°C]
Кислород	214	-183
Ртуть	286	357
Этиловый спирт	857	79
Вода	2 257	100

Количество теплоты Q , поступающей к веществу или исходящей от него во время изменения состояния, равно

$$Q = mL$$

где m — масса, измеряемая в килограммах,
 L — удельная скрытая теплота.

Например, теплота, необходимая для преобразования 10 кг льда при 0°C в воду при той же температуре, вычисляется как

$$10 \text{ кг} \times 335 \text{ кДж/кг} = 3\,350 \text{ кДж, или } 3.35 \text{ МДж.}$$

Кроме изменения температуры в результате поступления теплоты к веществу, может происходить изменение размеров, а также изменение цвета, состояния и электрического сопротивления. В большинстве случаев вещества расширяются при нагреве и сжимаются при охлаждении, и эти термоэффекты находят множество практических применений (см. гл. 30).

Принцип работы простейшего холодильника

Температура кипения большинства жидкостей может быть понижена, если понизить давление. В *холодильнике* рабочая жидкость (аммиак или фреон) имеет давление, работающее на её снижение. В результате температура кипения понижается, что вызывает испарение жидкости. При испарении жидкость «вбирает» необходимую скрытую теплоту из окружающего пространства, то есть из холодильника, где становится холоднее. Пар тут же удаляется с помощью насоса в конденсатор, находящийся за пределами емкости. Там он сжимается и вновь превращается в жидкость, выделяя скрытую теплоту, и цикл повторяется, когда жидкость закачивается обратно в холодильник, чтобы там вновь испариться.

Проводимость, конвекция и излучение

Теплоту можно передавать от горячего тела к холодному одному или несколькими из следующих трёх путей: *теплопроводностью, конвекцией и излучением*.

Теплопроводность

Теплопроводность — это способность передачи тепловой энергии от одной части тела к другой (или от одного тела к другому) без передвижения частиц тела.

Теплопроводность связана с твёрдыми телами. Например, если один конец металлического стержня нагреть, то другой его конец станет горячим благодаря теплопроводности. Металлы и сплавы металлов — хорошие проводники тепла, а воздух, древесина, пробка, стекло и газы считаются плохими проводниками, то есть они являются изоляторами тепла.

Практическое применение теплопроводности

Существует множество примеров использования свойств веществ передавать тепло. Ниже приведены лишь два наглядных примера использования теплопроводности.

- Обычная сковорода или тарелка проводят тепло от источника к их содержимому. Так как древесина и пластик плохо проводят тепло, то из них делают ручки для сковород.
- Металл радиатора системы центрального отопления передаёт тепло от горячей воды, находящейся в трубах, во внешнюю среду.

Конвекция

Конвекция — это передача тепловой энергии через вещество непосредственным перемещением самого вещества. Конвекция возникает в жидкостях и газах, но не в твердых телах. При нагревании жидкость (или газ) становится менее плотной. Нагретая порция жидкости (или газа) поднимается, и на её место приходит новая, более холодная, и процесс повторяется. Например, горячая вода в электрических чайниках или в отопительных батареях всегда поднимается вверх.

Примеры конвекции

Примеры конвекции можно найти в окружающей нас природе. Её широко используют во многих технических устройствах.

- Конвекционные потоки воздуха перемещаются в атмосфере, формируя погоду на планете.
- Системы отопления, основанные на естественной циркуляции горячей воды: благодаря конвекции горячая вода поднимается на верхние этажи дома, а затем спускается вниз. Тем самым высвобождается тепло, которым обогревается дом.
- Радиатор нагревает воздух вокруг себя; благодаря конвекции нагретый воздух поднимается вверх, а холодный опускается вниз на его место.
- На принципе конвекции основана система охлаждения автомобиля.
- Большие электрические трансформаторы рассеивают излишки тепла в масляном баке. Благодаря конвекции нагретое масло поднимается вверх, затем проходит через охлаждающие ребра и, остывнув, опускается.
- В холодильнике охлаждающий блок находится в верхней части камеры. Воздух вокруг холодных труб утяжеляется при сжатии и опускается вниз. Более теплый и менее плотный воздух выталкивается вверх на место остывшего. Таким образом, создается холодный конвекционный поток.

Излучение

Излучение — это передача тепловой энергии от горячего тела к более холодному посредством электромагнитных волн. Тепловое излучение по физической природе сходно со световыми волнами (см. гл. 19) — оно распространяется с такой же скоростью и может проходить через вакуум, — различие заключено

лишь в частотах волн. Волны, излучаемые нагретым телом, передаются в пространстве (даже в вакууме), и их невозможно засечь, пока они не достигнут другого тела. Излучение отражается от сверкающих, отполированных поверхностей и поглощается тусклыми, черными поверхностями.

Примеры теплового излучения

- Солнечное тепло, дошедшее до Земли.
- Тепло, идущее от огня.
- Сушильный шкаф в кухонной плите.
- Промышленные печи.
- Инфракрасные батареи.

Вакуумный термос

На **Рис. 29.2** показан вакуумный термос в разрезе.

Как видно, это ёмкость с двойными стенками, между которыми находится вакуум. Всё это заключено в защитный внешний корпус.



Рис. 29.2

Из-за наличия вакуума и натуральной пробки потеря тепла из-за конвекции очень мала (пробка — плохой проводник тепла). Вакуум также предотвращает потерю тепла из-за конвекции. Излучение же сведено к минимуму благодаря посеребрённым стеклянным внутренним поверхностям колбы (блестящие поверхности отражают излучение).

Следовательно, вакуумный термос — это хороший пример предотвращения всех трёх видов передачи тепла, благодаря чему термос может сохранять горячие жидкости горячими, а холодные — холодными.

Применение изоляции для сохранения тепла в помещениях

Топливо, используемое для обогрева зданий, становится всё более дорогостоящим. Правильное применение изоляции помогает удерживать тепло в зданиях на более длительный период, уменьшая тем самым стоимость отопления.

- Так как конвекция заставляет горячий воздух подниматься, очень важно обеспечить изоляцию крыши, которая, вероятно, является основным источником потерь тепла в доме. Этого можно добиться, положив стекловолокно между деревянными балками, поддерживающими крышу.
- Стекло — плохой проводник тепла, однако тонкое оконное стекло может явиться причиной больших тепловых потерь. Такие потери можно сократить двойным остеклением, для чего используют два стеклянных листа, между которыми находится воздух. Воздух — хороший изолятор, однако воздушная прослойка не должна быть слишком большой, иначе между стёклами могут возникнуть конвекционные потоки, снижающие теплосберегающие эффекты.
- Баки с горячей водой следует утеплять снаружи, чтобы предотвратить потери из-за проводимости и конвекции тепла в окружающее воздушное пространство.
- Кирпич, бетон, штукатурка и древесина — всё это плохие проводники тепла. Тем не менее для надёжной теплоизоляции стены дома должны быть двойными, с воздушной прослойкой между ними. Воздух также плохой проводник, и поэтому такая прослойка минимизирует тепловые потери через стены. Однако даже таких потерь можно избежать практически полностью, если заполнять пространство между стенами изоляционной пеной.

Изменение температуры и соответствующее влияние поступающего к материалу тепла могут сказаться на размерах, а также на цвете, состоянии и электрическом сопротивлении этого материала.

За небольшим исключением, вещества расширяются при нагревании и сжимаются при охлаждении. Существует множество вариантов практического применения термоэффектов, о чём речь пойдёт в следующей главе.

30. ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ

При воздействии тепла объём большинства веществ увеличивается во всех направлениях. И обратно: если тепловая энергия не поступает к веществу (то есть оно остывает), происходит его сжатие во всех направлениях. Эффекты расширения и сжатия веществ зависят от изменения температуры и проявляются для каждого вещества по-своему.

Практическое применение термического расширения

Ниже приведены некоторые примеры из практики, когда необходимо учитывать расширение и сжатие твердых материалов.

- Провода линий электропередачи закрепляют так, чтобы они немного провисали в летний период, иначе из-за сжатия зимой они могут разорваться или повалить несущие опоры.
- Между железнодорожными рельсами необходимо оставлять зазоры, чтобы предотвратить их выгибание в жаркую погоду (исключая случаи, когда они образуют монолитный путь на всём протяжении линии).
- Концы больших мостов зачастую устанавливают на роликах, чтобы мосты имели возможность свободно расширяться и сжиматься.
- Металлические втулки или стальные шины перед установкой нагревают, чтобы расширить, устанавливают на вал или на колесо соответственно, а потом охлаждают, чтобы при сжатии они плотно встали на место; такой приём называют «посадкой». Похожим способом используют нагретые заклёпки для связки металлических листов.
- Все материалы расширяются по-разному. На **Рис. 30.1а** показана биметаллическая полоска при комнатной температуре (то есть две металлические полоски из различного материала склепаны вместе).

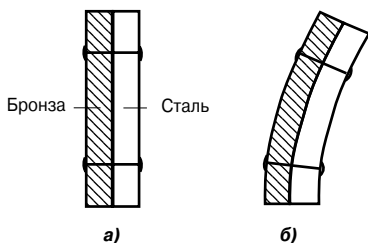


Рис. 30.1

При нагревании бронза расширяется в большей степени, чем сталь, а так как металлы объединены, биметаллическая полоска «вынуждена» изогнуться, как показано на **Рис. 30.16**. Такое поведение металла можно использовать для замыкания или размыкания электрической цепи. Биметаллические полоски особенно часто используют в термостатах (переключатели, действующие при изменении температуры) для управления центральными системами отопления, нагревателями, холодильниками, тостерами, утюгами, системами нагрева воды и для включения сигнализации.

- Поршень в двигателях внутреннего сгорания приводится в действие благодаря быстрому расширению нагретого газа.
- Проектировщики обязаны предвидеть и учесть расширение заводских стальных труб, выводящих горячий пар, чтобы предотвратить ущерб и избежать риска для здоровья окружающих.

Расширение и сжатие воды и других жидкостей

Вода — жидкость, которой при низких температурах свойственно необычное поведение. При охлаждении сжатие продолжается до температуры примерно $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда объём становится минимальным. При дальнейшем понижении температуры от $+4$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вода расширяется, то есть её объём увеличивается. После образования льда его расширение продолжается, что зачастую приводит к разрыву труб с замерзшей водой.

Расширение жидкости находит применение в термометрах, где расширение таких веществ, как ртуть или спирт, используют для измерения температуры.

Коэффициент линейного расширения

Величину, на которую расширяется единица длины материала при росте температуры на один градус, называют *коэффициентом линейного расширения* материала и обозначают греческой буквой α (альфа).

Коэффициент линейного расширения измеряют в $\text{м}/(\text{м}\cdot\text{К})$, хотя такую запись часто сокращают до $1/\text{К}$ или К^{-1} .

Например, коэффициент линейного расширения меди равен $17 \times 10^{-6}\text{ К}^{-1}$. Это означает, что 1 м медного стержня увеличивается на 0.000017 м, если его температура увеличивается на 1 К (или 1°C).

Если медный стержень длиной 6 м нагреть на 25 К, то стержень удлинится на $(6 \times 0.000017 \times 25)$ м, то есть 0.00255 м или 2.55 мм. (Так как шкала Кельвина использует тот же температурный интервал, что и шкала Цельсия, изменение температуры, допустим, на 50°C равно изменению температуры на 50 К.)

Если начальная длина материал равна l_1 при температуре t_1 , а коэффициент линейного расширения α , то с ростом температуры до значения t_2 его длина l_2 станет равной

$$l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1)$$

Ниже приведены значения коэффициента линейного расширения для некоторых материалов.

Алюминий	$23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Латунь	$18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Бетон	$12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Медь	$17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Золото	$14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Инвар (сплав никель-сталь)	$0.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Железо	$(11 \dots 12) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		
Сталь	$(15 \dots 16) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Нейлон	$100 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Цинк	$31 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Вольфрам	$4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Например, длина медных труб в бойлере равна 4.20 м при температуре 20°C. Если их окружить только питьевой водой, температура которой 10°C, то длина труб l_2 , составит

$$l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] = 4.20 [1 + (17 \times 10^{-6})(10 - 20)] = \\ = 4.20[1 - 0.00017] = \mathbf{4.1993 \text{ м}},$$

то есть при уменьшении температуры от 20 до 10°C **труба сожмётся на 0.7 мм.**

Когда бойлер находится в работе, средняя температура труб составляет, допустим, 320°C, тогда длина труб l_2 окажется равной

$$l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] = 4.20 [1 + (17 \times 10^{-6})(320 - 20)] = \\ = 4.20[1 + 0.0051] = \mathbf{4.2214 \text{ м}},$$

то есть с ростом температуры от 20 до 320°C **труба удлинится на 21.4 мм.**

Коэффициент поверхностного расширения

Величину, на которую увеличивается единица площади материала при росте температуры на один градус, называют *коэффициентом поверхностного расширения* (то есть коэффициент увеличения площади) и обозначают греческой буквой β (бета).

Если при начальной температуре t_1 материал имеет площадь A_1 и его коэффициент поверхностного расширения равен β , то при повышении температуры до t_2 увеличившаяся площадь материала A_2 составит

$$A_2 = A_1[1 + \beta(t_2 - t_1)] \quad (2)$$

Можно показать, что коэффициент поверхностного расширения в 2 раза больше коэффициента линейного расширения, то есть $\beta = 2\alpha$, с очень хорошей точностью.

Коэффициент объёмного расширения

Величину, на которую увеличивается единица объёма вещества при росте температуры на один градус, называют *коэффициентом объёмного расширения* и обозначают греческой буквой γ (гамма).

Если при начальной температуре t_1 вещество имеет объём V_1 и его коэффициент объёмного расширения равен γ , то с ростом температуры до t_2 увеличившийся объём V_2 составит

$$V_2 = V_1[1 + \gamma(t_2 - t_1)] \quad (3)$$

Можно показать, что коэффициент объёмного расширения в 3 раза больше коэффициента линейного расширения, то есть $\gamma = 3\alpha$, с очень близким приближением.

Жидкость не обладает определённой формой, поэтому необходимо учитывать только её объёмное расширение. Следовательно, при расширении жидкостей используют уравнение (3).

Ниже приведены некоторые типичные значения коэффициента объёмного расширения при 20°C (то есть 293 K).

Этиловый спирт	$1.1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	Ртуть	$1.82 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Парафиновое масло	$9.0 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$	Вода	$2.10 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

Коэффициент объёмного расширения γ — это постоянная величина свыше заданного диапазона температур.

Например, ртуть в термометре имеет объём 476 мм^3 при 15°C . Найдём, при какой температуре объём этой ртути увеличится до 478 мм^3 .

Из уравнения (3) конечный объём $V_2 = V_1[1 + \gamma(t_2 - t_1)]$.

Откуда

$$(t_2 - t_1) = \frac{V_2 - V_1}{V_1 \gamma} = \frac{478 - 476}{(476)(1.82 \times 10^{-1})} = 23.09^\circ\text{C}.$$

Следовательно, $t_2 = 23.09 + 15 = 38.09^\circ\text{C}$.

Таким образом, температура, при которой объём ртути достигнет 478 мм^3 , равна **38.09°C** .

31. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Изменение температуры вещества может зачастую привести к изменению одного или нескольких физических свойств данного вещества. Следовательно, хотя температуру нельзя измерить непосредственно, можно измерить сопутствующие ей эффекты. Для определения температурных изменений используют такие свойства веществ, как изменение размеров, электрического сопротивления, состояния, типа и величины излучения, а также цвета.

Существует множество типов приборов, измеряющих температуру. Те, что рассмотрены в следующих параграфах, наиболее часто применяются в науке и промышленности.

Стеклянный жидкостный термометр

Принцип действия стеклянного жидкостного термометра состоит в использовании свойства жидкости расширяться с ростом температуры.

Устройство

Типичный стеклянный жидкостный термометр показан на Рис. 31.1.

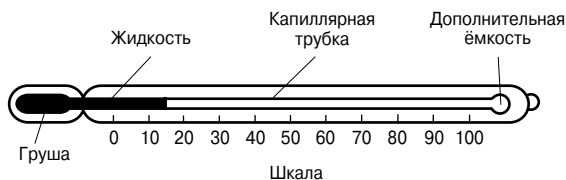


Рис. 31.1

Термометр этого типа состоит из запаянной однородной стеклянной трубки малого диаметра, называемой *капиллярной трубкой*, на одном конце которой образовано стеклянное утолщение в форме груши. Груша и часть капилляра заполнены жидкостью, например ртутью или спиртом, а в остальной части трубки — вакуум. На внешней стороне трубки нанесена градуировка, которая и является измерительной шкалой. Обычно предусмотрена дополнительная емкость, чтобы в случае превышения максимальной отметки на шкале жидкость имела бы возможность расширяться, так как в противном случае трубка может лопнуть.

Принцип действия

Работа стеклянного жидкостного термометра зависит от расширения жидкости с ростом температуры и от ее сжатия — с падением температуры. Там, где заканчивается столбик жидкости в трубке, фиксируется значение температуры жидкости в груше (на **Рис. 31.1** это 15°C , что примерно соответствует комнатной температуре).

Для калибровки термометра необходимо выбрать два значения температуры, между которыми следует проставить «градусы». В первом термометре, изготовленном Цельсием, выбранными значениями (реперными точками) были точка таяния льда (0°C) и точка кипения воды при обычном атмосферном давлении ($+100^{\circ}\text{C}$). В каждой из точек на чистом стержне отмечались уровни жидкости. Расстояние между этими двумя точками, называемое *основным интервалом*, было поделено на 100 равных частей, каждую из которых приравнивали 1°C . Так была получена шкала Цельсия.

Медицинский термометр (размеченный с учётом диапазона изменения температуры живого организма); *термометр максимума и/или минимума* (фиксирующий максимальную дневную и минимальную ночную температуру); *термометр Бекмана* (применяемый только для точных измерений температурных изменений и не имеющий фиксированного диапазона) — всё это определенные виды стеклянного жидкостного термометра, работающие по единому принципу.

Преимущества

Стеклянный жидкостный термометр прост в устройстве и в применении, портативен и относительно дешёв. Он представляет наиболее широко используемый метод измерения температуры и применяется в промышленности, медицине, в химических лабораториях и в метеорологии.

Недостатки

Стеклянные жидкостные термометры, как правило, хрупки и, следовательно, легко бьются. Они имеют узкую специализацию (используются только в заданном диапазоне температур); их нельзя применять для измерения температуры поверхностей; их показания нельзя считывать на расстоянии, и, наконец, они не пригодны для измерения высоких температур.

Достоинства и недостатки ртути и спирта

Использование ртути в термометре имеет много преимуществ:

- ее хорошо видно;
- она обладает относительно однородным темпом расширения;
- ее легко получить в чистом виде;

- она не смачивает стекло;
- она хороший проводник тепла.

Точка замерзания ртути -39°C . При более низких температурах ее применять нельзя. Точка кипения ртути $+357^{\circ}\text{C}$, но если выше над ртутью находится вакуум, то при приближении этой температуры в ртути начинается процесс дистилляции. Для предотвращения этого и для увеличения верхнего температурного предела до $+500^{\circ}\text{C}$ оставшаяся не заполненной ртутью часть трубки под давлением заполняется инертным газом, например азотом.

Спирт, зачастую окрашенный в красный цвет, чтобы его было видно в трубке, гораздо дешевле ртути, и его точка замерзания равна -113°C , что значительно ниже точки замерзания ртути. Однако точка кипения спирта ниже, чем у ртути, и равна $+79^{\circ}\text{C}$.

Ошибки измерения

Типичные ошибки в показаниях стеклянного жидкостного термометра могут возникать из-за:

- медленной скорости остывания стекла;
- неправильного расположения термометра;
- некоторой инерционности жидкости в термометре (то есть замедленное время отклика);
- неравномерного диаметра капиллярной трубки. Это означает, что равные интервалы на шкале в одной части термометра не совпадают с такими же температурными интервалами в другой части.

Термопары

Измерение температуры с помощью термопар возможно благодаря возникновению ЭДС при нагреве спая двух разнородных металлов.

Принцип действия

На стыке двух разнородных металлов, например меди и константана, существует разность электрических потенциалов, изменяющаяся с изменением температуры. Это явление называют *термоэлектрическим эффектом*. Если цепь замкнуть на месте второго спая, находящегося при другой температуре, то по цепи потечет ток. Эта особенность термопары используется для измерения температуры. На **Рис. 31.2** показаны два разнородных металлических проводника со скрученными и спаянными концами. Если два спая имеют разные температуры, то по цепи течет ток I .

Отклонение стрелки гальванометра G зависит от разности температур между спаем X и спаем Y . Она вызвана различием

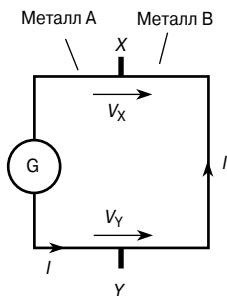


Рис. 31.2

между напряжениями V_x и V_y . Спай с более высокой температурой называют *горячим спаем*, а с более низкой — *холодным спаем*. Если температуру холодного спая не менять, то гальванометр можно откалибровать так, чтобы по нему можно было определять температуру горячего спая. В этом случае холодный спай называют *свободным спаем*.

Во многих случаях необходимо, чтобы измерительный прибор находился далеко от точки, где нужно произвести измерения. Тогда приходится использовать удлинительные провода, которые, как правило, делают из того же материала, что и термопара, но меньшей толщины. Свободный спай затем переходит на их концы. Для работы термопары горячий спай размещают там, где необходимо измерить температуру. Измерительный прибор покажет температуру горячего спая, когда свободный спай находится при температуре 0°C :

$$\left(\begin{array}{c} \text{температура} \\ \text{горячего спая} \end{array} \right) = 0^\circ\text{C} + \left(\begin{array}{c} \text{разность} \\ \text{температур} \end{array} \right).$$

В лабораторных условиях свободный спай зачастую помещают на тающий лёд, но в промышленных условиях его, как правило, кладут в регулируемую с помощью термореле печь с неизменной температурой или зарывают в землю, где температура постоянна. Тогда

$$\left(\begin{array}{c} \text{температура} \\ \text{горячего спая} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{температура} \\ \text{холодного спая} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{разность} \\ \text{температур} \end{array} \right).$$

Устройство

Спай термопары представляет собой два скрученных провода из разнородных металлов, которые затем сваривают вместе. На Рис. 31.3 показано устройство типичной термопары из меди и константана, применяемой в промышленных условиях.

