

Федеральное агентство по образованию РФ
Российское научно-техническое вакуумное общество
Казанский государственный технологический университет
ОАО «Вакууммаш»

**ВТОРАЯ РОССИЙСКАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ»**



**МАТЕРИАЛЫ
КОНФЕРЕНЦИИ**

Казань
12-14 апреля 2005 г.

Конференция организована при поддержке:

- **РОССИЙСКОЕ ВАКУУМНОЕ ОБЩЕСТВО**
- **ОАО «ВАКУУММАШ» г. Казань**
- **ОАО «КАЗАНЬКОМПРЕССОРМАШ» г. Казань**
- **НПП «АРГОНАВТ-ТЕПЛО» при ВГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского» г. Москва**
- **АО «ФЕРРИ-ВАТТ» г. Казань**
- **НПЦ «АЛВАК» г. Казань**

В рамках Второй Российской студенческой
научно-технической конференции
«Вакуумная техника и технология»
*Российское вакуумное
научно-техническое общество*
проводит конкурс на лучшую научно-
исследовательскую работу студентов

Федеральное агентство по образованию РФ
Российское научно-техническое вакуумное общество
Казанский государственный технологический университет
ОАО «Вакууммаш»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ВТОРАЯ РОССИЙСКАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ»

Казань
12-14 апреля 2005 г.

**Вторая Российская студенческая
научно-техническая
конференция
“Вакуумная техника и технология”
12 – 14 апреля 2005 г.,
г. Казань**

Сопредседатели конференции:

Дьяконов С.Г., ректор КГТУ

Быков Д.В., председатель РВО, ректор МГИЭМ

Капустин Н.Ф., генеральный директор ОАО «Вакууммаш»

Члены Оргкомитета:

Аляев В.А., профессор, КГТУ, Казань

Бурмистров А.В., доцент, КГТУ, Казань

Демихов К.Е., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Кеменов В.Н., профессор, НИИВТ им. С.А. Векшинского, Москва

Максимов В.А., профессор, КГТУ, Казань

Нестеров С.Б., профессор, МЭИ, Москва

Панфилович К.Б., профессор, КГТУ, Казань

Ребров А.К., академик РАН, ИТФ СО РАН, Новосибирск

Розанов Л.Н., профессор, СПбГПУ, Санкт-Петербург

Саксаганский Г.Л., профессор, НИИЭФА, Санкт-Петербург

Хисамеев И.Г., профессор, генеральный директор ОАО

«Казанькомпрессормаш»

Ответственный секретарь: М.Г. Фомина, доцент, КГТУ, Казань

Указатель тезисов докладов

страницы

Пленарные доклады

- 7 С.Б. Нестеров
Система подготовки специалистов в области физики вакуума,
вакуумной техники и технологии
- 10 Н.К. Никулин, К.Е. Демихов
Основные направления развития высоковакуумных механических
насосов

Секция 1. Физические явления в вакууме, расчет вакуумных систем

- 17 И.Ю. Акимов, В.П. Михайлов
Исследование параметров точных вакуумных механизмов
реологического типа
- 19 А.В. Ботин, В.В. Гайдаев, Н.А. Смоланов, Н.А. Панькин
Исследование физико-механических свойств поверхности,
модифицированной ионно-плазменными потоками, в зависимости от
расстояния катод-подложка
- 20 Т.А. Аверченкова, Н.А. Смоланов, Н.А. Панькин
Спектральный анализ плазмы вакуумной дуги при нанесении
защитных покрытий нитрида титана
- 22 И.П. Меньшиков, П.И. Коновалов, Р.А. Невшупа
Сверхвысоковакуумная установка для измерения газосодержания в
материалах
- 24 М.А. Асташина, Ю.К. Васильев, С.Б. Нестеров
Использование различных методов расчета для исследования
параметров вакуумного оборудования в разных режимах течения
- 26 Т.В. Куликова, Н.К. Никулин
Расчет быстроты откачки вакуумной системы
- 28 А.Р. Валеев, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров
Исследование проводимости щелевых каналов, образованных
цилиндрическими стенками, при малых перепадах давлений в
ламинарном режиме течения газа
- 30 Е.В. Воронкин, В.С. Петров
Исследование кинетики взаимодействия теплового водорода с
ниобием
- 32 Т.С. Васильева, Ю.К. Васильев, С.Б. Нестеров
Универсальный метод комплексного анализа характеристик
сложных вакуумных систем
- 34 В.А. Ткаченко, И.В. Белокрылов
Расчет процесса вакуумной регенерации селективного сорбента
воды
- 36 А.В. Русанов, Р.А. Невшупа
Создание модели трибостимулированной адсорбции водорода в
конструкционных материалах