Вне рабочего спаия используемые два проводника должны быть электрически изолированы друг от друга с помощью под-

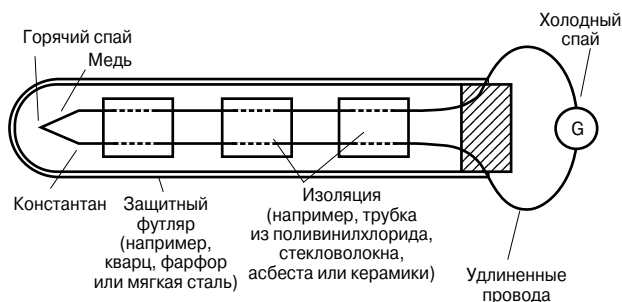


Рис. 31.3

ходящего изоляционного материала. На **Рис. 31.3** это трубки с парами одинаковых отверстий. Провода и трубка обычно вводятся в футляр для защиты их от воздействия окружающей среды, в которой они могут быть повреждены механически или могут подвергнуться коррозии.

Применение

Термопарой медь-константан можно измерять температуру в диапазоне от -250°C до примерно $+400^{\circ}\text{C}$. Как правило, такую термопару используют для контроля температуры газов в жаровых трубах паровых котлов, при производстве пищевых продуктов, и в условиях сверхнизких температур.

Термопара железо-константан работает в диапазоне от -200°C до $+850^{\circ}\text{C}$. Обычно эту термопару применяют на целлюлозно-бумажных фабриках, в печах для отжига и в реакционных аппаратах.

Хромель-алюмелевая термопара действует в диапазоне от -200°C до $+1100^{\circ}\text{C}$. Ее обычно используют для измерения температуры газов в доменных печах для обжига кирпича и при производстве стекла.

Для измерения температур свыше 1100°C , как правило, применяют пирометры полного излучения. Однако можно воспользоваться термопарой платина-платина/родий, так как она работает при температурах, достигающих 1400°C , или термопарой вольфрам-молибден, пригодной до температур 2600°C .

Преимущества

Термопара:

- имеет очень простую конструкцию;
- может быть очень малого размера;
- прочна и соответственно надёжна в эксплуатации;
- легко удаляется при повреждении;
- имеет малое время отклика;

- может применяться на некотором расстоянии от измерительного прибора и идеально подходит для использования в автоматических и дистанционно управляемых системах;
- относительно дешёва.

Источники ошибок

К источникам ошибок, от которых трудно избавиться, относятся:

- падение напряжения в проводах и спаях;
- возможные изменения температуры в холодном контакте;
- блуждающие термоэлектрические токи, вызванные добавлением «лишних» металлов в цепь термопары. (Дополнительные провода приходится часто использовать для увеличения расстояния до измерительных приборов или для обеспечения контактов с вольтметром.)

Термопару можно применять вместе с электронным термометром с батарейным или сетевым питанием, заменяющим милливольтметр. Эти приборы усиливают малую ЭДС термопары перед тем, как подать импульсы на многопредельный вольтметр, откалиброванный в прямом соответствии со шкалой температур. Эти приборы отличаются высокой точностью, и на них почти не сказывается падение напряжения в проводах и на контактах.

Резистивные термометры

Работа резистивных термометров основана на изменении электрического сопротивления, вызванного изменением температуры.

Устройство

Резистивные термометры могут быть разного размера и формы в зависимости от их назначения. Типичный пример конструкции резистивного термометра показан на **Рис. 31.4**.

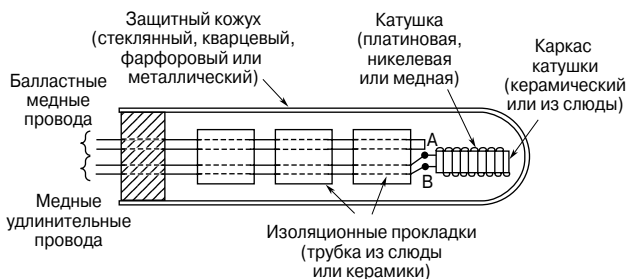


Рис. 31.4

Самым распространенным металлом для изготовления катушки в таком термометре является платина, хотя ее чувствительность не так велика, как у меди или никеля. Однако платина очень стабильный металл, обеспечивающий воспроизводимые результаты резистивного термометра. Платиновый резистивный термометр зачастую используется как калибровочный прибор. Так как платина — металл дорогой, для соединения термометра с измерительным контуром используют провода из другого металла, обычно из меди. На **Рис. 31.4** платиновые и соединительные провода показаны соединенными в точках А и В. Иногда этот контакт может быть выведен за пределы кожуха. Однако провода часто находятся в близком контакте с источником тепла, что может привести к ошибкам измерения. Этот фактор можно исключить внедрением пары идентичных проводов, называемых балластными, испытывающими то же изменение температуры, что и удлинительные провода.

Принцип работы

Для большинства металлов рост температуры означает рост электрического сопротивления, а так как сопротивление можно измерить с высокой точностью, то это свойство можно использовать и для измерения температуры.

Если сопротивление провода определённой длины при 0°C равно R_0 , а его сопротивление при $\theta^{\circ}\text{C}$ равно R_{θ} , то

$$R_{\theta} = R_0 (1 + \theta\alpha),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления материала (см. гл. 41).

Тогда температура

$$\theta = \frac{R_{\theta} - R_0}{\alpha R_0}$$

Значения R_0 и α могут определяться экспериментально или быть получены из справочных данных. Следовательно, если измерить R_{θ} , то можно рассчитать θ . Это обстоятельство и лежит в основе работы резистивного термометра. Хотя для измерения R_{θ} можно использовать чувствительный омметр, для получения более точных результатов применяют электрическую схему, называемую *мостом Уитстона* и показанную на **Рис. 31.5** (см. кн. 2, гл. 50).

Эта электрическая схема сравнивает величину неизвестного сопротивления R_{θ} с известными фиксированными величинами сопротивлений резисторов R_1 и R_2 и переменным резистором R_3 . Гальванометр G — это чувствительный микроамперметр, у которого отметка нулевого сопротивления находится в середине шкалы. Сопротивление резистора R_3 подстраивают до тех пор,

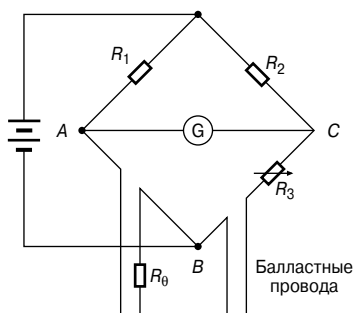


Рис. 31.5

пока стрелка гальванометра не достигнет положения нуля, то есть когда через гальванометр G не будет течь ток, и мостик, как говорится, будет «уравновешен».

В равновесии

$$R_2 R_0 = R_1 R_3,$$

откуда

$$R_0 = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

Если сопротивления R_1 и R_2 равны, то $R_0 = R_3$.

Изображенный на **Рис. 31.5** резистивный термометр можно подсоединить между точками A и B и измерить точное значение его сопротивления R_0 при любой температуре θ .

Балластные провода, подсоединенные в плече BC , помогают исключить ошибки, вызванные удлинительными проводами термометра; их присутствие, как правило, в таком термометре необходимо.

Ограничения

В резистивном термометре, рассчитанном на работу в диапазоне температур от -100 до $+300^\circ\text{C}$, применяется в основном никелевая катушка.

Платиновые резистивные термометры способны измерять температуру с большой точностью в диапазоне от -200 до $+800^\circ\text{C}$. Этот верхний предел может быть увеличен до $+1\,500^\circ\text{C}$, если для изготовления кожуха и катушки применять материалы с высокой температурой плавления.

Достоинства и недостатки платиновой катушки

Платина очень часто применяется для изготовления резистивных термометров, так как она химически инертна, то есть не участвует в химических реакциях, не подвержена коррозии, а также имеет высокую точку плавления ($+1\,769^\circ\text{C}$). К её недостаткам относится замедленный отклик на изменение температуры.

Применение

Платиновые резистивные термометры можно использовать в качестве калибрующих приборов или в таких высокотемпературных процессах, как отжиг и термообработка. Их легко встроить в автоматические системы контроля и управления процессами. Эти термометры довольно хрупкие, и их легко повредить, особенно при ударе или чрезмерной вибрации.

Термисторы

Термистор — это полупроводниковый материал (например, смесь оксидов меди, марганца, кобальта и т.д.), имеющий форму оплавленного валика с двумя выводами. С ростом температуры его сопротивление резко уменьшается.

На **Рис. 31.6** показаны типичные кривые, иллюстрирующие зависимость от температуры сопротивления термистора, а также аналогичную зависимость для наиболее часто используемых металлов.

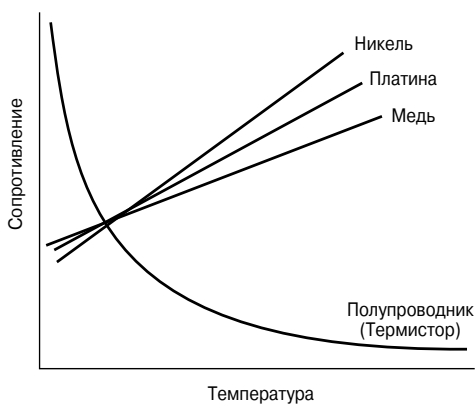


Рис. 31.6

Сопротивление типичного термистора может колебаться от 400 Ом при 0°C до 100 Ом при +140°C.

Преимущества

Основное преимущество термистора — высокая чувствительность и небольшие габариты. Это недорогой метод измерения температуры и определения ее незначительных изменений.

Пирометры

Пирометр — это прибор для измерения очень высоких температур. В основе его работы лежит использование теплового излучения вещества в нагретом состоянии, так как интенсив-

ность излучения зависит от температуры вещества. Измерение теплового излучения — это удобный метод определения температуры источника тепла, что особенно подходит для производственных процессов. Существует два основных типа пирометров: *пирометр общего излучения* и *оптический пирометр*.

Пирометры очень удобны тем, что с ними можно работать на безопасном расстоянии от источника тепла. Эти приборы используют для измерения температуры расплавленных металлов, внутренностей печей или склонов действующих вулканов. Пирометры общего излучения можно также применять совместно с приборами, постоянно регистрирующими и контролирующими температуру.

Пирометр общего излучения

На **Рис. 31.7** показано устройство типичного пирометра общего излучения.

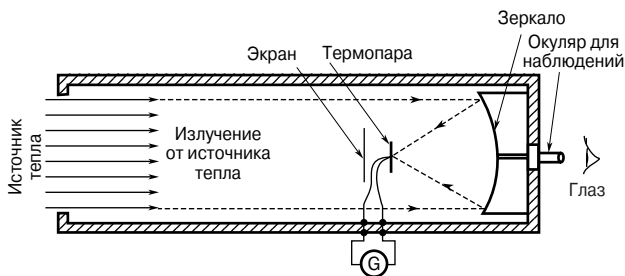


Рис. 31.7

Лучистая энергия от источника тепла, например от печи, после отражения от вогнутого зеркала сосредоточивается на нагретом контакте термопары. Рост температуры, фиксируемый термопарой, зависит от количества полученной лучистой энергии, которая в свою очередь зависит от температуры источника тепла.

Гальванометр G, соединенный с термопарой, регистрирует ток, полученный от возникшей ЭДС термопары. Этот гальванометр можно откалибровать так, чтобы он показывал непосредственное значение температуры источника тепла. Как видно из рисунка, термопара защищена от прямого воздействия излучения экраном, а источник тепла можно увидеть через оптическую трубу. Для большей чувствительности можно создать термобатарейку, состоящую из нескольких последовательно соединенных термопар.

Пирометры общего излучения используют для измерения температур в диапазоне от $+700$ до $+2\,000^{\circ}\text{C}$.

Оптические пирометры

Когда температура тела значительно повышается, то возникает два визуальных эффекта: испускаемый телом свет, во-первых, становится ярче и, во-вторых, меняет свою окраску. В оптических пирометрах используют эти эффекты, проводя сравнение между яркостью раскалённого добела источника и светом нити накала известной температуры.

Наибольшее распространение получил оптический пирометр, называемый *пирометр исчезающей нити накала*. Устройство такого пирометра показано на **Рис. 31.8**.

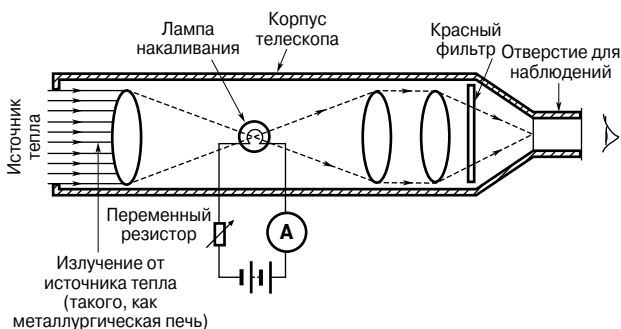


Рис. 31.8

В телескопическую трубу, куда поступает излучение от источника тепла, встроена лампа накаливания. Излучение от этого источника можно увидеть через окуляр. Для защиты глаз в приборе стоит красный фильтр.

Переменный резистор задаёт ток, текущий через нить лампы. Как только величина тока увеличивается, температура нити накала тоже растёт, и её цвет меняется. Если смотреть в окуляр, то нить накала лампы оказывается наложенной на излучение, поступающее от источника тепла. Ток увеличивают до тех пор, пока нить накала не раскалится до такой степени, что её изображение сольётся с фоном. В этом случае будет казаться, что она исчезла. Ток, обеспечивающий эффект кажущегося исчезновения нити, является параметром, определяющим температуру источника тепла. Амперметр, контролирующий ток, можно откалибровать так, чтобы он показывал непосредственную температуру источника. Оптические пирометры можно использовать для измерения температур до $+3\ 000^{\circ}\text{C}$ и даже выше.

Достоинства пирометров

- Практически пирометром можно измерить любую температуру.
- Нет необходимости помещать пирометр непосредственно в нагретую зону, следовательно, он не подвержен влиянию вы-

сокой температуры и химической коррозии, которые могли бы повредить другие измерительные приборы.

- Пирометр может отследить даже очень высокую скорость изменения температуры.
- С помощью пирометра можно измерять скорость движущихся тел.
- Система линз делает показания пирометра практически независимыми от расстояния до источника тепла.

Недостатки пирометров

- Зачастую пирометры оказываются дороже, чем другие приборы, измеряющие температуру.
- За процессом нагрева нити накала необходимо непосредственное наблюдение.
- Необходима ручная корректировка.
- Для калибровки пирометра и работы с ним нужны определённые навыки и осторожность. Для каждого случая измерения пирометр надо калибровать заново.
- На показания пирометра может повлиять температура окружающей среды, и такие ошибки исключить трудно.

Краски и мелки, отображающие температуру

Отображающие температуру краски содержат вещества, изменяющие цвет при нагревании до определенной температуры. Обычно это происходит из-за химической реакции разложения, например потери воды. После достижения определённой температуры окраска больше не меняется. Однако есть и такие краски, первоначальный цвет которых восстанавливается после охлаждения. Краски, изменяющие цвет в зависимости от температуры, используют там, где необходимо знать температуру недоступных частей устройств и механизмов. Особенно часто их используют в процессах термообработки, когда требуется знать температуру до начала процесса охлаждения. На практике применяют несколько типов такой краски, и у большинства из них температурный диапазон невелик, поэтому для разных температур употребляют разные краски. Обычный диапазон температур для них колеблется от +30 до +700°C.

Отображающие температуру мелки состоят из плавких твёрдых веществ, спрессованных в форме палочки. Плавление таких мелков является индикатором достижения необходимой температуры. Мелки просты в применении, но они отображают только одно значение температуры, то есть точку плавления составляющих их веществ. Существует более 100 различных типов мелков для температур от +50 до +1 400°C, и каждый из них соответствует определённому узкому температурному диапазону.

Такой способ измерения температуры применяют в металлургии, например, во время предварительного нагрева металла, во время закалки, отжига и отпуска. Мелки находят применение также при наблюдении за температурой важнейших частей агрегатов или для контроля температуры формы в производстве пластмассовых и резиновых изделий.

Биметаллические термометры

В *биметаллических термометрах* используется зависимость расширения металлических полос, управляющих стрелкой указателя, от температуры. Две тонкие металлические полоски с различной степенью теплового расширения приварены или приклепаны одна к другой. Степень изгиба получившейся биметаллической полоски указывает на изменение температуры. Для большей чувствительности полоски можно скрутить в плоскую спираль (или виток), один край которой закрепить, а другой приспособить так, чтобы он вращал указатель по шкале. Биметаллические термометры используют в системах сигнализации в случае перегрева, когда точность показаний приборов не так важна. Поместив это устройство в кожух, можно обеспечить защиту прибора от вредного воздействия окружающей среды, однако чувствительность при этом снизится.

Обычно верхний предел температурного диапазона прибора составляет около $+200^{\circ}\text{C}$, хотя применение специальных металлов позволяет расширить диапазон до $+400^{\circ}\text{C}$.

Металлический ртутный термометр

Металлический ртутный термометр — это дальнейшее развитие принципа, используемого в стеклянном ртутном термометре. Находящаяся в стеклянном набалдашнике ртуть распространяется через капиллярную трубку с небольшим каналом и попадает в прибор, фиксирующий величину давления, например в манометр Бурдона. Положение стрелки показывает, насколько расширилась ртуть, а следовательно, и увеличилась температура.

Преимущество этого прибора состоит в его прочности, и при удлинении капиллярной трубки манометр можно разместить на некотором расстоянии от набалдашника, а следовательно, за изменением температуры можно наблюдать с позиций, неприемлемых в случае использования стеклянного ртутного термометра.

Металлический ртутный термометр применяется при температурах не выше $+600^{\circ}\text{C}$.

Газовые термометры

Газовый термометр состоит из подвижной U-образной трубки с ртутью, соединенной с помощью капиллярной трубки с сосудом, содержащим газ. Изменение объёма фиксированной массы газа при постоянном давлении или изменение давления фиксированной массы газа при постоянном объеме можно использовать для измерения температуры. Такой термометр громоздок, и его редко применяют непосредственно для измерения температуры, но чаще он выступает в роли эталона при калибровке термометров других видов. Если прибор наполнен чистым водородом, то его рабочий диапазон лежит в пределах $(-240...+1500)^{\circ}\text{C}$, позволяя при этом определять значение температуры с высокой точностью.

32. ДАВЛЕНИЕ В ТЕКУЧИХ СРЕДАХ

Давление

Давление, действующее на поверхность тела, определяют как силу, направленную перпендикулярно к единице площади поверхности. Единица давления — *паскаль* [Па]. Один паскаль равен одному ньютону на квадратный метр. Следовательно, давление

$$p = \frac{F}{A} \text{ Па}$$

где F — сила, измеряемая в ньютонах [Н] и действующая под прямым углом к площади поверхности A , измеряемой в квадратных метрах [м²].

Например, когда сила 20 Н действует равномерно и направлена перпендикулярно к площади, равной 4 м², то давление p , оказываемое на эту площадь, равно

$$p = \frac{20 \text{ Н}}{4 \text{ м}^2} = 5 \text{ Па.}$$

Давление в текучих средах

Текущей средой называют как жидкость, так и газ. Существует четыре основных свойства давления в текучих средах.

1. Давление на заданной глубине в текучей среде одинаково во всех направлениях, как показано на **Рис. 32.1а**.

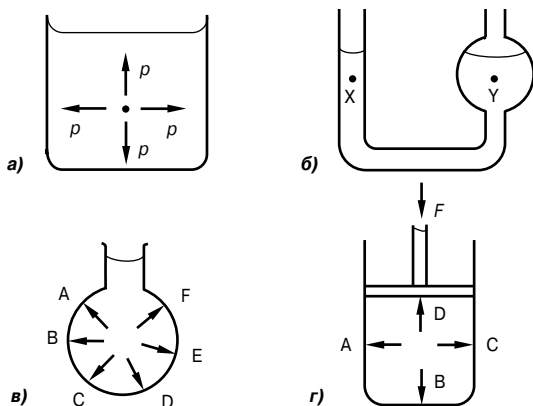


Рис. 32.1

2. Давление на заданной глубине в текучей среде не зависит от формы ёмкости, которую заполняет эта среда. На **Рис. 32.1б** показано, что давление в точке X точно такое же, как и давление в точке Y.

3. Давление направлено перпендикулярно к поверхности, содержащей жидкость. На **Рис. 32.1в** давление во всех точках от А до F направлено на внутреннюю поверхность ёмкости перпендикулярно к касательным в этих точках.

4. Давление текучей среды во всех направлениях передается одинаково. На **Рис. 32.1г** показано, что если пренебречь массой среды, то давление во всех точках от А до D одинаково (без учёта силы гравитации).

Давление p в любой точке текучей среды зависит от трех факторов:

- плотности текучей среды ρ [кг/м³];
- ускорения свободного падения g , равного приблизительно 9.81 м/с² (или силы гравитационного поля [Н/кг]);
- высоты h [м] — столба текучей среды над точкой измерения давления.

Ниже приведено уравнение, объединяющее эти три фактора

$$p = \rho gh \text{ Па}$$

Например, определим давление в точке, находящейся на глубине 0.03 м от поверхности воды, заполненного водой контейнера, если плотность воды — 1 000 кг/м³, ускорение свободного падения — 9.81 м/с² (**Рис. 32.2**).

$$\begin{aligned} p &= \rho gh = \\ &= 1\,000 \times 9.81 \times 0.03 = \\ &= \mathbf{294.3 \text{ Па}}. \end{aligned}$$

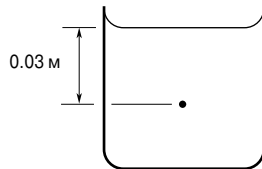


Рис. 32.2

Атмосферное давление

Воздух над поверхностью Земли представляет собой текучую среду, плотность которой изменяется примерно от 1.225 кг/м³ на уровне моря до нуля в космическом пространстве. Воздух оказывает давление на каждую точку земной поверхности, так как $p = \rho gh$, где высота h составляет несколько тысяч метров. Это давление, называемое *атмосферным давлением*, имеет величину примерно 101 килопаскаль.

При измерении давления обычно используют два термина:

абсолютное давление, имея в виду, что давление отсчитывают от абсолютного вакуума (то есть от нулевого давления);

манометрическое давление, имея в виду, что это обычное давление, отсчитываемое от давления, создаваемого атмосферой.

В таком случае

$$\text{абсолютное давление} = \left(\begin{array}{c} \text{атмосферное} \\ \text{давление} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{манометрическое} \\ \text{давление} \end{array} \right).$$

Следовательно, манометрическое давление 50 кПа эквивалентно абсолютному давлению (100 + 50) кПа, то есть 150 кПа, так как атмосферное давление примерно равно 100 кПа.

Например, определим абсолютное давление на любую точку подводной лодки, находящейся под водой на глубине 30 м, при условии, что атмосферное давление равно 101 кПа, плотность морской воды — $1\,030 \text{ кг/м}^3$, а ускорение свободного падения — 9.81 м/с^2 .

Сначала найдём манометрическое давление на глубине 30 м:

$$p = \rho gh = 1\,030 \times 9.81 \times 30 = 303\,129 \text{ Па} = 303.13 \text{ кПа}.$$

Теперь можно найти абсолютное давление:

$$\begin{aligned} \text{Абсолютное} &= \left(\begin{array}{c} \text{атмосферное} \\ \text{давление} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{манометрическое} \\ \text{давление} \end{array} \right) = \\ &= (101 + 303.13) \text{ кПа} = 404.13 \text{ кПа}, \end{aligned}$$

то есть **абсолютное давление на глубине 30 м равно 404.13 кПа**.

Другими единицами, не входящими в систему СИ, однако часто используемыми для измерения атмосферного давления, являются *бар* и *миллиметр ртутного столба* [мм рт. ст.]. Эти единицы связаны с паскалем следующими соотношениями:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Н/м}^2 = 100 \text{ кПа}.$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133.322 \text{ Па}.$$

Более подробную информацию об атмосферном, абсолютном и манометрическом давлении можно найти в гл. 33, посвященной измерению давления.

Закон Архимеда

Закон Архимеда гласит:

|| *На всякое тело, погруженное в жидкость или газ, действует направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной им жидкости и приложенная к центру тяжести тела.*

Другими словами, если твёрдое тело погружено в жидкость (газ), кажущаяся потеря веса равна весу вытесненной жидкости. Если V — объем тела под поверхностью жидкости, то кажущаяся потеря веса (то есть выталкивающая сила) W равна

$$W = Vw = V\rho g,$$

где w — удельный вес, то есть вес в единице объема,
 ρ — плотность жидкости.

Если тело плавает на поверхности, то кажется, что весь его вес потерян. В этом случае вес вытесненной жидкости равен весу плавающего тела.

Например, найдём плотность тела, если оно весит 2.760 Н, находясь в воздухе, и 1.925 Н, когда оно полностью погружено в воду, плотность которой 1 000 кг/м³. (Напомним, что вес равен силе тяжести и соответственно в системе СИ измеряется в ньютонах [Н]. — *Прим. редактора перевода.*)

Сначала найдём вес вытесненной воды.

Кажущаяся потеря веса равна

$$2.760 \text{ Н} - 1.925 \text{ Н} = 0.835 \text{ Н}.$$

Это и есть вес вытесненной воды, то есть $V\rho g$,
 где V — объём тела,
 ρ — плотность воды.

Теперь найдём объём вытесненной воды (равный объёму тела):

$$0.835 \text{ Н} = (V)(1\,000 \text{ кг/м}^3)(9.81 \text{ м/с}^2),$$

откуда

$$V = \frac{0.835}{9\,810} = 8.512 \times 10^{-5} \text{ м}^3.$$

$$\begin{aligned} \text{Плотность тела} &= \frac{\text{масса}}{\text{объём}} = \frac{\text{вес}}{gV} = \\ &= \frac{2.760 \text{ Н}}{(9.81 \text{ м/с}^2)(8.512 \times 10^{-5} \text{ м}^3)} = \\ &= 3\,305 \text{ кг/м}^3 = \mathbf{3.305 \text{ т/м}^3}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Относительная плотность тела} &= \frac{\text{плотность тела}}{\text{плотность воды}} = \\ &= \frac{3\,305 \text{ кг/м}^3}{1\,000 \text{ кг/м}^3} = \mathbf{3.305}. \end{aligned}$$

Измерение давления

Существуют различные возможности измерения давления, в том числе с помощью:

- барометров;
- жидкостных манометров;
- пружинных манометров;
- вакуумных манометров.

Устройство и принцип работы каждого из этих приборов рассмотрены в гл. 33.

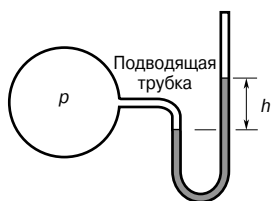


Рис. 32.3

Коротко ознакомимся с одним устройством — манометром. Манометр — это прибор, который используют для измерения относительно невысоких давлений: немного выше либо ниже атмосферного. Простейший манометр с U-образной трубкой показан на Рис. 32.3.

Давление p , действующее в подводящей трубке, выталкивает жидкость в U-образную трубку до тех пор, пока не наступит равновесие. В равновесии давление в подводящей трубке

$$p = (\text{атмосферное давление } p_a) + (\text{давление столба жидкости } \rho gh),$$

то есть

$$p = p_a + \rho gh.$$

Например, найдём абсолютное и манометрическое давление газа, если атмосферное давление p_a равно 101 кПа, жидкость в U-образной трубке — вода, плотность которой 1 000 кг/м³, а высота h равна 300 мм.

$$\begin{aligned} \text{Абсолютное давление газа} &= (101\,000 + 1\,000 \times 9.81 \times 0.3) \text{ Па} = \\ &= (101\,000 + 2\,943) \text{ Па} = 103\,943 \text{ Па} = \\ &= 103.94 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

$$\text{Манометрическое давление} = \left(\begin{array}{c} \text{абсолютное} \\ \text{давление} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{атмосферное} \\ \text{давление} \end{array} \right),$$

то есть **манометрическое давление** = 103.94 – 101 = **2.94 кПа**.

Если высота h не изменилась после того, как U-образную трубку заполнили жидкостью с большей плотностью, допустим, ртутью, плотность которой 13 600 кг/м³, это означает, что давление в резервуаре возросло в 13.6 раза.

Подробнее о гидростатическом напоре

Давление p в основании резервуара, показанного на Рис. 32.4а (резервуар показан в двух проекциях), равно

$$p = \rho gh = wh,$$

где w — удельный вес, то есть вес в единице объема [Н/м³].

До этой величины давление увеличивается равномерно, начиная с нуля на поверхности жидкости. Изменение давления с глубиной показано на Рис. 32.4б.

На любой глубине x давление равно

$$p_x = \rho gx = wx.$$

Можно показать, что среднее давление при любой форме плоской поверхности жидкости в резервуаре равно давлению в центре тяжести, центре площади.

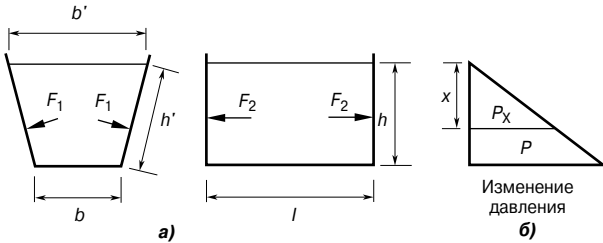


Рис. 32.4

Покатые боковые стенки резервуара, как это видно на **Рис. 32.4**, образуют трапецию, а значит, среднее давление на них — это давление на уровне половины глубины ёмкости:

$$\frac{p}{2} = \frac{\rho gh}{2} = \frac{wh}{2}.$$

Сила, действующая на наклонные стенки, определяется произведением среднего давления и площади этих стенок:

$$F_1 = \frac{\rho gh}{2} \times lh' = \frac{whlh'}{2},$$

где h' — высота наклонной стенки.

Давление, а следовательно, и сила F_1 направлены под прямыми углами к пологим стенкам, как это показано на **Рис. 32.4а**.

Среднее давление на вертикальные трапециевидные стенки ёмкости не равно давлению на половине её глубины: оно выше. Глубина расположения центра тяжести определяется выражением

$$\frac{h}{3} \left(\frac{2b + b'}{b + b'} \right) \quad (\text{см. Рис. 32.4}).$$

Среднее давление на стенку, следовательно, равно

$$\frac{\rho gh}{3} \left(\frac{2b + b'}{b + b'} \right) = \frac{wh}{3} \left(\frac{2b + b'}{b + b'} \right).$$

Силы F_2 на вертикальные трапециевидные стенки ёмкости направлены горизонтально, так как они возникли благодаря среднему давлению и площади трапеции, то есть

$$\left(\frac{b + b'}{2} \right) h.$$

Сила, действующая на основание резервуара равна

$$(\rho gh) \times (\text{площадь основания}) = \rho ghb = whlb.$$

В случае резервуара с вертикальными стенками это и есть вес находящейся в нем жидкости.

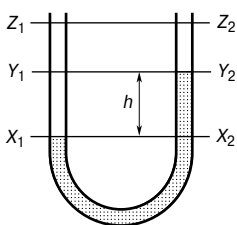


Рис. 32.5

В любом сосуде, содержащем однородную жидкость, находящуюся в состоянии покоя и в непрерывном контакте, давление должно быть одинаковым во всех точках одного уровня. В U-образной трубке, где жидкость в нижней части находится в покое, как это показано на **Рис. 32.5**, давление в обеих частях трубки, заполненных жидкостью, должно быть одинаковым на всех уровнях вплоть до X_1X_2 .

Давление в точке X_1 , однако, больше, чем давление в точке Y_1 , на величину

$$p_1 = w_1 h = \rho_1 g h,$$

где w_1 и ρ_1 — соответственно удельный вес и плотность жидкости (или газа), находящейся между X_1 и Y_1 .

Схожим образом давление в точке X_2 больше, чем давление в точке Y_2 , на величину

$$p_2 = w_2 h = \rho_2 g h,$$

где w_2 и ρ_2 — соответственно удельный вес и плотность жидкости (или газа), находящейся в нижней части U-образной трубки.

По определенным причинам ρ_1 должна быть больше ρ_2 , а давление в точке Y_1 — выше давления в точке Y_2 на величину

$$p_2 - p_1 = (w_2 - w_1)h = (\rho_2 - \rho_1)gh.$$

Если в областях ближе к верху U-образной трубки находится воздух или другой газ или газовая смесь, то w_1 и ρ_1 можно пренебречь.

Тогда

$$p_2 - p_1 = w_2 h = \rho_2 g h.$$

Если в верхних областях трубки находится более легкая жидкость, то разность давлений можно выразить как

$$p_2 - p_1 = \rho_1 (d - 1)gh = (d - 1)w_1 h,$$

где

$$d = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Допустим, в U-образной трубке находятся ртуть и вода, и в таком случае d — это относительная плотность ртути, равная приблизительно 13.6. Тогда

$$p_1 - p_2 = 12.6\rho g h = 12.6w h,$$

где ρ и w — соответственно плотность и удельный вес воды.

Разность давлений на уровне Z_1Z_2 та же, что и на уровне Y_1Y_2 , если оба сегмента содержат одну и ту же жидкость между этими уровнями. Это вытекает из того факта, что нарастание давления от точки Z_1 до точки Y_1 не меняется, так же как и нарастание от точки Z_2 до точки Y_2 .

Например, разность давлений между двумя точками в горизонтальном трубопроводе, полностью заполненном текущей водой, должна быть показана на U-образной трубке ниже трубопровода. На дне U-образной трубы есть ртуть; остальное пространство заполнено водой. Учитывая, что плотность воды равна $1\,000\text{ кг/м}^3$, а относительная плотность ртути равна 13,6, разность давлений, проявляющаяся, когда разность уровней ртути в U-образной трубке равна 310 мм, определяется следующим образом.

Разность давлений на уровне XX' , как видно на **Рис. 32.6**, равна разности давлений между двумя точками в трубе.

Однако на уровне YY' разность давлений отсутствует, так как ниже этого уровня есть ртуть в виде буквы U, находящаяся в покое. Разность давлений на уровне XX' , а следовательно, и между точками в трубе есть разность давлений между точками из-за столба ртути высотой 310 мм (то есть $X'Y'$) и точкой из-за столба воды высотой 310 мм (то есть XY).

Тогда разность давлений равна

$$\begin{aligned} 310\text{ мм} \times w_m - 310\text{ мм} \times w_w &= 310\text{ мм} (w_m - w_w) = \\ &= 310\text{ мм} (\rho_m g - \rho_w g) = \\ &= 310\text{ мм} g \rho_w (d_m - 1), \end{aligned}$$

где w_m — удельный вес ртути,

w_w — удельный вес воды,

ρ_m — плотность ртути,

ρ_w — плотность воды,

d_m — относительная плотность ртути.

Следовательно,

$$\begin{aligned} \text{разность давлений} &= 0.31\text{ м} \times 1\,000\text{ кг/м}^3 \times 9.81\text{ м/с}^2 (13.6 - 1) = \\ &= 0.31 \times 1\,000 \times 9.81 \times 12.6 = \mathbf{38.32\text{ кПа}}. \end{aligned}$$

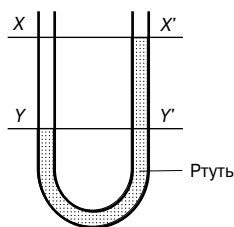


Рис. 32.6

33. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Введение

Как утверждалось в гл. 32, давление — это сила, с которой текучая среда действует на единицу площади. Текучая среда (то есть жидкость, газ или пар) имеет незначительное сопротивление к поперечной силе, поэтому сила, с которой действует среда, всегда направлена под прямым углом к поверхности ёмкости, содержащей данную среду. В системе СИ давление измеряется в *паскалях* [Па], что означает единицу силы на единицу площади, то есть $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Один паскаль — это очень маленькая величина, и поэтому, как правило, пользуются другой, большей, единицей, называемой *баром*. $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Атмосферное давление существует благодаря массе воздуха, находящейся над поверхностью Земли. Атмосферное давление постоянно меняется. За стандартное значение атмосферного давления, называемое «нормальным атмосферным давлением», часто принимают значение $101\,325 \text{ Па}$ или 1.01325 бар или $1\,013.25 \text{ миллибар}$ (мбар). Последняя единица — миллибар — обычно используется при замерах метеорологического давления. (Заметим, что, когда атмосферное давление отклоняется от значения $101\,325 \text{ Па}$, оно больше не считается нормальным.)

Приборы, регистрирующие давление, могут иметь различную форму, определяемую конкретными случаями применения. Кроме обычных критериев, таких, как диапазон давления, точность и инерционность, во многих случаях следует обращать особое внимание на материал, из которого изготовлен прибор, его герметичность и устойчивость к колебаниям температуры, поскольку текучая среда, давление которой надо измерять, может быть агрессивной или иметь высокую температуру.

К приборам, регистрирующим давление, которые используются в науке и промышленности, относятся:

- барометры;
- жидкостные манометры;
- пружинные манометры Бурдона;
- вакуумные манометры Маклеода и Пирани.

Барометры

Барометр — это прибор для измерения атмосферного давления, незаменимый при прогнозировании погоды. Атмосферное давление колеблется в зависимости от климатических условий, и, хотя отклонение, как правило, не составляет более 10% от нормального атмосферного давления, барометры подвержены влиянию сезонных колебаний температуры. Барометры используют также для измерений высоты над уровнем моря.

Устройство и принцип работы

Простейший барометр состоит из стеклянной трубки, не более 1 м в длину, запаянной с одного конца и заполненной ртутью. Трубку переворачивают и помещают в ванночку, также содержащую ртуть. Важно, чтобы во время этого процесса в трубку не попал воздух. Такой барометр показан на **Рис. 33.1**.

Уровень столбика ртути, помещённого в ванночку, опускается, оставляя после себя пустое пространство, называемое *вакуумом*.

Как показано на рисунке, атмосферное давление на поверхности ртути в ванночке равно давлению в основании столбика ртути в перевёрнутой трубке, то есть давление атмосферы

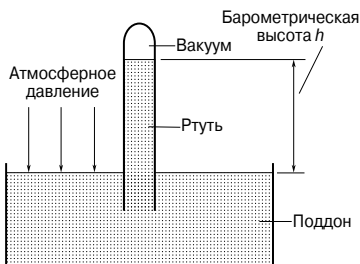


Рис. 33.1

поддерживает столбик ртути. Если атмосферное давление падает, барометрическая высота h уменьшается. И наоборот, высота h возрастёт, если увеличится атмосферное давление. Следовательно, атмосферное давление можно измерять, определяя высоту столбика ртути. Можно показать, что при нормальном атмосферном давлении высота столбика ртути h составит 760 мм, то есть вертикальный столбик ртути высотой 760 мм создает давление, равное нормальному атмосферному давлению.

Есть несколько способов выражения величины атмосферного давления.

Например, нормальное атмосферное давление — это $101\,327\text{ Па} = 101.327\text{ кПа}$,

или $101\,327\text{ Па} = 101\,327\text{ Н/м}^2 = 101.327\text{ кН/м}^2$,

или $101\,327\text{ Па} = 1.01\,327\text{ бар} = 1\,013.27\text{ мбар}$,

или $101\,327\text{ Па} = 760\text{ мм рт. ст.}$

Другое устройство типичного барометра показано на **Рис. 33.2**, где вместо перевёрнутой трубки и ванночки используется U-образная трубка, но в основе лежит тот же принцип.

Если вместо ртути барометр наполнить водой, то барометрическая высота h при нормальном атмосферном давлении окажется в 13.6 раза выше, чем в случае с ртутью, то есть около 10.4 м, что совсем не практично в применении. Небольшая высота столбика ртути объясняется её значительной плотностью. (Относительная плотность ртути равна 13.6.)

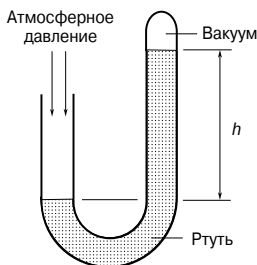


Рис. 33.2

Типы барометров

Барометр Фортина — это пример ртутного барометра, который обеспечивает очень высокую точность измерения барометрической высоты (порядка одной десятой миллиметра или ещё точнее). Его устройство представляет собой усовершенствованный вариант барометра в виде перевёрнутой трубки и ванночки, показанного на **Рис. 33.1**. Усовершенствованием является *шкала Вернера* для высокоточного измерения барометрической высоты. Недостаток этого барометра в том, что его нельзя переносить.

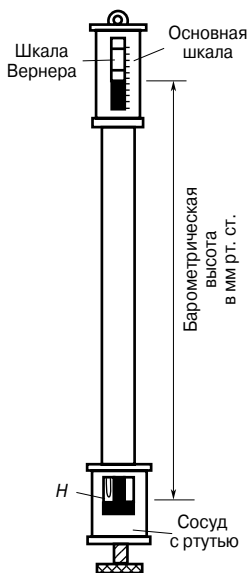


Рис. 33.3

Такой барометр состоит обычно из округлого полого запаянного сосуда S и изготавливается, как правило, из мягкого металла. Перед тем как запаять сосуд, давление воздуха в нем понижают почти до нуля, чтобы изменение атмосферного давления вызывало расширение или сжатие сосуда. Эти незначи-

Барометр Фортина показан на **Рис. 33.3**.

Ртуть содержится в кожаном мешочке в нижней части ёмкости для ртути. Высота ртути H в ёмкости может корректироваться с помощью винта у основания барометра, которым можно ослабить или усилить давление на кожаный мешочек. Для измерения атмосферного давления винт у H подкручивают до тех пор, пока указатель не достигнет поверхности ртути. Высоту столбика ртути затем считывают, используя основную шкалу и шкалу Вернера. Измерения атмосферного давления с помощью барометра Фортина гораздо точнее, чем с помощью простейшего барометра.

Барометр-анероид относится к переносным типам барометров. На **Рис. 33.4** показано типичное устройство барометра-анероида.

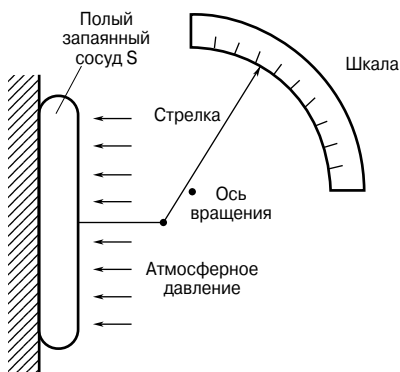


Рис. 33.4

тельные изменения можно усилить с помощью рычага или благодаря движению стрелки по градуированной шкале.

Шкалу (обычно круговую) калибруют в миллиметрах ртутного столба. Такие барометры требуют очень тщательной калибровки.

Абсолютное и манометрическое давление

Барометр измеряет действительное, или *абсолютное атмосферное давление*. Термин «абсолютное давление» означает, что давление отсчитывается от абсолютного вакуума (то есть от нулевого давления). На **Рис. 33.5** показана шкала давлений, где прямая АВ обозначает абсолютное нулевое давление (то есть вакуум), а прямая CD соответствует *атмосферному давлению*.