- 38 А.А. Войтеховский, В.А. Ветров, Б.Г. Львов
Информационная вакуумная система
- 39 Н.М. Переведенцев, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, М.Д. Броништейн
Расчет ламинарного течения газа через плоскую прямоугольную щель при докритических и критических перепадах давлений
- 41 А.В. Тютина, С.Н. Коледов, Д.И. Сагдеев
Тестирование по дисциплине «Газовая динамика сплошных и разреженных сред»
- 43 А.С. Барышников, С.Б. Нестеров
Разработка нового метода определения газонасыщенности геттера
- 45 А.В. Пальцев, Р.М. Даутов, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров
Расчет течения газа через щелевые каналы, образованные цилиндрическими стенками, в ламинарном режиме
- 47 Н.Н. Новикова, А.Р. Мутыгуллина, Т.Г. Булатова
Исследования значений угловых коэффициентов

Секция 2. Средства получения и измерения вакуума

- 49 Е.А. Ивченко, Е.А. Деулин
Компьютерная диагностика турбомолекулярных вакуумных насосов
- 50 Е.А. Горячева, Н.К. Никулин
Расчет откачной характеристики ТМН с двумя всасывающими патрубками
- 52 И.Х. Хуснутдинов, А.В. Бурмистров, М.Д. Броништейн
Пути снижения шума и температуры при работе двухроторных вакуумных насосов
- 54 А.А. Комкова, В.С. Петров
Исследование взаимодействия нераспыляемых геттеров на основе титана с водородом, азотом и аммиаком
- 56 Л.З. Шарафиев, А.В. Бурмистров, М.Д. Броништейн
Экспресс-расчет проводимости щелевых каналов бесконтактных вакуумных насосов
- 58 А.Н. Залесов, Ю.В. Панфилов
Расчет параметров вакуумной среды при одновременной работе магнетронной распылительной системы и автономного источника ионов
- 60 Н.М. Переведенцев, Э.Р. Бикулов, А.В. Бурмистров, М.Д. Броништейн
К выбору оптимальных геометрических параметров эллиптического профиля роторов ДВН
- 62 Н.М. Переведенцев, А.В. Бурмистров, М.Д. Броништейн
Профилирование ротора ДВН с циклоидальной головкой
- 64 М.В. Добрынина, М.Д. Броништейн, К.Б. Панфилович
Динамический затвор или «антинасос» Геде
- 66 А.Д. Гарифуллин, Д.И. Сагдеев, Р.Г. Тахавутдинов
Моделирование гидродинамики вискозиметра с падающим грузом

- 68 Н.А. Шагиева, А.Д. Гарифуллин, А.А. Хубатхузин, Д.И. Сагдеев
Метод симплексных решеток для моделирования плотности смесей вакуумных рабочих жидкостей
- 70 И.А. Сабиров, Д.Г. Караблинов, А.В. Бурмистров
Расчет откачных характеристик ДВН с учетом движения стенок каналов роторного механизма
- 72 А.Р. Бикмуллин, Е.В. Антипова, Д.И. Сагдеев
Моделирование газоструйного эжектора в программном продукте «PHOENICS»
- 74 А.Г. Сайфетдинов, И.И. Шарапов, А.Г. Сайфетдинов
Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи между газом и стенками в двухроторной машине
- 76 Д.А. Андреева, С.А. Бурцев, А.В. Гаврилов
Лабораторный стенд для исследования эжекторов, предвключенных к ВВН-1,5
- 78 Т.Н. Мустафин, С.В. Визгалов, А.М. Ибраев
Повышение эффективности рабочего процесса двухроторного вакуум-насоса и компрессора за счет впрыска воды на всасывание