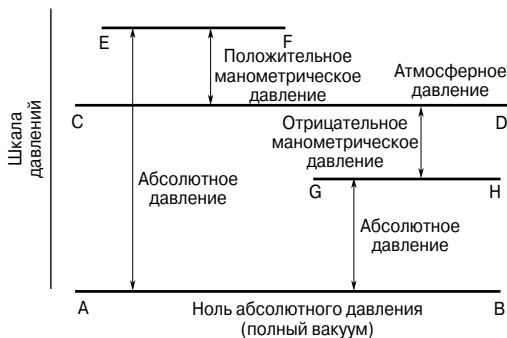


Рис. 33.5

Большинство приборов, измеряющих давление, устроено так, что на ту их часть, на которую действует измеряемое давление, действует и атмосферное давление. Следовательно, используемые на практике приборы в действительности определяют разницу между измеряемым и атмосферным давлением. Давление, которое измеряет прибор, называют *манометрическим давлением*. На **Рис. 33.5** прямая EF обозначает абсолютное давление, значение которого больше, чем атмосферное давление, то есть манометрическое давление положительно.

Следовательно,

$$\text{абсолютное давление} = \left(\begin{array}{c} \text{атмосферное} \\ \text{давление} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{манометрическое} \\ \text{давление} \end{array} \right).$$

Отсюда манометрическое давление, допустим, 60 кПа, фиксируемое на приборе, когда атмосферное давление равно 101 кПа, равно абсолютному давлению 60 кПа + 101 кПа, или 161 кПа.

Приборы, измеряющие давление, обычно называются *манометрами* (то есть они измеряют манометрическое давление).

Конечно, возможен случай, когда манометр будет показывать, что давление ниже атмосферного, то есть отрицательное

манометрическое давление. Такое давление обычно называют *вакуумом*, хотя оно не обязательно достигает полного вакуума. Прямая ГН на **Рис. 30.5** показывает такое давление. Прибор, применяемый для измерения такого давления, называется *вакуумным манометром* или *вакууметром*.

Когда показание вакуумного манометра достигает 0.4 бара — это означает, что давление на 0.4 бара меньше атмосферного. Если атмосферное давление равно 1 бару, то абсолютное давление равняется $(1 - 0.4)$, или 0.6 бара.

Манометр

Манометр — это прибор для измерения или сравнения давлений текучих сред. Он обеспечивает самый простой способ измерения таких давлений.

Манометр в виде U-образной трубки

Такой манометр состоит из согнутой стеклянной трубки U-образной формы, в которой содержится жидкость, например ртуть. Манометр в виде U-образной трубки показан на **Рис. 33.6а**.

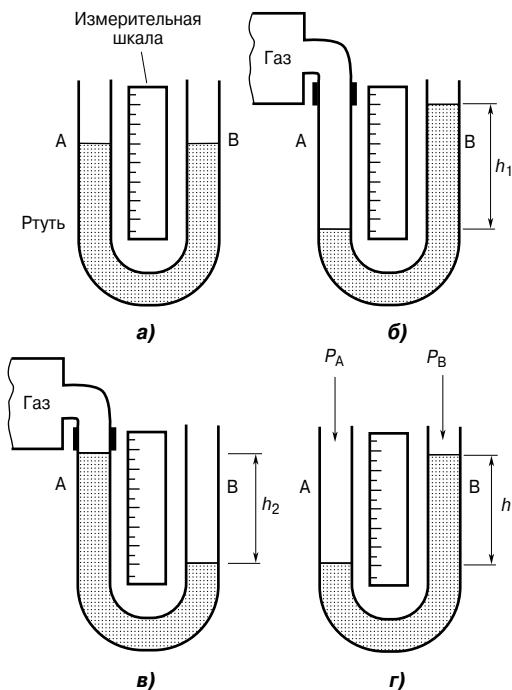


Рис. 33.6

Если отвод А соединён с ёмкостью с газом, давление которого выше атмосферного, то давление газа вызовет такое движение уровня ртути, что разность высот будет равна h_1 , как это показано на **Рис. 33.6б**.

Измерительную шкалу можно установить так, чтобы манометрическое давление газа характеризовалось высотой ртути h_1 .

Если отвод А соединён с ёмкостью с газом, давление которого ниже атмосферного, то уровни ртути сдвинутся так, как показано на **Рис. 33.6в**, и разность давлений составит величину h_2 мм ртутного столба.

С помощью U-образного манометра можно сравнивать два давления, допустим, P_A и P_B . На **Рис. 33.6г** показано такое устройство манометра, где $(P_B - P_A)$ равно h мм ртутного столба.

Одно из возможных применений этого измерительного прибора, работающего на основе перепада давления, используют для определения скорости потока жидкости в трубах (см. гл. 38).

Для измерения низких давлений вместо ртути в U-образной трубке можно использовать воду или парафин, чтобы h имело сравнительно большие значения, а значит, чувствительность прибора возрастала.

Наклонные манометры

Для измерения очень низких давлений необходимо, чтобы чувствительность прибора была более высокой. Это достигается благодаря применению *наклонного манометра*, наполненного водой, как показано на **Рис. 33.7**.

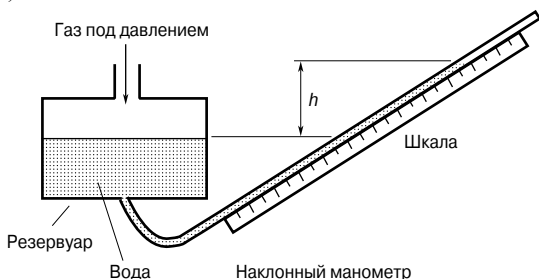


Рис. 33.7

Шкала крепится к наклонной трубке и калибруется относительно вертикальной трубки высотой h . Следовательно, когда сосуд, содержащий газ под давлением, соединён с резервуаром, возникает движение уровня жидкости манометра. Так как используется трубка с небольшим отверстием, то изменение жидкости в ёмкости очень мало по сравнению с движением в наклонной трубке, а значит, им можно пренебречь. Шкала манометра обычно размечается в диапазоне от 0.2 до 2 мбар.

Длина трубки естественным образом ограничивает давление газа, которое манометр в состоянии измерить. Большинство трубок манометров в длину составляют менее 2 м, и это (в случае использования ртути) ограничивает максимальное показание давления величиной 2.5 бара (или 250 кПа).

Манометр Бурдона

Давление, во много раз большее, чем атмосферное, можно измерять *манометром Бурдона*, который является наиболее часто используемым прибором среди всех устройств, измеряющих давление. Это очень надёжный в эксплуатации прибор. Основным его компонентом является фрагмент металлической трубки (называемой трубкой Бурдона) с сечением в виде овала или эллипса, которую обычно делают из фосфористой бронзы или стального сплава. Трубка запаяна с одной стороны и согнута в виде арки. Иногда трубку сгибают в виде спирали для большей чувствительности прибора. Типичное устройство такого манометра показано на **Рис. 33.8а**.

Один конец манометра (E) зафиксирован, и текучая среда, давление которой нужно измерить, подведена к этому концу. Давление действует под прямым углом к стенке металлической трубки, как это показано на поперечном сечении трубки на **Рис. 33.8б**. Из-за эллиптической формы становится понятно, что сумма составляющих давления, то есть равнодействующая, действующая на стенки A и C, превышает сумму составляющих давления, действующих на стенки B и D. В результате стороны A и C «пытаются» двигаться наружу, а B и D — внутрь, «стараясь» сформировать поперечное сечение в форме круга. Когда давление в трубке нарастает, она стремится распрямиться, а если давление падает, то закручивается сильнее. Движение свободного конца трубки пропорционально приложенному к трубке давлению. Это давление конечно же является манометрическим давлением (то есть разностью между атмосферным давлением, действующим с внешней стороны, и приложенным давлением, действующим внутри трубки). При помощи шарнира, болта и зубчатого сегмента, как показано на **Рис. 33.8а**, это движение можно перевести в круговое вращение стрелки по калиброванной шкале прибора.

Манометром Бурдона можно измерять высокое давление вплоть до 10^4 бар (7 600 мм рт. ст.), но соблюдая при этом особые меры предосторожности.

Манометр должен быть откалиброван, и это делается либо с помощью манометра для более низкого давления, либо с помощью устройства, называемого *грузопоршневым манометром*. Этот манометр состоит из поршня, который ходит в наполненном маслом цилиндре известного калибра и выдерживает точно отмеренную нагрузку, как это видно на **Рис. 33.9**.

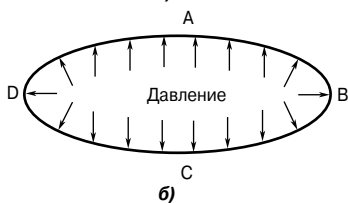
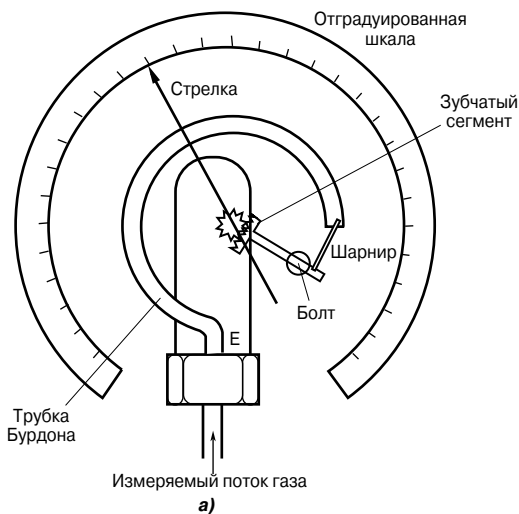


Рис. 33.8

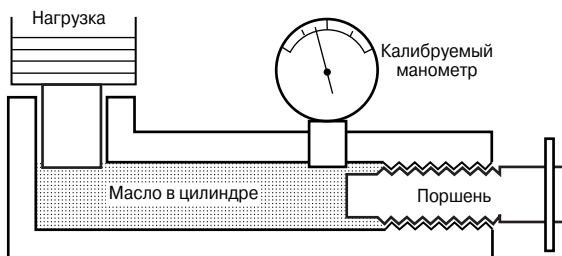


Рис. 33.9

Калибруемый манометр прикрепляют к тестирующему устройству, и вкручиваемый поршень или обод поднимает требуемое давление до тех пор, пока платформа с нагрузкой хоть немного не поднимется. Пока считываются показания манометра, нагрузку поворачивают, чтобы уменьшить эффект силы трения.

Вакуумные манометры

Вакуумные манометры — приборы, позволяющие наглядно (благодаря стрелке) увидеть, насколько давление текучей среды, приложенное к манометру, меньше, чем давление окружающей атмосферы.

К двум разновидностям вакуумных манометров относятся манометр Маклеода и манометр Пирани.

Манометр Маклеода

Показания *манометра Маклеода*, как правило, принимают за стандартные, и с его помощью калибруют вакуумные манометры других типов. Основной принцип его работы состоит в том, что он забирает какой-то известный объём газа под таким маленьким давлением, что его даже нельзя измерить, и потом сжимает газ в известном отношении до тех пор, пока давление не становится достаточно большим, чтобы его можно было измерить обычным манометром. Этот прибор используют для измерения низких давлений, обычно в диапазоне от 10^{-6} до 1.0 мм рт. ст. Недостаток манометра Маклеода в том, что он не позволяет непрерывно снимать показания и не подходит для фиксирования быстрых изменений давления.

Манометр Пирани

Манометр Пирани измеряет сопротивление, а следовательно, и температуру провода, по которому течёт ток. В диапазоне от 10^{-1} до 10^{-4} мм рт. ст. с давлением уменьшается теплопроводность, и поэтому благодаря росту сопротивления в этом диапазоне можно измерять давление. Манометр Пирани калибруется по показаниям манометра Маклеода.

34. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Идеальный газ — это газ, который полностью подчиняется приведённым далее уравнениям состояния газа. На практике никакой газ нельзя назвать идеальным, хотя воздух по своим свойствам очень близок к этому. Для удобства расчётов различием между идеальным и реальным газом часто пренебрегают.

Связи, существующие между давлением, объёмом и температурой идеального газа, зафиксированы в законах, называемых *уравнениями состояния газа*.

Закон Бойля—Мариотта

Закон Бойля—Мариотта гласит:

|| *Величина объёма V данной массы идеального газа обратно пропорциональна его абсолютному давлению p при постоянной температуре,*

то есть при постоянной температуре

$$p \sim \frac{1}{V},$$

или

$$p = \frac{k}{V},$$

или

$$pV = k,$$

где p — абсолютное давление в паскалях [Па],
 V — объём в кубических метрах [м^3],
 k — константа.

Изменения состояния газа, происходящие при постоянной температуре, называют *изотермическими процессами*.

Когда состояние массы газа, находящейся при постоянной температуре, изменяется от давления p_1 и объёма V_1 до давления p_2 и объёма V_2 , то

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Например, газ занимает объём 0.10 м^3 при давлении 1.8 МПа . Определим давление при уменьшении объёма до 0.06 м^3 при постоянной температуре.

Известно, что

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Тогда

$$(1.8)(0.10) = p_2(0.06),$$

откуда **давление**

$$p_2 = \frac{1.8 \times 0.10}{0.06} = 3 \text{ МПа}.$$

Закон Гей-Люссака

Закон Гей-Люссака гласит:

|| *Величина объёма V данной массы идеального газа при постоянном давлении прямо пропорциональна его температуре T ,*

то есть при постоянном давлении

$$V \sim T,$$

или

$$V = kT,$$

или

$$\frac{V}{T} = k,$$

где T — термодинамическая температура в кельвинах [К].

Процесс, происходящий при постоянном давлении, называют *изобарическим процессом*.

Связь между шкалой температур Цельсия и термодинамической, или абсолютной, шкалой выражается соотношением

$$\text{кельвин} = \text{градус Цельсия} + 273,$$

то есть

$$\boxed{\text{К} = \text{°C} + 273} \quad \text{или} \quad \boxed{\text{°C} = \text{К} - 273}$$

(см. гл. 29).

Если данная масса газа при постоянном давлении занимает объём V_1 при температуре T_1 , и объём V_2 при температуре T_2 , то

$$\boxed{\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}}$$

Например, газ занимает объём 1.2 литра при 20°C. Если давление остаётся постоянным, то объём, занимаемый газом при 130°C, определяется по формуле

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2},$$

откуда

$$V_2 = V_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = (1.2) \left(\frac{130 + 273}{20 + 273} \right) = (1.2) \left(\frac{403}{293} \right) = 1.65 \text{ литра.}$$

Закон Шарля

Закон Шарля гласит:

|| *Давление p данной массы идеального газа прямо пропорционально его термодинамической температуре T при постоянном объёме,*

то есть при постоянном объёме

$$pV \sim T,$$

или

$$p = kT,$$

или

$$\frac{p}{T} = k.$$

Процесс, происходящий при постоянном объёме, называют *изохорическим*.

Когда данная масса газа при постоянном объёме изменяется от давления p_1 и температуры T_1 до давления p_2 и температуры T_2 , то

$$\boxed{\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}}$$

Например, газ изначально имеет температуру 17°C и давление 150 кПа. Затем его нагревают при постоянном объёме до температуры 124°C . Полагая, что не произошло никаких потерь газа, его окончательное давление определяют в соответствии с формулой

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2},$$

откуда

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{(150)(397)}{290} = 205.3 \text{ кПа}.$$

Закон парциального давления (Закон Дальтона)

Закон парциального давления гласит:

||| Суммарное давление смеси газов в данном объёме при постоянной температуре равно сумме давлений каждого газа, если рассматривать каждый газ в отдельности.

Давление каждого газа в отдельности в данном объёме называют *парциальным давлением* данного газа.

Например, находящийся в ёмкости газ R имеет давление 200 кПа при температуре $+18^\circ\text{C}$. В ёмкость добавляют газ Q, и давление увеличивается до 320 кПа при той же температуре. Давление, при котором находится газ Q (при постоянной температуре), определяют, используя закон парциального давления:

$$p_Q = p - p_R = 320 - 200 = 120 \text{ кПа}.$$

Характеристическое уравнение состояния идеального газа

Зачастую бывает, что, когда газ претерпевает какие-то изменения, одновременно изменяются и давление, и температура, и объём. Если масса газа не изменилась, то приведённые выше законы можно объединить, и тогда получим

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = k$$

где k — константа.

Для идеального газа константа $k = mR$, где m — масса газа в килограммах, а R — молярная газовая постоянная.

В таком случае

$$\frac{pV}{T} = mR,$$

или

$$pV = mRT$$

Это уравнение называют *характеристическим уравнением состояния идеального газа*, где p — абсолютное давление в паскалях, V — объём в кубических метрах, m — масса газа в килограммах, R — молярная газовая постоянная, измеряемая в Дж/(кг·К), а T — термодинамическая температура в кельвинах.

Вот некоторые типичные значения молярной газовой постоянной R :

- воздух — 287 Дж/(кг·К),
- водород — 4 160 Дж/(кг·К),
- кислород — 260 Дж/(кг·К),
- углекислый газ — 184 Дж/(кг·К).

Например, некоторое количество воздуха при температуре 40°C и давлении 4 бара занимает объём 0.05 м³. Масса воздуха, при условии, что молярная газовая постоянная воздуха равна 287 Дж/(кг·К), определяется из уравнения

$$pV = mRT,$$

откуда масса воздуха:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(4 \times 10^5 \text{ Па})(0.05 \text{ м}^3)}{287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})(40 + 273) \text{ К}} = 0.223 \text{ кг, или } 223 \text{ г.}$$

Термин *стандартная температура и давление (СТД)* относится к температуре 0°C, то есть 273 К, и нормальному атмосферному давлению, то есть 101.325 кПа.

Кинетическая теория газов

Кинетическая теория газов предполагает, что газы состоят из движущихся частиц. В результате постоянного столкновения этих частиц с внутренней поверхностью стенок ёмкости, куда помещён газ, возникает давление. Чем больше плотность газа, тем более часто происходят столкновения молекул газа с поверхностью, а значит, тем большее давление в ёмкости с газом. Следовательно, давление растёт, либо когда объём определённой массы газа уменьшается, либо когда в сосуд с неизменным объёмом закачивается больше газа. Когда температура газа увеличивается, скорость молекул растёт, вызывая рост как числа самих столкновений, так и импульсов, возникающих в результате этих столкновений. Это объясняет рост давления газа с ростом температуры.

В 1860 г. Максвелл описал некоторые свойства газов, предположив, что молекулы газа совершают упругие столкновения, при этом время самого столкновения ничтожно мало, а сами эти молекулы занимают ничтожно малую часть объёма газа. Кроме того, сила притяжения молекул считалась тоже совсем незначительной.

Можно вывести формулу для газа, занимающего объём V при давлении p и содержащего n молекул, масса каждой из которых m и которые движутся со средней скоростью c :

$$pV = \frac{1}{2}mnc^2.$$

Кинетическая энергия молекул газа, кроме того, пропорциональна её термодинамической температуре.

Когда жидкость испаряется, молекулы, обладающие достаточной кинетической энергией, покидают поверхность жидкости. Чем выше температура жидкости, тем больше средняя кинетическая энергия молекул и тем больше число молекул, способных оторваться от поверхности. Так как покидают поверхность молекулы с наибольшей кинетической энергией, среднее значение кинетической энергии оставшихся молекул уменьшается, а значит, жидкость остывает.

При испарении жидкости образуется пар. Когда пар существует в присутствии своей же жидкости, возникает насыщенный пар. Если испаряется вся жидкость, то пар становится ненасыщенным. Чем выше температура, тем большее число молекул отрывается от поверхности жидкости, образуя пар. Эти молекулы «бомбят» стенки ёмкости и тем самым поднимают давление.

Давление насыщенного пара зависит только от температуры пара. В **Табл. 34.1** приведены значения давления насыщенного водяного пара при различной температуре. Жидкость закипает при такой температуре, когда давление её насыщенного пара

равно атмосферному давлению. Следовательно, если атмосферное давление растёт, вода будет закипать при температуре больше 100°C . На этом принципе основана работа *скороварки*.

Таблица 34.1

Температура [$^{\circ}\text{C}$]	Давление насыщенного водяного пара [10^3 Па]	Температура [$^{\circ}\text{C}$]	Давление насыщенного водяного пара [10^3 Па]
0	0.61	70	31.2
10	1.23	80	47.4
20	2.33	90	70.2
30	4.23	100	101
40	7.35	150	476
50	12.3	200	1550
60	19.9		

Насыщенный пар не подчиняется законам состояния газа, так как его давление зависит только от температуры. Поведение ненасыщенного пара соответствует этим законам довольно хорошо до тех пор, пока он остаётся ненасыщенным.

Если ненасыщенный пар при определённой температуре уменьшается в объёме, то его давление возрастает в соответствии с законом Бойля—Мариотта до тех пор, пока не достигнет давления насыщенного пара для этой температуры (**Рис. 34.1**).

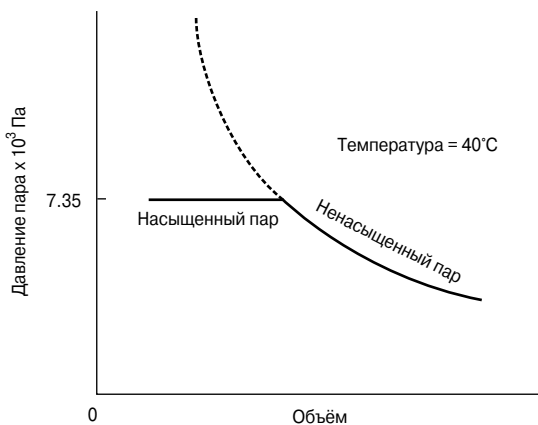


Рис. 34.1

Когда давление пара при 40°C достигает величины $7.35 \times 10^3 \text{ Па}$, пар становится насыщенным, поскольку начинает превращаться в жидкость.

35. СВОЙСТВА ВОДЫ И ПАРА

Закон сохранения энергии

Когда температура двух систем различна, передачу энергии от одной системы к другой называют *теплообменом*. Например, тепло от горячего металла, остывающего на воздухе, передаётся от горячего металла к холодному воздуху.

Закон сохранения энергии можно сформулировать так:

|| *Энергия не исчезает и не возникает.*

Так как тепло — это один из видов энергии, то этот закон применим и к процессам теплообмена.

Более удобная форма отражения этого закона для процессов теплообмена заключается в следующих соотношениях:

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{c} \text{начальная энергия} \\ \text{системы} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{энергия,} \\ \text{поступившая в систему} \end{array} \right) = \\ & = \left(\begin{array}{c} \text{конечная энергия} \\ \text{системы} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{энергия,} \\ \text{выделенная из системы} \end{array} \right), \end{aligned}$$

или

$$\begin{array}{c} \text{энергия,} \\ \text{поступившая} \\ \text{в систему} \end{array} = \left(\begin{array}{c} \text{изменение} \\ \text{энергии} \\ \text{в системе} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{энергия,} \\ \text{выделенная} \\ \text{из системы} \end{array} \right).$$

Внутренняя энергия

Текущие среды состоят из очень большого числа молекул, хаотически движущихся в этой среде. Когда среду нагревают, скорость молекул растёт, и тем самым растёт их кинетическая энергия. Из-за увеличения среднего расстояния между молекулами объём, содержащий среду, увеличивается, что приводит к росту потенциальной энергии текучей среды. *Внутренняя энергия* U текучей среды равна сумме внутренней кинетической и потенциальной энергий молекул, измеряемых в джоулях. Как правило, в задачах о теплопередаче нет необходимости знания всей величины внутренней энергии, так как имеет значение лишь её изменение.

Количество внутренней энергии текучей среды зависит от:

- типа среды (в газах молекулы сравнительно далеко находятся друг от друга и перемещаются с большой скоростью, соответственно внутренняя энергия газов больше, чем внутренняя энергия жидкостей);
- массы текучей среды (чем больше масса, тем больше молекул, а следовательно, тем больше внутренняя энергия);
- температуры (чем выше температура, тем больше скорость молекул).

Энтальпия и удельная энтальпия

Суммарную внутреннюю энергию и энергию давления текучей среды называют *энтальпией* среды и обозначают буквой H . Единица энтальпии — джоуль. Произведение давления p и объёма V определяет энергию давления или совершённую работу, то есть

$$\text{энергия давления} = pV \text{ Дж.}$$

Следовательно, энтальпия = внутренняя энергия + энергия давления (или совершённая работа), то есть

$$H = U + pV$$

Как и в случае внутренней энергии, действительное значение энтальпии обычно не играет большой роли, а вот её изменение, как правило, необходимо знать. В задачах о теплопередаче, где фигурируют пар и вода, считается, что последняя обладает нулевой энтальпией при стандартных давлении 101 кПа и температуре 0°C.

Слово «удельный» ассоциируется с величинами, которые определяются «на единицу массы». Аналогично *удельную энтальпию* получают путём деления энтальпии на массу, и обозначают буквой h . Следовательно, удельная энтальпия

$$h = \frac{\text{энтальпия}}{\text{масса}} = \frac{H}{m} .$$

Единица удельной энтальпии — джоуль на килограмм [Дж/кг].

Например, в замкнутой системе, то есть в системе, где масса текучей среды остаётся постоянной, внутренняя энергия меняется от 25 до 50 кДж, а совершённая системой работа равна 55 кДж. Тепло, переданное в систему для того, чтобы инициировать это изменение, задаётся соотношением

$$\begin{aligned} H &= U + pV = [(50 - 25) + 55] \text{ кДж} = \\ &= (25 + 55) \text{ кДж} = 80 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

То есть переданное системе тепло составляет 80 кДж.

Удельная энтальпия воды

Удельная энтальпия воды h_f при температуре $\theta^\circ\text{C}$ — это количество теплоты, необходимое, чтобы поднять температуру воды массой 1 кг от 0°C до $\theta^\circ\text{C}$. Эту величину называют также *физической теплотой* воды и определяют как произведение удельной теплоёмкости воды и изменения температуры от нуля до θ , то есть

$$h_f = c\theta$$

Хотя удельная теплоёмкость воды изменяется с температурой и давлением, как правило, её принимают равной 4.2 кДж/(кг·К), следовательно,

$$h_f = 4.2\theta \text{ кДж/кг.}$$

Насыщенный пар

При равномерном нагревании воды наступает момент (100°С при нормальном атмосферном давлении), когда дальнейший нагрев не приводит к росту температуры. Эта «застывшая» температура является *точкой кипения* воды t_{sat} (sat — от английского saturation — насыщение. — Прим. переводчика). По мере добавления теплоты к кипящей при постоянной температуре воде последняя превращается в пар, называемый *насыщенным* или *влажным*. Количество тепла, требуемого для нагрева одного килограмма воды до точки кипения, называют *удельной теплотой парообразования* или *скрытой теплотой* h_{fg} . Единица удельной теплоты парообразования одинакова с единицей удельной энтальпии, то есть Дж/кг.

Полная удельная энтальпия воды h_g в точке кипения равна сумме физической теплоты h_f и удельной теплоты парообразования h_{fg} , то есть

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

Коэффициент влажности

Если определённого количества теплоты в системе «вода — насыщенный пар» не хватает для того, чтобы превратить всю воду в пар, то отношение

$$\frac{\text{масса насыщенного пара}}{\text{общая масса пара и воды}}$$

называют *коэффициентом влажности* пара и обозначают буквой q . Такой пар называют *влажным паром*, и его полная энтальпия h равна сумме физической теплоты h_f и удельной теплоты преобразования, умноженной на коэффициент влажности пара qh_{fg} , то есть

$$h = h_f + qh_{fg}$$

Ненасыщенный пар

Когда определённое количество теплоты, добавленное к кипящей воде, достаточно для того, чтобы превратить всю воду в пар, то такой пар называют либо *ненасыщенным*, либо *сухим паром*. Дальнейшее добавление теплоты приводит к росту температуры, и такое состояние называют *перегретым паром*. Удель-

ная энтальпия собственно перегретого пара выше удельной энтальпии сухого пара и равна

$$c(t_{\text{sup}} - t_{\text{sat}}),$$

где c — удельная теплоёмкость пара,

t_{sup} — температура перегретого пара

(индекс sup от английского superheated — перегретый. — Прим. переводчика).

Полная удельная энтальпия перегретого пара равна

$$h_f + h_{fg} + c(t_{\text{sup}} - t_{\text{sat}})$$

или

$$h_g + c(t_{\text{sup}} - t_{\text{sat}}).$$

График «температура/удельная энтальпия»

Взаимосвязь между температурой и удельной энтальпией можно показать графически. На **Рис. 35.1** приведён типичный график зависимости «температура/удельная энтальпия».

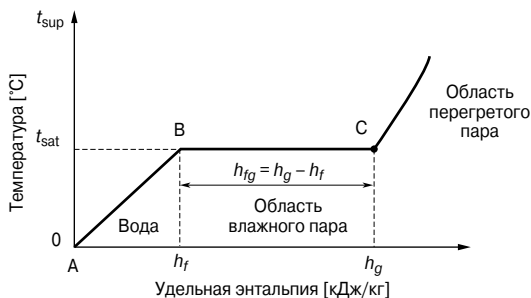


Рис. 35.1

На рисунке отрезок АВ характеризует область физической теплоты, где любое увеличение энтальпии вызывает соответствующий рост температуры. Отрезок ВС называют прямой испарения, а точки отрезка В и С характеризуют область влажного пара (или область скрытой энергии), точка С характеризует сухой пар. Точки справа от С характеризуют область перегретого пара.

Таблицы параметров парообразования

Точка кипения воды t_{SAT} и различные удельные энтальпии, ассоциирующиеся с водой и паром [h_f , h_{fg} и $c(t_{\text{sup}} - t_{\text{sat}})$], изменяются с изменением давления. Эти значения при разных давлениях были объединены в *таблицы образования паров*. Некоторые выдержки из них представлены в **Табл. 35.1** и **Табл. 35.2**.

Таблица 35.1

Давление		Точка кипения t_{SAT} [°C]	Удельная энтальпия [кДж/кг]		
[бар]	[кПа]		Кипящая вода h_f	Скрытая теплота h_{fg}	Насыщенный пар h_g
1	100	99.6	417	2 258	2 675
1.5	150	111.4	467	2 226	2 693
2	200	120.2	505	2 202	2 707
3	300	133.5	561	2 164	2 725
4	400	143.6	605	2 134	2 739
5	500	151.8	640	2 109	2 749
6	600	158.8	670	2 087	2 757
7	700	165.0	697	2 067	2 764
8	800	170.4	721	2 048	2 769
9	900	175.4	743	2 031	2 774
10	1 000	179.9	763	2 015	2 778
15	1 500	198.3	845	1 947	2 792
20	2 000	212.4	909	1 890	2 799
30	3 000	233.8	1 008	1 795	2 803
40	4 000	250.3	1 087	1 714	2 801

Таблица 35.2

Давление		Точка кипения t_{SAT} [°C]	Насыщенный пар h_g	Удельная энтальпия [кДж/кг] Перегретый пар при				
[бар]	[кПа]			200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
1	100	99.6	2 675	2 876	2 975	3 075	3 176	3 278
1.5	150	111.4	2 693	2 873	2 973	3 073	3 175	3 277
2	200	120.2	2 707	2 871	2 971	3 072	3 174	3 277
3	300	133.5	2 725	2 866	2 968	3 070	3 172	3 275
4	400	143.6	2 739	2 862	2 965	3 067	3 170	3 274
5	500	151.8	2 749	2 857	2 962	3 065	3 168	3 272
6	600	158.8	2 757	2 851	2 958	3 062	3 166	3 270
7	700	165.0	2 764	2 846	2 955	3 060	3 164	3 269
8	800	170.4	2 769	2 840	2 951	3 057	3 162	3 267
9	900	175.4	2 774	2 835	2 948	3 055	3 160	3 266
10	1 000	179.9	2 778	2 829	2 944	3 052	3 158	3 264
15	1 500	198.3	2 792	2 796	2 925	3 039	3 148	3 256
20	2 000	212.4	2 799	—	2 904	3 025	3 138	3 248
30	3 000	233.8	2 803	—	2 858	2 995	3 117	3 231
40	4 000	250.3	2 801	—	—	2 963	3 094	3 214

В **Табл. 35.1** в столбцах слева показано давление в барах и киплопасалях и точка кипения воды. В столбцах справа даны соответствующие значения удельных энтальпий воды (h_f) и сухого пара (h_g), а также удельная энтальпия скрытой теплоты парообразования (h_{fg}). В **Табл. 35.2** столбцы справа дают значения энтальпий сухого пара (h_g) и перегретого пара при различных температурах

Установленные значения относятся к нулевой энтальпии. Однако если степень перегрева задана, то это относится и к температуре насыщения. Следовательно, при давлении 100 кПа, в столбце для удельной энтальпии, к примеру, 250°C стоит значение степени перегрева (250 – 99.6)°C, что соответствует 150.4°C.

Например, допустим, что некоторое количество насыщенного пара при давлении 1.0 МПа остывает при постоянном давлении до тех пор, пока его относительная влажность не будет равна 0.6. Изменение удельной энтальпии пара определяется следующим образом.

Из **Табл. 35.1** определяем, что удельная энтальпия сухого пара h_g при давлении 1.0 МПа (то есть 1 000 кПа) равна 2 778 кДж/кг. Как говорилось ранее, удельная энтальпия влажного пара равна $h_f + qh_{fg}$. При давлении 1.0 МПа h_f равна 763 кДж/кг, а h_{fg} – 2 015 кДж/кг.

Следовательно, удельная энтальпия влажного пара равна

$$763 + (0.6 \times 2\,015) = 1\,972 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение удельной энтальпии = 2 778 – 1 972 = **806 кДж/кг.**

Другой пример. Допустим, пар выходит из бойлера при давлении 3.0 МПа и температуре 400°C. Степень перегрева можно определить по **Табл. 35.2**. При давлении 3.0 МПа (или 3 000 кПа), точка кипения равна 233.8°C, следовательно, степень перегрева равняется (400 – 233.8) = 166.2°C.

Удельная энтальпия перегретого пара при давлении 3.0 МПа и температуре 400°C дана в **Табл. 32.2**, и это значение равно 3 231 кДж/кг.

Перегретый пар ведёт себя так, как если бы он был идеальным газом. Поэтому уравнения состояния газа, приведённые в гл. 34, можно использовать для определения взаимосвязей между давлением, объёмом и температурой перегретого пара.

36. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ВЯЗКОСТЬ

Поверхностное натяжение

Сила притяжения между молекулами жидкости вызывает эффект, называемый *поверхностным натяжением*.

Поверхностное натяжение жидкости γ — это сила на единицу длины, действующая на поверхность перпендикулярно к одной стороне прямой на этой поверхности.

Свободная энергия поверхности σ — это энергия, необходимая для создания дополнительной единицы площади в противовес силам притяжения молекул. Поверхностное натяжение γ и свободная энергия поверхности σ численно равны, как показано ниже.

Рассмотрим проволочную рамку (Рис. 36.1), на которой находится мыльная плёнка.

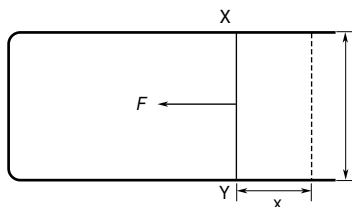


Рис. 36.1

XY — это скользящая проволока. Длина мыльной плёнки, соприкасающейся со скользящей проволокой, равна l . Сила F , возникающая из-за поверхностного натяжения на проволоке XY, равна $2\gamma l$, а число 2 появляется из-за того, что у мыльной плёнки две поверхности. γ — это поверхностное натяжение мыльной плёнки. Если скользящая проволока перемещается на расстояние x вправо, совершённая работа против силы поверхностного натяжения равна $2\gamma lx$.

Следовательно, рост поверхностного натяжения равен $2lx$. Отсюда энергия, необходимая для создания дополнительной единицы площади плёнки, равна

$$\frac{2\gamma lx}{2lx} = \gamma.$$

Но это — определение свободной энергии поверхности σ . Следовательно, σ численно равна γ .

Из-за разности между когезионной силой между молекулами жидкости и адгезионной силой между молекулами жидкости и молекулами твёрдых тел поверхность жидкости обычно искрив-

лена там, где она соприкасается с твёрдым телом. Например, как видно на **Рис. 36.2**, поверхность воды в стеклянной трубке вогнута, а поверхность ртути в стеклянной трубке выпукла.

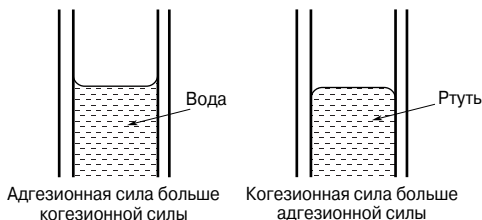


Рис. 36.2

Угол соприкосновения θ определяется как угол между поверхностью твёрдого тела и касательной к поверхности жидкости в точке соприкосновения. Угол θ откладывают со стороны жидкости, как показано на **Рис. 36.3**.

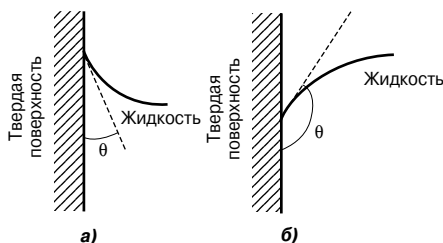


Рис. 36.3

Если $\theta < 90^\circ$, то говорят, что жидкость «увлажняет» твёрдую поверхность.

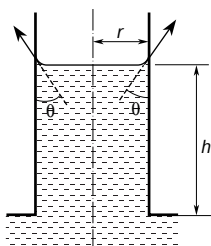


Рис. 36.4

Жидкости, у которых $\theta < 90^\circ$, поднимаются в трубке с небольшим внутренним диаметром (например, в капиллярной трубке). На **Рис. 36.4** изображена жидкость, поднимающаяся на высоту h в капиллярной трубке радиуса r .

Сила, возникающая из-за поверхностного натяжения, действующая на мениск, зависит от длины окружности мениска и поверхностного натяжения γ .

Направленная вверх вертикальная составляющая силы, возникающей в результате поверхностного натяжения, равна

$$\gamma \times \text{длина окружности} \times \cos\theta = \gamma(2\pi r) \cos\theta.$$

Вертикальная сила, направленная вниз на столб жидкости, — вес жидкости:

$$\begin{aligned} \text{вес жидкости} &= \text{объём} \times \text{плотность} \times \begin{array}{c} \text{гравитационное} \\ \text{поле Земли} \end{array} = \\ &= (\pi r^2 h) \rho g. \end{aligned}$$

Эти две силы равны, так как

$$\gamma(2\pi r) \cos\theta = (\pi r^2 h) \rho g.$$

Тогда высота поднимающейся жидкости равна

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{r\rho g}$$

Например, если поверхностное натяжение ртути при 20°C равно 0.465 Н/м и угол её соприкосновения со стеклом равен 140°, то капиллярный подъём (высота) h ртути в капиллярной трубке внутреннего радиуса 2 мм равен

$$\begin{aligned} h &= \frac{2\gamma \cos\theta}{r\rho g} = \frac{2(0.465)(-0.766)}{(2 \times 10^{-3})(13.6 \times 10^3)(9.81)} = \\ &= -2.67 \text{ мм.} \end{aligned}$$

(Отрицательный знак означает, что уровень ртути в капиллярной трубке на границе соприкосновения со стеклом снижается.)

Избыточное давление

Можно показать, что внутри капли жидкости сферической формы существует давление, превышающее давление окружающего воздуха на величину, равную $\frac{2\gamma}{R}$, где R — радиус капли. Такое давление называется *избыточным давлением*.

- Для сферической капли жидкости в воздухе избыточное давление равно $\frac{2\gamma}{R}$.
- Для пузырька газа в жидкости избыточное давление также равно $\frac{2\gamma}{R}$.
- Для мыльного пузыря в воздухе избыточное давление равно $\frac{4\gamma}{R}$, так как у мыльного пузыря две поверхности.

Энергия разрыва межмолекулярных связей

Зная свободную энергию поверхности жидкости, можно найти величину энергии, необходимую для разрыва межмолекулярных связей. Молекула, движущаяся к поверхности жидкости, обладает определённым числом ближайших соседей, сократившимся у поверхности с десяти до пяти. Если n — число молекул на единицу площади поверхности, тогда $\frac{5n}{2}$ связей будут разорваны на каждой единице площади созданной поверхности, а $\frac{5n\varepsilon}{2}$ — энергия, необходимая в таком случае (ε — энергия, необходимая для разрыва одной молекулярной связи). Следовательно, так как σ (силовая поверхностная энергия) — это энергия, необходимая для создания единицы площади поверхности, то

$$\sigma = \frac{5n\varepsilon}{2},$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{2\sigma}{5n}.$$

Молярная скрытая энергия испарения

Молярная скрытая энергия испарения вещества — это энергия, необходимая для испарения одного моля вещества при нормальном давлении. В твёрдом веществе с кристаллической структурой, кристаллы которого имеют шестиугольную форму и плотно сгруппированы, каждый атом имеет двенадцать ближайших соседей. В жидкости у каждого атома есть около десяти ближайших соседей. Когда твёрдое вещество превращается в жидкое, молекулярные связи должны разорваться, и каждый его атом потеряет две связи. В парообразном состоянии у атома вещества нет соседей, и, следовательно, при испарении каждый атом жидкости теряет десять связей.

В одном моле содержится 6×10^{23} атомов, а это значит, что если каждый атом имеет десять ближайших соседей, то всего надо разорвать $\frac{10 \times 6 \times 10^{23}}{2}$ связей.

Делитель 2 появляется из-за того, что каждая связь соединяет два атома. Следовательно, молярная скрытая энергия — это $5N_A\varepsilon$, где N_A — число атомов в одном моле, то есть

$$\text{молярная скрытая энергия} = 5N_A \left(\frac{2\sigma}{5n} \right) = \frac{2N_A\sigma}{n}.$$

Следовательно, жидкости с высокими значениями σ должны иметь высокие значения молярной скрытой энергии испарения, что подтверждается экспериментально.

Вязкость

Жидкости (и газы) при взаимодействии с твёрдым веществом прилипают к его поверхности. Если жидкость разлить по поверхности твёрдого вещества, то её можно рассматривать послойно. Самый нижний слой находится во взаимодействии с твёрдым веществом и пребывает в состоянии покоя. Остальные слои скользят друг по другу и могут перемещаться со скоростями, увеличивающимися в зависимости от расстояния данного слоя до поверхности твёрдого вещества. Такое движение, называемое *ламинарным потоком*, показано на **Рис. 36.5**.

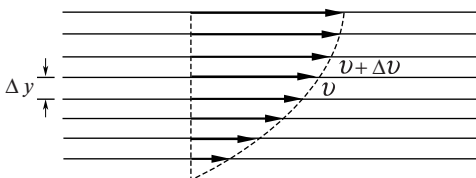


Рис. 36.5

Если скорость возрастает и превышает некоторое допустимое значение, слои перемешиваются, и поток становится *турбулентным*, и его послойное описание в таком случае больше неправомерно. На **Рис. 36.5** стрелками обозначены скорости различных слоёв. Это состояние существует до тех пор, пока на жидкость действует усилие сдвига. Противоположное состояние называется *вязкостью* жидкости.

Рассмотрим два параллельных слоя жидкости, разделённых расстоянием Δy и движущихся со скоростью v и $v + \Delta v$, где Δv – приращение скорости. Нижележащий слой препятствует течению верхнего слоя и действует на последний с тормозящей силой F , причём сам он испытывает силу ускорения F , с которой на него действует верхний слой.

Касательное (тангенциальное) напряжение между двумя слоями равно

$$\frac{F}{A},$$

где A – контактная площадь между слоями.

Отношение $\frac{\Delta v}{\Delta y}$ называют *градиентом скорости*.

Для некоторых жидкостей

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y},$$

где η – постоянная, называемая *коэффициентом вязкости*.

Следовательно, коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{\text{касательное напряжение}}{\text{градиент скорости}}.$$

Коэффициент вязкости жидкости η обычно уменьшается с ростом температуры, хотя «вязкостатические» масла почти не подвержены влиянию температуры. Единица измерения коэффициента вязкости — Н·с/м, или кг/м·с (так как $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$).