Секция 3. Вакуумные установки и технологии

- 81 К.М. Моисеев, А.Н. Залесов, Ю.В. Панфилов
Многопозиционная установка нанесения тонкопленочных покрытий в вакууме
- 83 М.Н. Кондрашкина, Н.А. Смоланов
Применение вакуумных покрытий в изделиях для производства кабельной продукции
- 84 А.А. Евланов, В.В. Любимов
Равномерность формирования ионно-плазменных покрытий нанометрических толщин, получаемых испарением титана в среде азота
- 86 А.В. Петров, М.Ю. Кобзев, В.П. Шумарин, А.Н. Балакин
Разработка перспективного метода герметизации СВЧ ЭВП при гнездовой откачке
- 88 И.Н. Аксанов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасанишин
Вакуумные технологии в деревообработке
- 90 И.Н. Аксанов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасанишин
Математическая модель стадии понижения давления в процессе вакуумно-конвективной сушки пиломатериалов
- 92 А.Р. Савельев, Р.Р. Сафин, С.А. Хайдаров
Аэродинамика вакуумно-конвективных камер для сушки пиломатериалов
- 94 А.А. Тимергалеев, Р.Р. Сафин, И.А. Валеев
Моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды
- 96 А.Е. Алексеев, Р.Р. Сафин, И.А. Валеев
Установка для термической переработки древесных отходов

- 98 Э.Ф. Миргалеева, Е.К. Ратникова
Модификация эмиссионных характеристик матричных автоэлектронных катодов
- 100 И.И. Мусабиров, Е.К. Ратникова
Разработка установок лабораторного типа для ионно-плазменного травления и нанесения покрытий в вакууме
- 102 В.Н. Пашиков, В.П. Михайлов
Исследование параметров электрореологических жидкостей и разработка конструктивных элементов привода на их основе
- 104 В.С. Шерстнев, В.А. Токарев, С.И. Трегубов, Т.Т. Ереско
Способ получения токопроводящего покрытия в вакууме на внутренней поверхности волновода из углепластика
- 106 Г.И. Балешева, Р.Р. Галимова, Р.Г. Ибрагимов
Модификация нетканых клееных материалов швейной и обувной промышленности высокочастотной плазмой пониженного давления
- 108 А.Р. Галяутдинов, Н.Ф. Кашапов
Магнетронное нанесение оксидов титана в вакууме и исследование структуры пленок методом ЭПР
- 109 М.С. Афанасьев, А.Н. Базлов, В.А. Шахунов, Н.П. Есаулов
Исследование влияния кислорода в процессе вакуумного осаждения ВТСП пленок
- 111 П.И. Коновалов, И.П. Меньшиков, Р.А. Невшупа
Моделирование передаточной функции вакуумной камеры при нестационарном газовыделении
- 113 А.Р. Даминов, А.А. Чумагин, Н.А. Зюзин, Р.А. Назипов
Масс-спектрометрическое определение спирт-эфирной смеси в азотнокислом эфире целлюлозы
- 115 Л.А. Автономова, А.И. Шихобалова, Д.И. Сагдеев
Моделирующая программа «Chemcad» для проектирования вакуумного конденсатора
- 117 А.П. Ляпин, В.А. Глинкин
Установка для нанесения покрытия на отражатели автомобильных фар
- 119 Р.Р. Шакиров, С.А. Бурцев, Р.Б. Ханнанов
Лабораторный стенд для исследования процессов выпаривания под вакуумом
- 121 В.Ф. Мадякин, В.А. Алексеев, С.И. Поникаров
Термо-вакуум-импульсные технологии

Пленарные доклады

СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВАКУУМА, ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

С.Б. Нестеров

ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского», Москва, Нагорный проезд, 7

Российское вакуумное общество

e-mail: NesterovSB@niivt.ru

Одним из основных аспектов работы РВО является подготовка высококвалифицированных специалистов в области вакуумной науки, техники и технологии. На базе вузов страны, ориентированных на подготовку специалистов в данной области (МГТУ им. Н.Э.Баумана, МИЭМ, «МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского, МЭИ, СПбПУ, КГТУ, НГУ), и ведущих предприятий – разработчиков и производителей вакуумной технологии и оборудования (ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского», г. Москва, ФГУП «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», г. Санкт-Петербург, Казанский механический завод ОАО «Вакууммаш», Институт теплофизики, г. Новосибирск) создана инновационно ориентированная система непрерывного высшего профессионального образования в области физики вакуума, вакуумной техники и технологии.