Формула Пуазейля

Формула Пуазейля для ламинарного потока определяет объём жидкости V , проходящей по трубе круглого сечения за одну секунду, то есть

$$V = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l}$$

где r — радиус трубы,
 p — разность давлений на концах трубы,
 l — длина трубы,
 η — коэффициент вязкости жидкости.

Например, на **Рис. 36.6** показан поток воды, текущей из ёмкости в резервуар по трубе длиной 1 м с внутренним радиусом 2 мм.

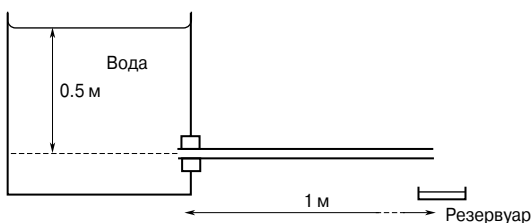


Рис. 36.6

Определим скорость, с которой вода собирается в небольшом резервуаре, если вязкость воды равна 1×10^{-3} кг/м·с.

В соответствии с формулой Пуазейля объём воды V , попадающий в резервуар за одну секунду, равен

$$V = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l},$$

где разность давлений на концах трубы

$$p = h \rho g = (0.5 \times 10^3)(9.81).$$

Отсюда

$$V = \frac{\pi(0.5 \times 10^{-3})(9.81)(2 \times 10^{-3})^4}{8(1 \times 10^{-3})(1)} =$$

$$= 3.08 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Эта скорость не будет поддерживаться постоянной, потому что уровень воды в ёмкости падает и давление p растёт.

Закон Стокса

Закон Стокса определяет силу сопротивления среды F , действующую на тело сферической формы, перемещающееся в ламинарном потоке жидкости определённой вязкости, то есть

$$F = 6\pi\eta r v$$

где r — радиус сферы,
 v — скорость сферы.

Например, определим конечную скорость x стального шарика радиусом 1 мм, падающего в ламинарный поток воды, текущей с постоянной скоростью (вязкость воды — 1×10^{-3} кг/(м·с), плотность воды — 1×10^3 кг/м, плотность стали — 7.8×10^3 кг/м).

Объём сферы равен $\frac{4}{3}\pi r^3$, следовательно,

$$\text{вес шарика} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g,$$

где ρ — плотность стали,
 g — ускорение свободного падения.

Объём перемещённой жидкости равен $\frac{4}{3}\pi r^3$, следовательно,

$$\text{выброс (то есть вес перемещённой жидкости)} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g,$$

где ρ_0 — плотность жидкости.

Когда конечная скорость достигнута, равнодействующая всех сил, действующих на тело, становится равна нулю. Следовательно,

$$\text{вес} = \text{сопротивление среды} + \text{выброс},$$

то есть

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = 6\pi\eta r v + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g,$$

откуда

$$6\pi\eta r v = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \text{конечная скорость } v &= \frac{\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g}{6\pi\eta r} = \frac{2r^2g(\rho - \rho_0)}{9\eta} = \\ &= \frac{2(1 \times 10^{-3})^2(9.81)(7.8 \times 10^3 - 1 \times 10^3)}{9(1 \times 10^{-3})} = \mathbf{14.8 \text{ м/с}}. \end{aligned}$$

37. ТЕКУЧИЕ СРЕДЫ В ДВИЖЕНИИ

Уравнение Бернулли

Уравнение Бернулли — это уравнение, отражающее принцип сохранения энергии в применении к *текучим средам* в движении:

$$\boxed{\frac{p}{w} + \frac{v^2}{2g} + Z = \text{const}} \quad (1)$$

или

$$\boxed{\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + Zg = \text{const}} \quad (2)$$

Все величины слева от знака равенства каждого уравнения применимы к заданной точке движущейся текучей среды:

- p — давление (манометрическое давление, если не указано другого),
- w — удельный вес (вес в единице объёма),
- v — скорость,
- g — ускорение свободного падения,
- Z — высота над заданным уровнем отсчёта,
- ρ — плотность (масса в единице объёма).

Два существенных различия между применением закона сохранения энергии в приведённом виде и его применением в отношении поведения движущихся твёрдых тел заключаются в следующем:

- данное применение пригодно для *потока массы* (или веса) устойчивого процесса в секунду, а не для фиксированной заданной массы или веса;
- третья форма энергии, то есть энергия давления, должна приниматься в расчёт (соответствующая форма энергии в применении к твёрдым телам (энергия деформации) встречается лишь изредка).

Каждая составляющая в формуле (1) характеризует энергию на единицу веса текучей среды. Основной единицей всех составляющих является метр, то есть

$$\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \quad \text{или} \quad \frac{\text{Дж}}{\text{Н}}.$$

Основная единица давления такая же, как и для напряжения, — $\text{Н}/\text{м}^2$ или паскаль [Па]. Каждая составляющая уравнения называется *напором*.

$\frac{p}{w}$ — это *гидростатический напор* $\left(\frac{\text{Н}/\text{м}^2}{\text{Н}/\text{м}^3} = [\text{м}]\right)$.

$\frac{v^2}{2g}$ — это скоростной, или *динамический напор* $\left(\frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}/\text{с}^2} = [\text{м}]\right)$.

Z — это *потенциальный напор* [м].

Сумма этих трёх напоров называется *суммарным напором* H .

Уравнение (2) характеризует энергию на единицу массы.

На практике, как и в случае с твёрдыми телами, имеет место некоторая потеря энергии в результате выделения тепла. Борьба с такими потерями — важный аспект механики текущих сред.

Если труба наполнена текущей жидкостью, то объёмный расход потока V , то есть объём жидкости, проходящей за секунду, должен быть равным на всех участках трубы: $V = A_1 v_1 = A_2 v_2$, где A_1 и v_1 — соответственно площадь поперечного сечения и скорость на выбранном отрезке, A_2 и v_2 — площадь и скорость на втором участке. Уравнение

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

называют *уравнением непрерывности*.

Основная единица объёмного расхода потока V — кубический метр в секунду [$\text{м}^3/\text{с}$]. Это достаточно крупная величина. Меньшая и чаще применяемая единица — литр в секунду [$\text{л}/\text{с}$].

Потоки с очень малым расходом измеряют в литрах в минуту [$\text{л}/\text{мин}$].

$$1 \text{ л/с} = 1\,000 \text{ см}^3/\text{с} = 1 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$1 \text{ л/мин} = 0.017 \text{ л/с}.$$

Например, определим суммарный напор потока воды в трубе диаметром 32 мм в точке, где давление равно 28.4 кПа. Расход потока воды в трубе равен 2.8 л/с, исходный уровень — 1.84 м.

$$\text{Скорость потока } v = \frac{V}{A} = \frac{2.8 \times 10^{-3} (\text{м}^3/\text{с})}{\frac{\pi}{4} (32)^2 \times 10^6 \text{ м}^2} = 3.4815 \text{ м/с}.$$

$$\text{Динамический напор } \frac{v^2}{2g} = \frac{(3.4815)^2}{2(9.81)} = 0.6178 \text{ м}.$$

$$\text{Удельный вес } w = \rho g = (1\,000 \text{ кг/м}^3)(9.81 \text{ м/с}^2) = 9.81 \text{ кН/м}^3.$$

$$\text{Гидростатический напор } \frac{p}{w} = \frac{28.4 \text{ кПа}}{9.81 \text{ кН/м}^2} = 2.895 \text{ м}.$$

$$\text{Потенциальный напор } Z = 1.84 \text{ м}.$$

Таким образом, **суммарный напор**

$$H = \frac{p}{w} + \frac{v^2}{2g} + Z = 2.895 + 0.6178 + 1.84 = \mathbf{5.353 \text{ м}}.$$

Поток через отверстия

Вода, вытекающая из резервуара в виде горизонтальной струи, как показано на **Рис. 37.1**, имеет только *скоростной* (динамический) напор, если за исходный уровень принят уровень отверстия.

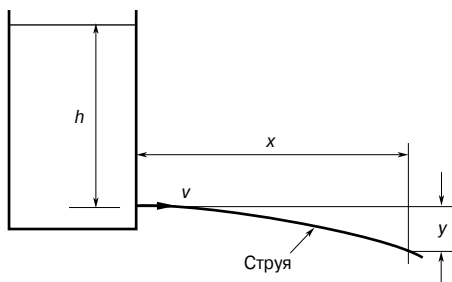


Рис. 37.1

Вода, которая в конце концов образует струю, начинает свой путь от верхней поверхности резервуара с потенциальным напором, равным h . Вычисляем по формуле начальный потенциальный напор и заключительный скоростной напор.

$$\frac{v^2}{2g} = h,$$

откуда

$$v = \sqrt{2gh}.$$

На практике имеет место некоторая потеря энергии.

Отношение $\frac{\text{реальная скорость струи}}{\text{теоретическая скорость струи}}$ называется *коэффициентом скорости* C_v отверстия. Действительную скорость можно получить благодаря точному определению координат точек x и y на траектории струи.

Диаметр струи, как выясняется на практике, меньше диаметра отверстия. Отношение $\frac{\text{площадь поперечного сечения}}{\text{площадь отверстия}}$ называется *коэффициентом сужения* C_c отверстия.

Отношение $\frac{\text{реальная скорость истечения}}{\text{теоретическая скорость истечения}}$ называется *коэффициентом истечения* C_d отверстия.

Однако

$$\frac{\text{реальная скорость истечения}}{\text{теоретическая скорость истечения}} = \frac{\text{реальная скорость струи} \times \text{площадь поперечного сечения струи}}{\text{теоретическая скорость струи} \times \text{площадь отверстия}},$$

то есть

$$C_d = C_v \times C_c$$

Например, определим толщину слоя воды в резервуаре с отверстием диаметром 12.3 мм в дне, при которой скорость истечения воды через это отверстие была бы равна 0.25 литра в секунду (коэффициенты сужения струи и скорости равны 0.64 и 0.96 соответственно).

Теоретическая скорость вытекания из резервуара

$$\begin{aligned} V &= A v = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \sqrt{2gh} = \frac{\pi(0.0125)^2}{4} \sqrt{(2)(9.81)h} = \\ &= 0.00054357 \sqrt{h} \text{ м}^3/\text{с} , \end{aligned}$$

или

$$V = 0.54357 \sqrt{h} \text{ литр/с} ,$$

где h измеряется в метрах.

Коэффициент истечения $C_d = C_v \times C_c = 0.96 \times 0.64 = 0.6144$.

Однако

$$C_d = \frac{\text{реальная скорость истечения}}{\text{теоретическая скорость истечения}} ,$$

следовательно,

$$\begin{aligned} &(\text{реальная скорость истечения}) = \\ &= (C_d) \times (\text{теоретическая скорость истечения}) = \\ &= (0.6144)(0.54357 \sqrt{h}) = \\ &= 0.33397 \sqrt{h} \text{ литр/с} . \end{aligned}$$

Поскольку реальная скорость истечения равна 0.25 л, то

$$0.25 = 0.33397 \sqrt{h} ,$$

откуда **толщина слоя**

$$h = \left(\frac{0.25}{0.33397} \right)^2 = 0.5604 \text{ м} = \mathbf{560.4 \text{ мм}} .$$

Удар струи

Сила, с которой струя воды действует на платформу согласно третьему закону Ньютона, равна и противоположна по направлению силе, с которой платформа действует на струю. По второму закону Ньютона это равно скорости изменения импульса воды.

$$\text{Скорость изменения импульса} = \frac{\text{масса} \times \text{изменение скорости}}{\text{время}} .$$

В случае твёрдого тела это утверждение соответствует уравнению

$$\text{масса} \times \frac{\text{изменение скорости}}{\text{время}} = \text{масса} \times \text{ускорение} .$$

В случае же процесса, где поток жидкости непрерывен, это уравнение принимает вид:

$$\frac{\text{масса}}{\text{время}} \times \text{изменение скорости} = \\ = \text{массовый расход потока} \times \text{изменение скорости} = Mv.$$

В случае когда струя ударяет по плоской платформе под прямым углом, как показано на **Рис. 37.2**, окончательная скорость в начальном направлении равна нулю, и поэтому v — это изменение скорости в этом направлении.

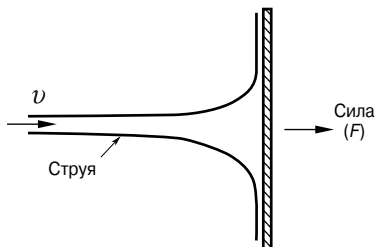


Рис. 37.2

Если d — диаметр струи, то

$$M = V\rho = Av\rho = \frac{\pi d^2}{4} v\rho.$$

Сила, действующая на платформу, равна

$$F = Mv = \frac{\pi d^2}{4} v^2 \rho.$$

Если диаметр струи дан в метрах, скорость струи — в метрах в секунду, плотность — в килограммах на кубический метр, а скорость массы потока M — в килограммах в секунду, то сила, действующая на платформу, выразится в ньютонах.

Например, пусть струя воды диаметром 12.5 мм и скоростью 40 м/с бьёт в неподвижную плоскую платформу под прямым углом. Тогда

массовый расход потока

$$M = Av\rho = \frac{\pi d^2}{4} v\rho = \frac{\pi(0.0125)^2}{4} (40)(1\,000) = 4.9087 \text{ кг/с}.$$

Тогда

сила, действующая на платформу, равна

$$F = Mv = (4.9087 \text{ кг/с})(40 \text{ м/с}) = 196.3 \text{ кгм/с}^2 = \mathbf{196.3 \text{ Н}}.$$

38. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Измерение потоков жидкостей и газов (то есть текучих сред) необходимо во многих промышленных процессах, например: для контроля за воздушными потоками в вентиляционных каналах угольной шахты, за расходом воды в конденсаторе на электростанции, за расходом жидкости в химических процессах; для управления заправкой горючим и маслом; охлаждением текучих веществ в двигателях кораблей и самолётов и т. д. Подсчёт расхода жидкости — это один из наиболее сложных видов измерений на производстве, так как поведение потока зависит от очень многих переменных, включая физические свойства текучих сред.

Существует большое количество приборов, измеряющих расход жидкости. Обычно их называют *расходомерами*. Они могут измерять расход жидкости (в $\text{м}^3/\text{с}$) или удельный массовый расход газообразных сред (в $\text{кг}/\text{с}$). Все расходомеры делятся на две основные группы: *дифференциальные расходомеры* и *механические расходомеры*.

Дифференциальные расходомеры

Когда в трубопровод устанавливают расходомеры определённых видов, они зачастую мешают продвижению текучей среды из-за того, что уменьшают площадь поперечного сечения трубы. Это вызывает изменение скорости текучей среды, что сказывается на давлении. На **Рис. 38.1** показан сегмент трубы с установленным в нём расходомером.

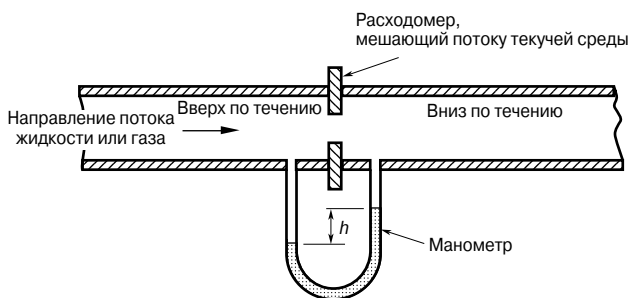


Рис. 38.1

Расход газа или жидкости можно определить, измерив разность давлений на стенке трубы на определённом расстоянии от расходомера вверх и вниз по течению. Такие приборы называют *дифференциальными расходомерами*.

Разность давлений в сегменте трубы, изображённой на **Рис. 38.1**, измеряется с помощью манометра, подсоединённого в точках, где требуется определить величину давления. Из рисунка следует, что вверх по течению относительно расходомера давление выше. Разность давлений показана как высота столба h .

Калибровка манометра должна учитывать формы преграды, положение точек контроля давления и физические свойства среды.

В промышленности разность давлений определяется с помощью дифференциального динамометрического элемента, на выходе которого получают значение либо в виде усиленной манометрической величины давления, либо в виде электрического сигнала.

К наиболее распространённым дифференциальным расходомерам относятся:

- измерительная диафрагма;
- трубка Вентури;
- мерное сопло;
- труба воздушного давления.

Британский справочник стандартов BS 1042: Часть 1: 1964 и Часть 2А: 1973 «Методы измерения расхода жидкости или газа в трубопроводах» даёт спецификации для измерения, производства, допуска, точности, размера, и прочих параметров различных расходомеров.

Измерительная диафрагма

Устройство

Измерительная диафрагма состоит из круглой тонкой плоской плиты с отверстием в центре. Диаметр отверстия меньше трубопровода, в который устанавливается эта плита. Типичное сечение такой установки показано на **Рис. 38.2а**.

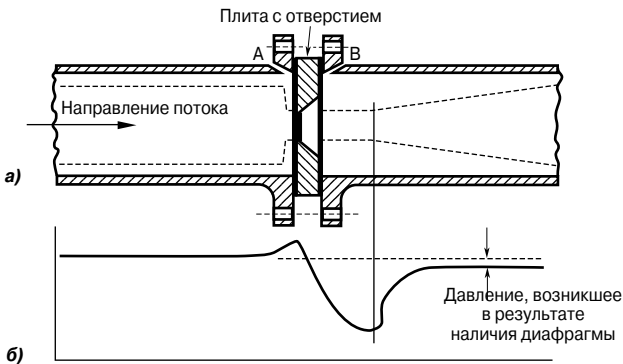


Рис. 38.2

Измерительные диафрагмы для работы в промышленных условиях изготавливают из нержавеющей стали, медно-никелевого сплава, полиэфирного стекловолокна, а для больших труб, таких, как канализационные системы и газовые трубопроводы, из кирпича и бетона.

Принципы работы

Когда газ или жидкость текут через сужение в трубе, поток ускоряется, и происходит понижение давления, значение которого связано с расходом текучей среды. Изменение давления рядом с измерительной диафрагмой показано на **Рис. 38.26**. Минимальное давление приходится на точку, расположенную вниз по течению относительно диафрагмы, там, где поток среды самый узкий. Это точка минимальной площади поперечного сечения струи, называемая «сжатое сечение» (местное сужение потока). За этой точкой давление растёт, но ниже по течению так и не достигает первоначального значения. Имеет место постоянная потеря давления. Эта потеря зависит от размера и типа диафрагмы, точек контроля давления выше и ниже по течению, а также от изменения скорости среды между точками контроля, которая зависит от расхода жидкости или газа, а также от размеров измерительной диафрагмы.

На **Рис. 38.2а** угловые патрубки для контроля давления показаны в точках А и В. Если диафрагма установлена в трубопровод диаметром d , патрубки для контроля давления зачастую размещают на расстояниях d и $d/2$ от диафрагмы — соответственно, вверх и вниз по течению. Структура потока на расстоянии d от диафрагмы не подвержена воздействию установленной диафрагмы, а на расстоянии $d/2$ возникает местное сужение потока.

Достоинства измерительных диафрагм

К достоинствам измерительных диафрагм следует отнести:

- относительную дешевизну;
- возможность встроить их между существующей парой фланцев трубы ввиду малой толщины диафрагмы.

Недостатки измерительных диафрагм

К недостаткам измерительных диафрагм следует отнести:

- острые края диафрагмы, которые могут со временем обветшать, вызывая ошибки градуировки;
- возможное скопление посторонних веществ в месте сужения потока;
- значительные потери давления ниже по течению потока относительно диафрагмы.

Применение

Измерительные диафрагмы обычно используют в трубах средних и больших размеров, и лучше всего они подходят для наблюдения и контроля над постоянным расходом жидкости или газа. Их применяют в основных отраслях промышленности.

Трубка Вентури

Устройство

Трубка Вентури — это прибор для точных измерений расхода текучей среды в трубопроводах. Типичное устройство сегмента такого прибора показано на **Рис. 38.3**.

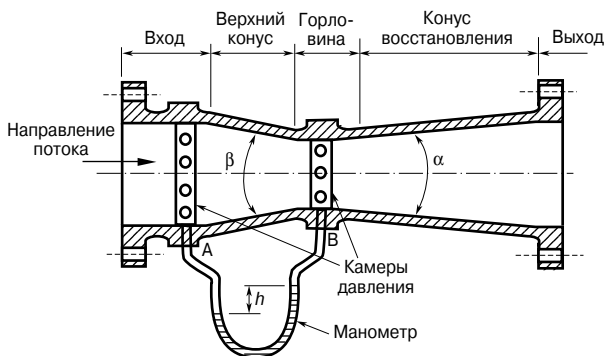


Рис. 38.3

Он состоит из короткой сужающейся трубы конусообразной формы, называемой *водоприёмником* (впускной патрубком) или верхним конусом, который ведёт к цилиндрической части, называемой *горловиной*.

Затем следует секция преломления (рассеивания), называемая *выпуском* или *конусом восстановления*. Диаметры входа и выхода равны между собой и одинаковы с диаметром трубы, в которую вставлено устройство. Угол β обычно не превышает 21° , при этом сужение $\beta/2$ равно 10.5° . Длину горловины делают равной диаметру трубы. Угол α составляет от 5 до 7° , с тем чтобы потери энергии были минимальны, но там, где это не имеет большого значения, угол α может достигать 14 или 15° .

Патрубки для контроля давления ставят на входе (точка A) и в горловине (точка B). Разность давлений h , измеряемая манометром, дифференциальным динамометрическим элементом или схожим манометром, зависит от расхода потока через прибор. Обычно камеры давления устанавливают вокруг входной трубы, а горловину окружают несколькими отверстиями, прорезанными в камере, к которой подсоединён манометр. Это га-

рантирует регистрацию среднего значения давления. Потери энергии из-за турбулентности, возникающей ниже по течению при использовании измерительной диафрагмы, в данном случае удаётся избежать благодаря постепенной дивергенции за горловиной. Как правило, трубку Вентури изготавливают из нержавеющей стали, чугуна, медно-никелевого сплава или полиэфирного стекловолокна и встраивают в трубопровод стационарно.

Достоинства трубки Вентури

К достоинствам трубки Вентури следует отнести:

- высокую точность показаний;
- небольшую потерю давления (в правильно сконструированной трубке обычно от 2 до 3%);
- практическое отсутствие скоплений побочных веществ, присутствующих в текучей среде.

Недостатки трубки Вентури

К недостаткам трубки Вентури следует отнести:

- сравнительно высокую стоимость;
- сравнительно большие габариты (обычно 120 мм для трубы с внутренним диаметром 50 мм).

Расходомерное сопло

По своим характеристикам и стоимости *расходомерное сопло* находится между измерительной диафрагмой и трубкой Вентури. Типичное сечение такого сопла относительно потока показано на **Рис. 38.4**.

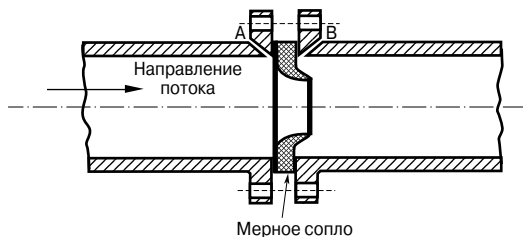


Рис. 38.4

Патрубки для контроля давления расположены сразу же рядом с поверхностями сопла вверх и вниз по течению (то есть в точках A и B). Поток, после того как сопло остаётся позади, не сужается, и возникающая потеря энергии значительно меньше по сравнению с измерительными диафрагмами. Мерные сопла подходят для реализации в высокоскоростных потоках, поскольку они не изнашиваются, что часто случается с краями измерительных диафрагм, если их поместить в поток такой же силы.

Трубка воздушных давлений (Дифференциальная трубка Пито—Прандтля)

Трубка воздушных давлений — это прибор для измерения скорости движущейся текучей среды или скорости тел, движущихся в средах. Прибор состоит из трубки, называемой *трубкой воздушных давлений*, у которой открытый конец смотрит в сторону движения потока (на **Рис. 38.5** она показана как трубка R), и второй трубки, называемой *трубкой пьезометра*, открытой к потоку под углом 90° (на **Рис. 38.5** она обозначена буквой T).

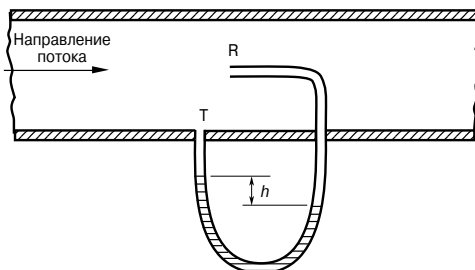


Рис. 38.5

Давление, регистрируемое манометром, движущимся с потоком, то есть статичным или стационарным относительно среды, называется давлением в свободном потоке.

Соединение манометра с небольшим отверстием в стенке трубы, как в точке T на **Рис. 38.5**, — это самый простой способ регистрации давления. Разность давлений ($p_R - p_T$), показанная как h на манометре, является индикацией скорости текучей среды в трубе.

На **Рис. 38.6** показана применяемая на практике трубка воздушных давлений, состоящая из пары концентрических трубок.

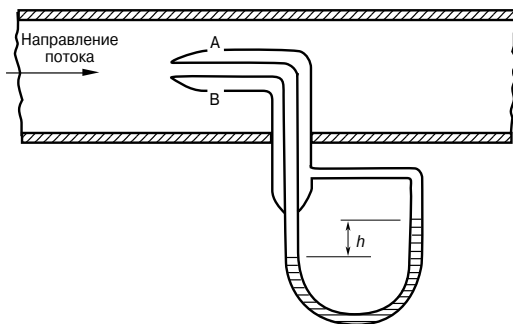


Рис. 38.6

Центральная трубка — это зонд, у которого есть открытый конец, смотрящий прямо в поток. Внешняя трубка имеет несколько отверстий по кругу, расположенных под прямыми углами к направлению потока, как это отражено на **Рис. 38.6** (отверстия А и В). Манометр, показывающий разность давлений h , может быть прокалиброван так, чтобы непосредственно показывать скорость потока.

Применение

Трубку воздушных давлений можно использовать как в турбулентных, так и в ламинарных потоках. Эти трубки можно делать очень маленькими по сравнению с размером трубопровода. К тому же можно проводить наблюдение за скоростью потока в определённых точках поперечного сечения трубопровода. Этот прибор, как правило, не годится для повседневных измерений и в промышленности обычно применяется при проведении предварительных испытаний на расход жидкости или газа, чтобы определиться с оборудованием для постоянной установки в данный трубопровод. Основное назначение трубок воздушных давлений — это измерение скорости твёрдых тел, движущихся в текучей среде, например скорости кораблей. В таких случаях трубку подсоединяют к манометру Бурдона, который можно откалибровать так, чтобы он показывал непосредственно скорость.

Другим направлением реализации трубок воздушного давления является *питомер*, который тестирует поток воды в водопроводных системах и выявляет утечку воды.

Достоинства трубок воздушных давлений

К достоинствам трубок воздушных давлений следует отнести:

- небольшую стоимость;
- легкость монтажа;
- незначительные потери давления;
- практическое отсутствие влияния на поток текучих сред.

Недостатки трубок воздушных давлений

К недостаткам трубок воздушных давлений следует отнести:

- пригодность лишь для сильных потоков из-за маленькой разности давлений;
- возможность измерений расхода среды только в определённой точке поперечного сечения трубы;
- возможность блокировки трубки посторонними частицами, находящимися в текучей среде.

Механические расходомеры

Принцип работы *механических расходомеров* основан на возможности потока жидкости или газа смещать чувствительный элемент, установленный в трубе.

К наиболее распространённым механическим расходомерам относятся:

- изгибающийся (смещающийся) расходомер с поворотной лопастью;
- турбинные измерители.

Расходомер с поворотной лопастью

Расходомер с поворотной лопастью состоит в основном из откидной лопасти, подвешенной в потоке, расход которого необходимо рассчитать. Это показано на **Рис. 38.7**.

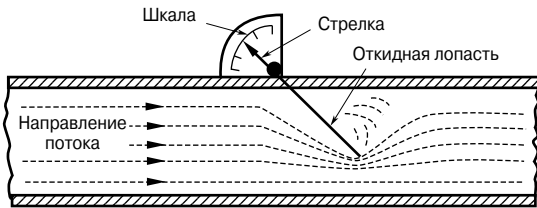


Рис. 38.7

Когда струя жидкости или газа ударяет в лопасть, та отклоняется от своего нормального положения на величину, пропорциональную расходу газа или жидкости. Движение лопасти отражается на шкале, которую можно откалибровать в единицах потока. Этот тип прибора, как правило, применяют для измерения расхода жидкости в открытых каналах или для измерения скорости воздуха в вентиляционных шахтах. Основной его недостаток в том, что он ограничивает расход и его необходимо заново калибровать для текущих сред с разной плотностью.

Турбинные измерители

Расходомеры на основе турбин, *турбинные измерители*, — это приборы, в которых применяется определённая форма многолопастного ротора. Они приводятся в движение средой, расход которой необходимо измерить.

К трём таким приборам относятся чашечный анемометр, лопастный объёмный расходомер и турбинный расходомер.

Чашечный анемометр. Анемометр — это устройство, измеряющее скорость движения газов. Наиболее часто его используют для измерения скорости ветра. Чашечный анемометр имеет три или четыре чашки в форме полушария, прикреплённых к кон-

цам плеч, расходящихся лучами в горизонтальном направлении из закреплённой точки. Система из чашек вращается вокруг вертикальной оси со скоростью, примерно пропорциональной скорости ветра. С помощью механического и/или электрического счётчика можно определить скорость ветра. Этот прибор легко приспособить для автоматической регистрации показаний.

Лопастный объёмный расходомер измеряет расход текучей среды, показывая количество жидкости, протекающей через прибор за определённое время. Типичное устройство такого прибора дано в разрезе на **Рис. 38.8**.

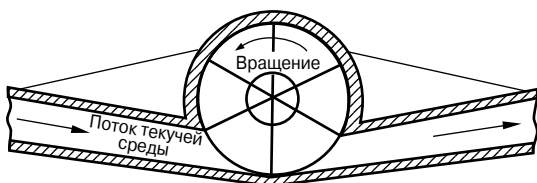


Рис. 38.8

Прибор состоит из камеры цилиндрической формы, в которую помещён ротор, содержащий несколько лопастей (в приведённом примере — шесть). Жидкость, попадающая в камеру, поворачивает ротор и затем переносится к выходному отверстию. Если x — это объём жидкости, удалённый из потока одной лопастью, то для полного поворота ротора, показанного на **Рис. 38.8**, суммарный объём вытесненной жидкости равен $6x$. Ось ротора может быть объединена с механическим счётчиком и электрическими приборами, калиброванными так, чтобы показывать объём потока. Такой тип прибора в различных вариантах широко применяют для измерений потребления воды в домашних и промышленных условиях, для точных измерений бензина в топливных насосах и для измерений потребления и управления периодическими процессами в пищевой промышленности, а также для замеров таких потоков, как растворители, гудрон, вязкая патока.

Турбинный расходомер имеет в своём составе ротор, к которому прикрепляются лопасти, вращающиеся со скоростью, пропорциональной скорости потока, протекающего через прибор. Типичный турбинный расходомер представлен на **Рис. 38.9** в разрезе.

Число оборотов турбинных лопастей можно определить с помощью механического или электрического счётчика, позволяющего определить расход газа или жидкости и полный поток.

К преимуществам турбинного расходомера относят его компактную и прочную конструкцию, высокую точность измерений, широкий диапазон температур и давлений, а также чёткие выходные характеристики. Применяют такой прибор для изме-

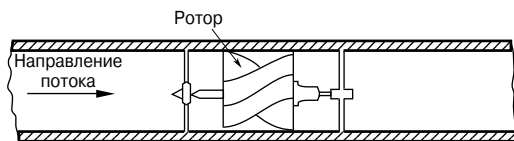


Рис. 38.9

рений объёма как сырых, так и очищенных нефтепродуктов в трубопроводах калибром до 600 мм, а также в процессах, реализуемых в гидротехнических и электротехнических сооружениях, в авиации, в космосе и в пищевой промышленности. С некоторыми модификациями эти устройства можно использовать для измерений сжиженного газа. Турбинные расходомеры требуют периодического осмотра и чистки рабочих частей.

Поплавковый расходомер с конической трубкой

Принцип работы

В случае измерительной диафрагмы и трубки Вентури площадь потока в месте измерения фиксирована, и любое изменение в расходе текучей среды производит соответствующее изменение давления. В случае *поплавкового расходомера* площадь замера может колебаться так, чтобы поддерживать постоянную разность давлений. Типичный прибор этого вида показан на Рис. 38.10.

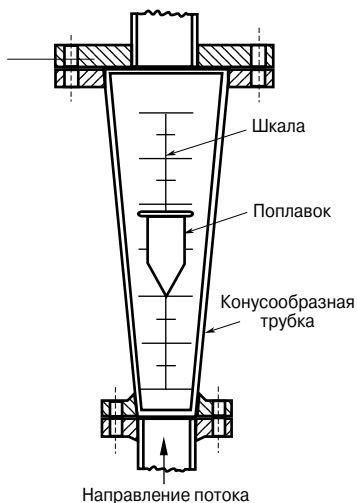


Рис. 38.10

В вертикальной конусообразной трубке находится поплавков, плотность которого больше плотности среды.

Поплавков в трубке ограничивает расход жидкости, которая может пройти лишь в промежутке между поплавком и стенками трубки. Такое сокращение площади вызывает увеличение скорости, а следовательно, и разности давлений, которая заставляет поплавок подняться вверх.

Чем больше расход жидкости или газа, тем выше поднимется поплавок, и наоборот. Положение поплавка — это мера расхода текущей среды. Это положение отражено на вертикальной шкале, нанесённой на трубку из прозрачного стекла или пластика. В случае воздушного потока в качестве поплавка используют небольшой шарик, а в случае жидкости, являющейся менее стабильной средой, поплавок делают с лопастями, заставляющими его крутиться и, следовательно, стабилизировать себя в потоке жидкости. Такие приборы часто называют *ротаметрами*. Калибровку расходомеров с прозрачной трубкой и поплавком можно провести с помощью трубки Пито или, что бывает чаще, с помощью весов в условиях ремонта.

Достоинства поплавкового расходомера

К достоинствам поплавкового расходомера следует отнести:

- простую конструкцию;
- возможность снимать непосредственные показания;
- возможность измерения очень медленных потоков.

Недостатки поплавкового расходомера

К недостаткам поплавкового расходомера следует отнести:

- возможность ошибок, вызванных, например, колебаниями температуры;
- необходимость установки в трубопроводе только в вертикальном положении;
- невозможность работы с жидкостями, содержащими большое число твёрдых тел в виде взвеси;
- необходимость калибровки заново для сред с разными плотностями.

Применение

Практическое применение такие расходомеры находят в медицине, при продувке устройств, на испытательных стендах и в условиях простых процессов. Их также применяют в случае очень слабого расхода текучего вещества. С помощью этих приборов без каких-либо осложнений можно работать со многими агрессивными средами.

Электромагнитный расходомер

Расход текучих сред, проводящих электричество, таких, как вода или жидкий металл, можно измерять с помощью *электромагнитного расходомера*, принцип действия которого основан на законах электромагнитной индукции. Когда проводник длиной l движется со скоростью v под прямым углом к магнитному полю с плотностью потока B , вырабатывается ЭДС e , при этом $e = Blv$ (см. кн. 2, гл. 48).

Устройство электромагнитного расходомера показано на **Рис. 38.11**.

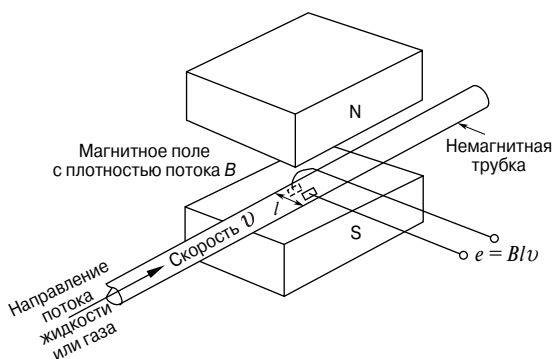


Рис. 38.11

Электропроводная текучая среда — это проводник, и ЭДС определяют с помощью двух электродов, размещённых перпендикулярно к направлению трубы из немагнитного материала.

Из уравнения

$$e = Blv$$

получаем

$$v = \frac{e}{Bl}.$$

Следовательно, при известных B и l и измерив ЭДС e , можно вычислить скорость потока.

Основные достоинства электромагнитных расходомеров

- В отличие от остальных способов измерения здесь отсутствуют прямые помехи потоку текучей среды.
- Существует линейная зависимость между потоком и величиной вырабатываемой ЭДС.
- Поток можно измерять в любом направлении, применяя измерительные приборы, фиксирующие полярность сигнала.

Применение

Электромагнитные расходомеры находят применение при измерении скорости гидросмесей, пастообразных веществ и вязких жидкостей. Кроме того, их широко используют в системах водоснабжения и переработки вод.

Термоанемометр проволочный

Простейший *проволочный термоанемометр* состоит из небольшого отрезка проволоки, нагреваемого электрическим током и помещённого в поток воздуха или газа, скорость которого необходимо измерить. Проходящий поток охлаждает проволоку, и скорость остывания отрезка зависит от скорости потока. На практике существует несколько способов реализации измерения проволочным термоанемометром.

- Если через провод проходит постоянный ток, то колебания потока приводят к изменению температуры провода, а следовательно, к изменению сопротивления, которое можно измерить с помощью мостика сопротивлений.
- Если сопротивление провода, а следовательно, и температура остаются постоянными, изменение потока текучей среды выливается в соответствующее изменение тока, что можно откалибровать так, чтобы получить расход текучей среды.
- Можно соединить в ряд термопару для наблюдения за нагретым проводом и регистрации температуры, что также является индикацией скорости воздуха или других газов.

Достоинства проволочного термоанемометра

Достоинства проволочного термоанемометра заключаются в его малых размерах и высокой чувствительности.

39. ПРОСТОЕ ГАРМОНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ И СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Простое гармоническое движение

Простое *гармоническое движение* определяют как периодическое движение точки вдоль отрезка прямой таким образом, что её ускорение всегда направлено к некоей фиксированной точке на этом отрезке и пропорционально расстоянию до этой точки.

Простое гармоническое движение (ПГД) можно рассматривать как проекцию точки, движущейся с постоянной скоростью по периметру круга (то есть по окружности), на его диаметр.

На **Рис. 39.1** точка P движется с постоянной скоростью v ($= \omega r$) по кругу радиусом r , а движение точки X , являющейся проекцией P на диаметр AB , реализует простое гармоническое движение.

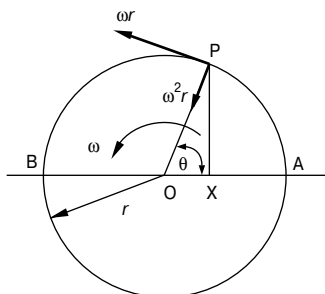


Рис. 39.1

Ускорение точки P — это центростремительное ускорение $\omega^2 r$.

Смещение (измеренное от центральной точки O), скорость и ускорение точки X определяются соответственно следующими уравнениями:

$$\text{смещение, } x = OX = r \cos \theta = r \cos \omega t,$$

где t — время, измеренное с момента, когда P и X находятся в точке A , и угол $\theta = 0$;

$$\text{скорость, } v = \omega r \sin \theta = -\omega r \sin \omega t;$$

$$\text{ускорение, } a = -\omega^2 r \cos \theta = -\omega^2 r \cos \omega t = -\omega^2 x.$$

Выражения для скорости и ускорения могут быть получены из выражения для смещения дифференцированием по времени. Минус перед величинами в выражениях для скорости и ускорения показывает, что для положения точки X на **Рис. 36.1** направление скорости, и направление ускорения противоположны направлению смещения.

Продолжительность цикла движения, называемая *периодом* T , — это время, затраченное на полное завершение цикла, проделанное точкой X, то есть возвращение её в исходную точку O.

За это время отрезок OP делает один полный оборот, и, следовательно, период равен

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Так как $a = \omega^2 x$, то

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{x}},$$

следовательно,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{a}} = 2\pi \sqrt{\frac{\text{смещение}}{\text{соответствующее ускорение}}}.$$

Частота n — это число полных циклов за одну секунду, то есть

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{x}}.$$

Единица измерения n — один цикл в секунду — называется *герцем* [Гц].

Максимальной скорости точка X достигает в центре, где она становится равной скорости точки P, то есть

$$v_{\max} = \omega r.$$

Максимальным ускорением точки X становится в крайних положениях, то есть в точках A и B, где оно равно ускорению точки P, то есть

$$a_{\max} = \omega^2 r.$$

Скорость точки X равна нулю в точках A и B, а ускорение равно нулю в точке O.

Амплитуда колебаний равна r . Расстояние AB, то есть $2r$, иногда называют *размахом*.

Например, тело движется по законам ПГД с амплитудой 45 мм и частотой 2.5 Гц.

Поскольку

$$\text{частота} = \frac{\omega}{2\pi} = 2.5 \text{ Гц},$$

то

$$\omega = (2\pi)(2.5) = 5\pi = \mathbf{15.708 \text{ рад/с.}}$$

Максимальная скорость

$$v_{\max} = \omega r = 15.708 \times 45 = \mathbf{706.9 \text{ мм/с}},$$

и точка достигает её в середине отрезка АВ, то есть в точке О.

Максимальное ускорение

$$a_{\max} = \omega^2 r = (15.708)^2 \times 45 = \mathbf{11.10 \text{ мм/с}^2},$$

и точка достигает его во всех крайних положениях, то есть в точках А и В.

При смещении точки, допустим, на 25 мм, то есть $x = 25 \text{ мм}$,

$$\cos \theta = \frac{25}{45} \quad (\text{см. Рис. 39.1}),$$

откуда

$$\theta = \mathbf{56.25^\circ}.$$

Скорость точки при смещении на 25 мм от среднего положения равна

$$\omega r \sin \theta = (15.708)(45) \sin 56.25^\circ = \mathbf{587.7 \text{ мм/с}}.$$

Ускорение точки при смещении на 25 мм от среднего положения равно

$$\omega^2 r \cos \theta = \omega^2 x = (15.708)^2 (25) = \mathbf{6\ 169 \text{ мм/с}^2}, \text{ или } \mathbf{6.169 \text{ м/с}^2}.$$

Колебания витой пружины

Движение, близкое по форме к простому гармоническому движению, возникает при *собственных или свободных колебаниях*. Часто это явление встречается при колебаниях под действием сил, подчиняющихся закону Гука (например, в случае сжатия и растяжения пружины), или сил гравитации (маятник).

Рассмотрим витую пружину, показанную на Рис. 39.2.

Если тело массой M , подвешенное на витой пружине и находящееся в состоянии покоя, оттянуть вниз на расстояние r , а затем отпустить, то оно будет колебаться в вертикальном направлении.

В состоянии покоя сила упругости пружины находится в равновесии с силой гравитации, действующей на тело.

Если s — это жёсткость пружины, то есть сила на единицу изменения длины, то для смещения x из состояния покоя изменение силы пружины составит sx . Это изменение силы есть несбалансированная, или ускоряющая, сила F , действующая на тело, масса которого равна M , то есть $F = sx$.

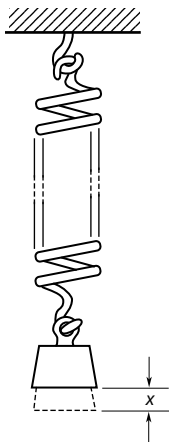


Рис. 39.2

Ускорение в этом случае

$$a = \frac{F}{M} = s \frac{x}{M}$$

Из уравнения видно, что ускорение прямо пропорционально смещению от положения состояния покоя. Следовательно, это простое гармоническое движение.