В настоящей работе делается акцент на реализацию системы непрерывного высшего профессионального образования в области физики вакуума, вакуумной техники и технологии на примере учебно-научной группы, возглавляемой д.т.н., профессором МЭИ, заместителем директора по научной работе ФГУП «НИИ вакуумной техники им. С.А. Векшинского» Нестеровым С.Б.

В работе приведены сведения об учебной и научной карьере десяти выпускников кафедры низких температур МЭИ, которые с начала четвертого курса специализируются в области вакуумной науки, техники и технологии.

Участие в специализированных конференциях и неоднократные выступления на «взрослых» научных форумах привели к тому, что диссертационные работы были защищены либо в срок, либо досрочно.

Важной составляющей процесса непрерывной подготовки является как можно более ранняя возможность для молодого научного работника стать преподавателем.

Учитывая необходимость расширения и укрепления творческого сотрудничества между вузами и научно-исследовательскими институтами в области подготовки специалистов и закрепления их на предприятиях в ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского» при активном участии профессоров Кеменова В.Н. и Нестерова С.Б. создан учебно-научный центр, включающий в себя лаборатории зондовой микроскопии, расчета и дизайна вакуумных систем, перспективных технологий, а также музей вакуумной техники и специализированную библиотеку.

Целями и задачами учебно–научного центра являются повышение качества подготовки специалистов вуза, а также использование в учебных целях современных приборов систем и технологического оборудования НИИ; закрепление выпускников вуза в НИИ путем создания системы, стимулирующей их работу на предприятии; повышение квалификации и переподготовка специалистов НИИ; подготовка для НИИ специалистов высшей квалификации – кандидатов и докторов наук на базе аспирантуры и докторантуры вуза.

Российское вакуумное общество уделяет первостепенное внимание вопросу привлечения к научной деятельности студентов. Далее приведен список периодических студенческих и аспирантских научных мероприятий, либо целиком посвященных вакуумной науке, технике и технологии, либо в которых работают специализированные секции по этой тематике:

- Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология», Казань, КГТУ, периодичность 1 раз в два года.
- Международная студенческая школа-семинар «Новые информационные технологии», Судак, МГИЭМ, периодичность 1 раз в год.
- Международная молодежная конференция «Гагаринские чтения», Москва, «МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского, периодичность 1 раз в год.
- Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, периодичность 1 раз в год.
- Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, НГУ, периодичность 1 раз в год.
- Федеральная итоговая научно-техническая конференция всероссийского конкурса на лучшие научные работы студентов по естественным, техническим наукам и инновационным научно-образовательным проектам, Москва, периодичность 1 раз в год.
- Курчатовская молодежная научная школа, Москва, периодичность 1 раз в год.

Важной составляющей процесса непрерывного высшего специального образования и формирования высококвалифицированного специалиста в области физики вакуума, вакуумной техники и технологии является организация конкурсов на лучшую научно-исследовательскую студенческую работу. За последние 10 лет Российское вакуумное общество организовало следующие конкурсы:

- Конкурс РВО 1994 г.
- Конкурс РВО и фирмы «Varian» 1995 г.
- Конкурс РВО 1996 г.
- Конкурс РВО и фирмы «Leybold Vacuum GmbH» (Германия), 1997 г.
- Конкурс РВО и фирмы «Saes Getters», (Италия), 1999 г.
- Конкурс РВО на 1-й и 2-й российских вакуумных студенческих конференциях 2003 и 2005г.

С целью популяризации вакуумных знаний и увековечения деятельности создателя отечественной вакуумной науки, техники и технологии академика С.А. Векшинского во ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского» создан музей вакуумной техники, в котором представлена история вакуумной техники в России.

Музей открыт для внешних посетителей. Студенты ведущих технических вузов Москвы (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГИЭМ, «МАТИ» - РГТУ им. К.Э. Циолковского, МЭИ, МИРЭА) посещают музей во время вводных занятий по специализированным вакуумным дисциплинам, читаемым в этих институтах.