Период такого движения

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{a}} = 2\pi \sqrt{\frac{x}{s \frac{x}{M}}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{s}}$$

Например, груз массой 10 кг подвешен к вертикальной витой пружине и растягивает её на 15 мм. Пружину оттягивают вниз до 18 мм, а затем отпускают.

Определим параметры свободных колебаний пружины.

Вес груза

$$W = Mg = 10 \times 9.81 = \mathbf{98.1 \text{ Н}}$$

Жёсткость пружины

$$s = \frac{\text{сила}}{\text{растяжение}} = \frac{9.81 \text{ Н}}{15 \text{ мм}} = 6.54 \text{ Н/мм} = \mathbf{6.54 \text{ кН/м}}$$

Частота колебаний

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{M}{s}}} = \frac{\sqrt{s}}{2\pi \sqrt{M}} = \frac{\sqrt{6.54 \text{ кН/м}}}{2\pi \sqrt{10 \text{ кг}}} = \\ &= \frac{\sqrt{654 \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}}}}{2\pi} = \mathbf{4.07 \text{ Гц}} \end{aligned}$$

Амплитуда колебаний, $r = 18$ мм (по условию задачи).

Максимальная скорость груза

$$\omega r = (2\pi n)(r) = (2\pi)(4.07)(18) = \mathbf{460.3 \text{ мм/с}}$$

Максимальное ускорение груза

$$\omega^2 r = [(2\pi)(4.07)]^2 (18) = \mathbf{11\,771 \text{ мм/с}^2} = \mathbf{11.771 \text{ м/с}^2}$$

Максимальная сила растяжения пружины = $\left(\frac{\text{максимальное}}{\text{растяжение}} \right) \times (\text{жёсткость}) =$

$$= (15 \text{ мм} + 18 \text{ мм})(6.54 \text{ Н/мм}) = \mathbf{215.8 \text{ Н}}$$

Колебания маятника

Другой распространённый тип колебаний, приближенный к ПГД, создаёт *простейший маятник*. Он представляет собой тело незначительных размеров (шарик) на конце нити или стержня пренебрежимо малой массы. При малом смещении x шарика А от его среднего положения С, как показано на **Рис. 39.3**, ускоряющая сила F , действующая на шарик весом W , равна $W\sin\theta$, что очень близко к $W\theta$, если θ имеет малое значение и измеряется в радианах. (Маятник с приведёнными здесь допущениями называют математическим. — Прим. редактора перевода.)

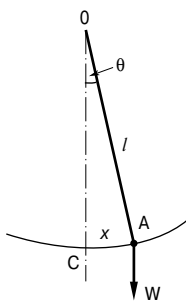


Рис. 39.3

Следовательно, ускорение шарика

$$a = \frac{F}{M} = \frac{W\theta}{M} = \frac{Mg\theta}{M} = g\theta,$$

где M – масса шарика ($M = \frac{W}{g}$).

Однако $x = l\theta$ (θ измеряется в радианах), следовательно,

$$\theta = \frac{x}{l}$$

и

$$a = g\theta = \frac{gx}{l}.$$

Из полученных соотношений следует, что ускорение пропорционально смещению, что удовлетворяет определению простого гармонического движения, у которого продолжительность цикла, то есть период колебаний, равна:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{a}} = 2\pi \sqrt{\frac{x}{\frac{gx}{l}}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Например, простейший маятник с длиной 780 мм имеет **период колебаний**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.78 \text{ м}}{9.81 \text{ м/с}^2}} = 1.772 \text{ с}.$$

Максимальная скорость шарика:

$$v_{\max} = \omega r = \left(\frac{2\pi}{T}\right)r,$$

где r — амплитуда.

Тогда, если амплитуда колебаний маятника, предположим, равна 80 мм, то

$$\text{максимальная скорость} = \left(\frac{2\pi}{1.772}\right)(80) = 283.7 \text{ мм/с},$$

а

$$\begin{aligned} \text{максимальное ускорение} &= \omega^2 r = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 (r) = \left(\frac{2\pi}{1.772}\right)^2 (80) = \\ &= 1\,006 \text{ мм/с}^2, \text{ или } 1.006 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

Угловое движение маятника нельзя путать с угловым движением отрезка прямой, используемого в анализе простого гармонического движения. Если отрезок времени (на **Рис. 39.1** это ОР) вращается с постоянной скоростью, то угловая скорость маятника меняется, принимая максимальное значение, когда маятник проходит через вертикальное положение. При скорости шарика v угловая скорость маятника равна

$$\omega_p = \frac{v}{l}.$$

Угловое ускорение маятника принимает максимальное значение в крайних положениях. При ускорении шарика a угловое ускорение маятника равно

$$\alpha_p = \frac{a}{l}.$$

(Индекс p у символов угловой скорости и углового ускорения означает, что эти величины относятся именно к маятнику (англ. pendulum). — *Прим. переводчика.*)

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- абсолютная шкала температур — 162
- абсолютное атмосферное давление — 199
- абсолютное давление — 189
- аморфный — 27
- ампер-секунда — 18
- анемометр чашечный — 237
- ареометр — 17
- атмосферное давление — 189, 196, 199
- атом — 23
- атомное число — 23

Б

- бар — 190, 196
- барометр — 196
- барометр Фортина — 198
- безразличное равновесие — 52
- Бекмана термометр — 175
- Бернулли уравнение — 225
- биметаллический термометр — 186
- блок — 116
- Бойля—Мариотта закон — 205
- Бринелля метод — 137
- Бурдона манометр — 202

В

- вакуум — 200
- вакууметр — 200
- вакуумный манометр — 200
- ватт — 19, 107
- ведомое звено — 119
- вектор — 20
- векторная величина — 20, 53, 150
- векторная скорость — 40
- векторная скорость средняя — 41
- векторное сложение сил — 54
- величина — 14
- величина векторная — 20
- величина скалярная — 20
- Вентури трубка — 233
- Вернера шкала — 198
- вертикальная составляющая вектора — 60
- вес — 20
- Виккерса метод — 139

- винтовой домкрат — 118
- влажный пар — 213
- внутренняя энергия — 211
- водоприёмник — 233
- воздух — 29
- волна звуковая — 88
- волна механическая — 86
- волна поперечная — 86
- волна продольная — 86
- волновое движение — 86
- вольт — 19
- вращающий момент — 128
- второй закон Ньютона — 47, 151
- вязкость — 132, 221

Г

- газ идеальный — 205
- гармоническое движение — 243
- Герберта тестер — 139
- гидростатический напор — 225
- главная ось — 98
- главный фокус — 98
- горение — 29
- горизонтальная составляющая вектора — 60
- горловина — 233
- горячий спай — 177
- градиент скорости — 221
- градус Цельсия — 162
- грамм — 16
- график — 38
- грузопоршневой манометр — 202
- Гугенберга тензометр — 145
- Гаука закон — 130

Д

- давление — 125, 142, 188
- давление абсолютное — 189
- давление атмосферное — 189, 196, 199
- давление насыщенного пара — 209
- давление парциальное — 207
- датчик деформации — 144, 147
- датчик деформации фольговый — 148
- движение волновое — 86
- движение гармоническое — 243
- движитель — 119
- двоковыгнутая линза — 98
- двоковыпуклая линза — 98

действительное изображение — 99
 деструктивная интерференция — 91
 деформация линейная — 126
 деформация остаточная — 143
 деформация сдвига — 127
 джоуль — 18, 104
 диафрагма измерительная — 231
 динамический напор — 225
 дифракция — 91
 дифференциальный расходомер — 230
 длина — 15
 длина волны — 87
 домкрат винтовой — 118

Е

единицы величин — 14

Ж

жёсткость — 130, 143

З

закон Бойля—Мариотта — 205
 закон Брэгга — 95
 закон Гука — 130
 закон Ньютона второй — 47, 151
 закон Ньютона первый — 46, 150
 закон Ньютона третий — 153
 закон отражения — 96
 закон парциального давления — 207
 закон распределения давления — 206
 закон сохранения импульса — 150
 закон сохранения энергии — 105, 109, 211
 закон Стокса — 223
 закон Шарля — 206
 закреплённая балка — 66
 замедление — 44
 заряд электрический — 18
 звуковая волна — 88
 зубчатая передача — 119

И

идеальный газ — 205
 избыточное давление — 219
 изгиб — 69
 изгибающий момент — 68
 излучение — 166
 измеритель турбинный — 237
 измерительная диафрагма — 231
 изобарический процесс — 206

изображение действительное — 99
 Изода метод — 140
 изотермический процесс — 205
 изохорический процесс — 207
 импульс силы — 152
 импульс тела — 150
 импульсная сила — 152
 индентор — 139
 индикатор — 31
 инерция — 47
 интерференция — 90
 интерференция конструктивная — 91
 ион — 31
 испытания на твердость — 137
 исчезающей нити накала пирометр — 184

К

капиллярная трубка — 174
 квадратный метр — 15
 кельвин — 162
 Кельвина шкала — 162
 кинетическая энергия — 109
 кислород — 29
 кислота — 30
 ковкость — 132
 колебание — 89
 колебание свободное — 245
 колебание собственное — 245
 количество движения — 150
 компланарные силы — 53
 конвекция — 166
 конденсор — 103
 конструктивная интерференция — 91
 коррозия — 29
 коэффициент вязкости — 221
 коэффициент движения — 114
 коэффициент истечения — 227
 коэффициент линейного расширения — 171
 коэффициент объёмного расширения — 173
 коэффициент поверхностного расширения — 172
 коэффициент полезного действия — 106, 114
 коэффициент полезного действия предельный — 116
 коэффициент силы — 114
 коэффициент силы предельный — 115

коэффициент скорости — 227
 коэффициент сужения — 227
 коэффициент трения — 83
 краски, отображающие
 температуру — 185
 кристалл — 26
 кристаллизация — 27
 критерий Рэлея — 92
 кубический метр — 15
 кулон — 18

Л

ламинарный поток — 221
 Линдлея тензометр — 144
 линейная деформация — 126
 линейное ускорение — 77
 линза — 98
 линза двояковогнутая — 98
 линза двояковыпуклая — 98
 линза проекционная — 103
 литр — 15
 лопастный объёмный расходомер
 — 237, 238
 луч — 96

М

Маклеода манометр — 204
 максимума и/или минимума
 термометр — 175
 манометр — 199, 200
 манометр Бурдона — 202
 манометр вакуумный — 200
 манометр грузопоршневой — 202
 манометр Маклеода — 204
 манометр наклонный — 201
 манометр Пирани — 204
 манометрическое давление —
 189, 199
 масса — 16
 маховик — 112
 машина — 114
 маятник — 247
 медицинский термометр — 175
 мелки, отображающие температуру
 — 185
 Менделеева периодическая система
 — 23
 мерное сопло — 234
 металл — 28
 металлический ртутный термометр
 — 186
 метод Бринелля — 137
 метод Виккерса — 139

метод Изода — 140
 метод Роквелла — 139
 метод Шарпи — 140
 метр — 15
 метр квадратный — 15
 метр кубический — 15
 механическая волна — 86
 механический расходомер — 230,
 237
 микроскоп — 102
 миллиметр ртутного столба — 190
 многоугольник с симметричными
 выемками — 72
 многоугольник сил — 58
 модуль вектора — 22
 модуль упругости Юнга — 142
 модуль Юнга — 130
 молекула — 24
 молярная газовая постоянная —
 208
 молярная латентная энергия —
 220
 момент — 64
 момент вращающий — 154
 момент изгибающий — 68
 момент инерции — 111
 момент силы — 64, 154
 мост Уитстона — 180
 мощность — 19, 107

Н

нагрузка — 114
 нагрузка точечная — 66
 наклонный манометр — 201
 напор — 225
 напор гидростатический — 225
 напор динамический — 225
 напор потенциальный — 225
 напор скоростной — 227
 напор суммарный — 225
 напряжение — 142
 насыщенный пар — 213
 насыщенный раствор — 26
 натяжение поверхностное — 217
 нейтрон — 23
 непрерывности уравнение — 226
 неупругий удар — 110
 неустойчивое равновесие — 51
 нормального давления сила — 83
 ньютон — 18, 124
 Ньютона второй закон — 47, 151
 Ньютона первый закон — 46, 150
 Ньютона третий закон — 153

ньютон-метр — 64

О

оболочка — 23
 оборот в минуту — 76
 оборот в секунду — 76
 общего излучения пирометр — 183
 объектив — 102
 объём — 15
 окисление — 29
 оксид — 29
 окуляр — 102
 опорное трение — 83
 оптический пирометр — 183
 основание — 31
 основной интервал — 175
 основные вещества — 23
 основные единицы величин — 14
 остаточная деформация — 143
 остаточное удлинение — 135
 относительная плотность — 17
 отображающие температуру краски — 185
 отображающие температуру мелки — 185
 отражение волны — 87
 очки — 101

П

пар влажный — 213
 пар перегретый — 213
 пар сухой насыщенный — 213
 пара сил — 154
 параллелограмм сил — 54
 парциальное давление — 207
 паскаль — 125, 188, 196
 первый закон Ньютона — 46, 150
 перегретый пар — 164, 213
 передаточное отношение — 114
 передача зубчатая — 119
 передача зубчатая сложная — 120
 перемещение — 20
 периодическая система элементов — 23
 перископ — 96
 Пирани манометр — 204
 пирометр — 163, 182
 пирометр исчезающей нити накала — 184
 пирометр общего излучения — 183
 пирометр оптический — 183

питомер — 236
 пластичность — 129
 плотность — 16
 плотность относительная — 17
 площадь — 15
 поверхностное натяжение — 217
 полый цилиндр — 73
 поперечная волна — 86
 поплавковый расходомер — 239
 потенциальная энергия — 108
 потенциальный напор — 225
 поток массы — 225
 правило параллелограмма — 55
 правило треугольника — 54
 предел пропорциональности — 134
 предел прочности — 134
 предел текучести — 134
 предел упругости — 129, 134, 143
 предельный коэффициент полезного действия — 116
 предельный коэффициент силы — 115
 привод — 119
 принцип моментов — 65
 принцип суперпозиции — 90
 проволочный термоанемометр — 242
 прогиб — 69
 продольная волна — 86
 проектор — 100, 102
 проекционная линза — 103
 прожектор — 100
 производные единицы величин — 16, 18
 протон — 23
 процесс изобарический — 206
 процесс изотермический — 205
 процесс изохорический — 207
 Пуазейля формула — 222
 путь — 20
 пучность — 90

Р

работа — 18, 104
 равновесие — 59
 равновесие безразличное — 52
 равновесие неустойчивое — 51
 равновесие устойчивое — 51
 равнодействующая сила — 53
 радиус вращения — 111
 разложение вектора — 60
 разложение сил — 56

- размах — 244
 разность потенциалов — 19
 разность хода — 91
 разряжение — 88
 раствор — 25
 раствор насыщенный — 26
 раствор твёрдый — 28
 растворённое вещество — 25
 растворимое вещество — 26
 растворимость — 26
 растворитель — 25
 растяжение — 124
 расходомер — 230
 расходомер дифференциальный — 230
 расходомер лопастный объёмный — 237, 238
 расходомер механический — 230, 237
 расходомер поплавковый — 239
 расходомер с поворотной лопастью — 237
 расходомер турбинный — 237
 расходомер турбулентный — 238
 расходомер электромагнитный — 241
 реакция — 48
 реакция опоры — 66
 реакция химическая — 29
 резистивный термометр — 163
 ремень — 157
 рефракция — 88, 97
 Роквелла метод — 139
 ролик холостой — 120
 ротаметр — 240
 Рэлея критерий — 92
 рычаг — 121
 рычаг второго рода — 121
 рычаг первого рода — 121
 рычаг третьего рода — 121
- С**
- свободная энергия поверхности — 217
 свободное колебание — 245
 свободное падение — 44
 свободный спай — 177
 сдвиг — 125
 сдвиговая деформация — 127
 сжатие — 88, 124
 сжатое сечение — 232
 сила — 46
 сила гравитации — 46
 сила нормального давления — 83
 сила равнодействующая — 53
 сила реакции — 48
 сила сдвига — 68
 сила трения движения — 83
 сила трения скольжения — 83
 сила тяжести — 18, 46
 сила центробежная — 50
 силы компланарные — 53
 силы совпадающие — 53
 система Менделеева периодическая — 23
 скаляр — 20
 скалярная величина — 20
 склероскоп Шора — 139
 скороварка — 210
 скоростной напор — 227
 скорость — 20, 38
 скорость векторная — 40
 скорость распространения волны — 87
 скорость средняя — 38
 скрытая теплота — 165
 скрытая теплота парообразования — 165
 скрытая теплота плавления — 165
 сложная зубчатая передача — 120
 смесь — 25
 собственное колебание — 245
 совпадающие силы — 53
 соединение химическое — 24
 соль — 31
 сопло мерное — 234
 спай горячий — 177
 спай свободный — 177
 спай холодный — 177
 сплав — 28
 сплошной многоугольник — 72
 среднее ускорение — 43
 средняя скорость — 38
 среды текучие — 225
 стеклянный жидкостный термометр — 163
 степень сухости пара — 213
 Стокса закон — 223
 стоячая волна — 90
 суммарный напор — 225
 суспензия — 26
 сухой насыщенный пар — 213
- Т**
- таблицы образования паров — 214
 твердомер Ферта — 139

твёрдый раствор — 28
 текучие среды — 225
 температура — 162
 тензометр — 144
 тензометр Гугенберга — 145
 тензометр Линдлея — 144
 тензометр Хоунсфильда — 146
 теорема косинусов — 56
 теорема синусов — 56
 теплоёмкость удельная — 163, 213
 теплообмен — 211
 теплопроводность — 166
 теплота — 162
 теплота парообразования скрытая — 165
 теплота плавления скрытая — 165
 теплота скрытая — 165
 теплота физическая — 165, 212
 термистор — 182
 термоанемометр проволочный — 242
 термодинамическая шкала температур — 162
 термометр — 162
 термометр Бекмана — 175
 термометр биметаллический — 186
 термометр максимума и/или минимума — 175
 термометр медицинский — 175
 термометр металлический ртутный — 186
 термометр резистивный — 163
 термометр стеклянный жидкостный — 163
 термопара — 163
 термоэлектрический эффект — 176
 тестер с маятником Герберта — 139
 тонна — 16
 торможение — 44
 точечная нагрузка — 66
 трение — 83
 трение движения — 83
 трение опорное — 83
 трение скольжения — 83
 трения коэффициент — 83
 третий закон Ньютона — 153
 треугольник сил — 54
 трубка Вентури — 233
 трубка воздушных давлений — 235

трубка капиллярная — 174
 трубка пьезометра — 235
 турбинный измеритель — 237
 турбинный расходомер — 237
 турбулентный поток — 221
 турбулентный расходомер — 238
 тягучесть — 132

У

увеличительное стекло — 101
 угловое ускорение — 77
 угол отражения — 96
 угол падения — 96
 угол скольжения — 95
 удар неупругий — 110
 удар упругий — 110
 удельная теплоёмкость — 163, 213
 удельная энтальпия — 212
 удлинение остаточное — 135
 узел — 90
 Уитстона мост — 180
 упругий удар — 110
 упругость — 129
 уравнение Бернулли — 225
 уравнение движения — 44
 уравнение непрерывности — 226
 уравнение состояния идеального газа характеристическое — 208
 уравнение химическое — 30
 уравнения состояния газа — 205
 ускорение — 43, 50
 ускорение линейное — 77
 ускорение среднее — 43, 89
 ускорение угловое — 77
 ускорение центростремительное — 50
 устойчивое равновесие — 51
 устройство фотокопировальное — 100

Ф

Ферта твердомер — 139
 физическая теплота — 165, 212
 фокусное расстояние линзы — 98
 фольговый датчик деформации — 148
 формула Пуазейля — 222
 Фортина барометр — 198
 фотокамера — 100
 фотокопировальное устройство — 100

Х

характеристическое уравнение
состояния идеального газа — 208
химическая реакция — 29
химическое соединение — 24
химическое уравнение — 30
холодный спай — 177
холостой ролик — 120
Хоунсфильда тензомер — 146
хрупкость — 132

Ц

цельный прут — 73
Цельсия градус — 162
Цельсия шкала — 162
центр тяжести — 51
центростремительная сила — 50
центростремительное ускорение — 50

Ч

частота — 87, 244
чашечный анемометр — 237

Ш

Шарля закон — 206
Шарпи метод — 140
шкала рН — 31
шкала Вернера — 198
шкала Кельвина — 162
шкала температур абсолютная — 162

шкала температур
термодинамическая — 162
шкала Цельсия — 162
Шора склероскоп — 139

Щ

щёлочь — 31

Э

электрический заряд — 18
электродвижущая сила — 19
электромагнитный расходомер — 241
электрон — 23
элемент — 23
энергия — 18, 105
энергия внутренняя — 211
энергия кинетическая — 109
энергия молярная латентная — 220
энергия поверхности свободная — 217
энергия потенциальная — 108
энергия разрыва молекулярной связи — 220
энтальпия — 212
энтальпия удельная — 212
эффект термоэлектрический — 176
эхолокция — 89

Ю

Юнга модуль упругости — 130, 142

Бёрд Джон
ФИЗИКА.
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ
Карманный справочник
Книга 1
Механика, оптика, термодинамика

Ответственный редактор *И. А. Сенников*

Переводчик *Т. И. Сенникова*

Технический редактор *В. И. Матвеева*

График *Н. М. Хлебосолова*

Верстальщик *Н. В. Круглова*

Корректор *Г. Р. Абудеева*

Формат 84x108/32.

Бумага типографская № 2.

Гарнитура «NewtonС». Печать офсетная.

Объем 8,0 п. л. Усл. печ. л. 13,44. Тираж 2000 экз. Изд. № 91.

Заказ №587.

Издательский дом «Додэка-XXI»

105318 Москва, а/я 70

Тел./факс: (495) 366-24-29, 366-09-22

E-mail: books@dodeca.ru; red@dodeca.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Типография Новости»
105005 Москва, ул. Ф. Энгельса, 46