Во ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского» многие годы собиралась специализированная библиотека по вакуумной технике, включающая на сегодня 50 тысяч единиц хранения. В состав библиотеки входит мемориальная комната академика С.А. Векшинского, в которой хранятся его личные книги. Недавно библиотека переехала в новое отремонтированное помещение. Сегодня она открыта для доступа студентов и специалистов из других вузов и предприятий. Учитывая то, что во многих библиотеках вузов в течение ряда лет не происходило поступлений периодических изданий, значение такой библиотеки трудно переоценить.

С целью информационной поддержки специализированных научных предприятий и обеспечения учебной и научной литературой под эгидой РВО организованы вакуумные сайты vacuum.ru, dryvac.ru, rvs.org.ru, на которых можно найти справочную литературу, учебные пособия, проконсультироваться у специалистов, просмотреть каталоги зарубежных и отечественных предприятий, получить информацию о проводимых научных конференциях и семинарах, конкурсах и грантах.

Уровень научной квалификации членов учебно-научной группы подтверждается различными наградами, лауреатами которых они являются: это медали министерства образования РФ, медали РАН для молодых ученых, Государственная премия РФ для молодых ученых за выдающиеся работы в области науки и техники, за разработку и внедрение методов анализа сложных вакуумных систем, дипломы за победы в различных конкурсах.

Литература

1. Быков Д.В., Аляев В.А., Деулин Е.А., Кеменов В.Н., Нестеров С.Б., Панфилов Ю.В., Ребров А.К., Розанов Л.Н., Саксаганский Г.Л., Слепцов В.В. Система непрерывного высшего профессионального образования в области физики вакуума, вакуумной техники и технологии. ВТТ, т.14, № 4, с.191-203, 2004.

2. Нестеров С.Б. От студенческой школы-семинара к высшим научным достижениям. Материалы XIII Международной студенческой школы-семинара «Новые информационные технологии». Судак, 2005.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ

Н.К. Никулин, К.Е. Демихов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5
e-mail: nkn@bmstu.ru

В настоящее время трудно себе представить область промышленности, в которой не нашли бы применения технологические процессы, использующие вакуум. Происходит постоянное совершенствование и усложнение производственных технологий, а, следовательно, и ужесточение требований к рабочей среде, в которой происходит тот или иной процесс. В таких отраслях, как химическая, фармацевтическая, электронная, атомная, авиационная, пищевая, ряд производственных процессов, электронно- и ионно-лучевой обработки, пленочных покрытий, электронно-лучевой и лазерной сварки, травления поверхностей, выращивания кристаллов и т.д. среда оказывает огромное влияние на качество изделия и возможность проведения самого технологического процесса вообще. Не маловажную роль играют и экологические проблемы, необходимость специальных мероприятий, обеспечивающих защиту окружающей среды от загрязняющего воздействия системы откачки. Эти проблемы делают актуальным совершенствование существующих и разработку новых откачных систем, способных обеспечить безмасляную откачку, в широком диапазоне давлений от атмосферного (10^5 Па) до высокого вакуума (10^{-8} Па и меньше).

Создан целый ряд вакуумных систем, позволяющих обеспечить безмасляную откачку, таких как конденсационные, адсорбционные, электрофизические средства откачки. Однако все они требуют дополнительную предварительную откачку и обладают селективностью по различным газам. Кроме того, при периодических запусках и остановках системы откачки с форвакуумными насосами, содержащие масла различного типа, необходимы дополнительные меры защиты для предотвращения попадания паров углеводородов в откачиваемый объект.

В качестве механического высоковакуумного безмасляного насоса получил большое распространение турбомолекулярный вакуумный насос (ТМН). Основное отличие турбомолекулярного вакуумного насоса (рис.1.) от других безмасляных средств откачки то, что при откачке вакуумируемого объекта с помощью ТМН газ удаляется из системы в окружающую атмосферу, или в специальные газосборники. В остальных безмасляных высоковакуумных системах газ поглощается рабочими элементами, оставаясь в связанном состоянии внутри вакуумной системы. Турбомолекулярный вакуумный агрегат (ТВА), представляет собой турбомолекулярный вакуумный насос с форвакуумным насосом, соединительными трубопроводами и регулирующими устройствами. Комбинированный ТМН обеспечивающий откачку газа без дополнительного форвакуумного насоса, выполняет те же функции, что и турбомолекулярный вакуумный агрегат.



Рис.1. Турбомолекулярный вакуумный насос

ТМН применяются практически во всех современных технологических процессах, протекающих в условиях высокого вакуума при высокой требовательности к чистоте остаточной среды откачиваемого объема. В свою очередь условия работы ТМН и параметры внешней среды влияют на откачные характеристики насоса и всей вакуумной установки. Наличие магнитных, электрических, высокочастотных электромагнитных полей, - требует специальной системы защиты для высокочастотных электроприводов ТМН. Температура, состав и давление окружающей газовой среды также вносят изменения в откачную характеристику высоковакуумной системы откачки.

Турбомолекулярные вакуумные насосы и их комбинации с другими типами механических насосов, способны обеспечивать «безмасляный» вакуум в широком диапазоне давлений от 10^{-1} до 10^{-8} Па и ниже, обеспечивая быстроту действия от нескольких л/с до сотен тысяч л/с. Кроме того, эти насосы имеют приблизительно одинаковую быстроту действия практически для всех откачиваемых газов.

Эффективная работа ТМН достигается при молекулярном режиме течения газов (давление 0.1...1 Па и ниже) в проточной части насоса, что обеспечивает дополнительный форвакуумный насос.

Форвакуумный насос должен соответствовать по своим рабочим параметрам ТМН, кроме того, для получения абсолютно чистого вакуума (безмасляного) необходим и безмасляный форвакуум. В противном случае при остановке ТМН пары углеводородов из форвакуумной полости будут диффундировать по проточной части ТМН на сторону высокого вакуума.

Безмасляная среда в форвакуумной полости ТМН может быть обеспечена при безмасляной форвакуумной откачке и при использовании опор (газовые и магнитные подшипники) вращения ротора ТМН, в которых не применяются твердые вещества и жидкости, выделяющие углеводороды.

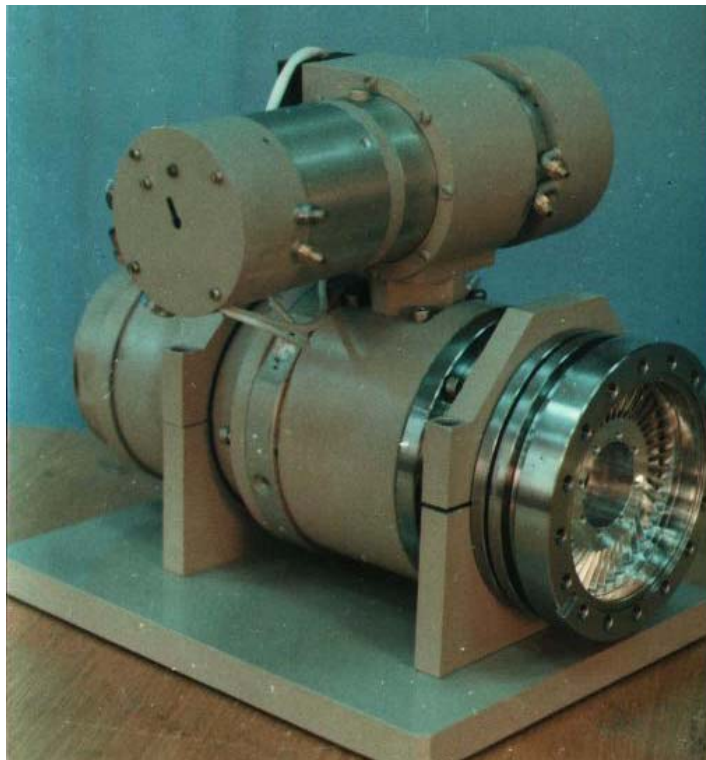


Рис.2. Турбомолекулярный вакуумный агрегат насос АВТ-100

На рис.3 и 4 представлены конструктивные схемы ТМН на газовых и магнитных опорах.

В качестве форвакуумных наиболее распространены механические пластинчато-роторные вакуумные насосы с опорами качения или скольжения на консистентной или жидкой смазке. Эти насосы, особенно на режимах близких к предельному вакууму, существенно загрязняют среду откачиваемого объема парами смазок, продуктами износа пластин и разложения масел.

Применение комбинированных ТМН /1/ с молекулярным насосом в качестве второй ступени и динамическими уплотнениями на газовых опорах позволило достичь абсолютной безмасляности откачки и практически неограниченного ресурса работы. Но существенным недостатком такого комбинированного насоса является высокая точность изготовления (радиальные зазоры между неподвижными и вращающимися деталями – 5...15 мкм) и сложность сборки, что значительно увеличивает его стоимость. Кроме того, низкая быстрота действия форвакуумной системы откачки, в качестве которой служит «динамическое уплотнение», вынуждает использовать дополнительный форвакуумный насос для начальной

предварительной откачки и при относительно больших откачиваемых потоках газа (соответствует давлению всасывания ТМН $0.1 \dots 0.01$ Па).

Наиболее просты в эксплуатации и дешевы опоры с подшипниками качения, но точность вращения не достаточна для молекулярных насосов и динамических уплотнений.

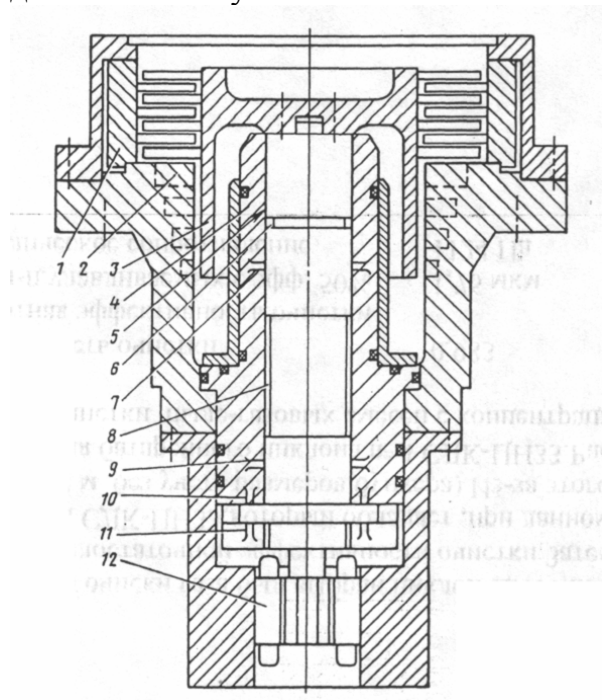


Рис.3. ТМН на газовых опорах

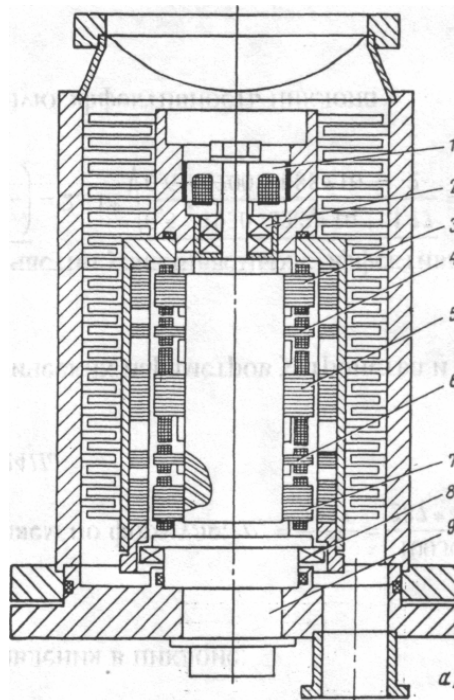


Рис.4. ТМН на магнитных опорах

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан новый насос (безмасляный молекулярно - вязкостный вакуумный насос), принцип действия которого позволяет работать как в молекулярной области режимов течения газа, так и в переходной и вязкостной.

При применении безмасляного молекулярновязкостного вакуумного насоса (БМВВН) в качестве второй ступени ТМН (рабочие органы ТМН и БМВВН располагаются на одном валу) возможна его работа в диапазоне давлений от 10^5 до 10^{-9} Па и ниже, т. е. применение такого комбинированного насоса устраняет необходимость в форвакуумном насосе, как для начальной предварительной откачки, так и при относительно больших откачиваемых потоках газа.

Причём, при работе ТВА с форвакуумным насосом объёмного действия откачная характеристика агрегата по смеси газов с различным процентным содержанием в основном зависит от состава газа среды у выходного патрубка форвакуумного насоса, качества конструкции форвакуумного насоса и растворимости откачиваемых газов в рабочих жидкостях. В комбинированных насосах состав газа также оказывает существенное влияние на его откачную характеристику прежде всего из-за различий в величинах динамической вязкости.

БМВВН (рис.5.) предназначены для работы в широкой области давлений всасывания: от 10^5 до 10^{-3} Па и ниже с быстротой действия от нескольких л/с до сотен л/с, т.е. в проточной части БМВВН будут существовать практически все известные режимы течения газа: от турбулентного и ламинарного до молекулярного, границы которых оцениваются числами: Рейнольдса (Re); Тейлора (Ta); Кнудсена (Kn).

БМВВН представляет собой конструкцию с многоступенчатой проточной частью, каждая из ступеней которой существенно отличается по условиям работы и по своим геометрическим и динамическим параметрам. Соответственно, отличны друг от друга и необходимые мощности ступеней для осуществления процесса откачки.

Высоковакуумные механические насосы (ТМН и молекулярные) практически не затрачивают энергии на собственно процесс откачки, а вся мощность, затрачиваемая на привод насоса, это в основном – трение в подшипниках.

В соответствии с условиями работы БМВВН составляющая энергетических затрат, необходимая для осуществления процесса откачки, значительно возрастает.



Рис.5. Образцы БМВВН

В ТВА, или комбинированном ТМН, при работе в установившемся режиме первая ступень, как и ТМН практически не вносит вклада в затраты мощности, а все затраты мощности приходятся на форвакуумную часть агрегата, на работу форвакуумного насоса или БМВВН, работающего в качестве второй ступени комбинированного ТМН.

Откачная характеристика комбинированного ТМН полностью идентична традиционным ТМН в области молекулярного режима течения газа. В этом диапазоне давлений расчёт проточной части ТМН комбинированного насоса может быть проведён на основании любого из известных методов /2/.

Расчёт проточной части БМВВН проведён методами статистического моделирования. И расчёт их совместной работы представлен расчётом работы ТМН с последним рабочим колесом в виде проточной части БМВВН.

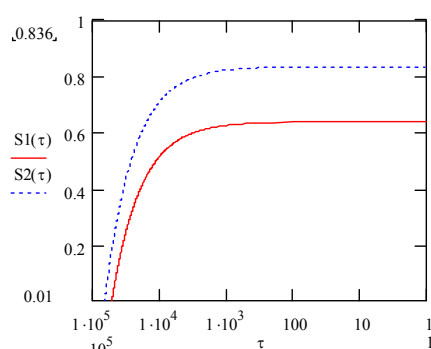
Разработанная модель расчёта БМВВН методами статистического моделирования дает возможность получить откачную характеристику во всем диапазоне изменения давлений всасывания и нагнетания при молекулярном режиме течения из уравнения

$$n_1 \cdot P = n_1 \cdot P_{1-2} - n_2 \cdot P_{2-1}, \quad (1)$$

где n_1 - концентрация частиц на входе в канал, n_2 - концентрация частиц на выходе из канала, P - вероятность перехода частицы через канал со стороны всасывания на нагнетание при разной концентрации частиц, $n_1 \neq n_2$ с учетом перехода частиц и со стороны входа на выход и со стороны выхода на вход, P_{1-2} - вероятность перехода частицы через канал со стороны всасывания на нагнетание, P_{2-1} - вероятность перехода частицы через канал со стороны нагнетания на всасывание.

Вероятности P_{1-2} и P_{2-1} вычисляется аналогично друг другу.

На рис. 6 представлены теоретические откачные характеристики (зависимости быстроты действия S от отношения давлений τ , создаваемого ТВА) комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов с быстротой действия 0,5 и 0,8 м³/с.



$S1(\tau) - \text{ТМН-500}; S2(\tau) - \text{ТМН-800}$

Рис.6

Основные параметры откачной характеристики:

- Максимальная быстрота действия

$$S_{MAX} = 36,4 \cdot F \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot K_{MAX},$$

где $K_{MAX} = P_{1-2} - P_{2-1}$, F - площадь входа в межлопаточные каналы рабочего колеса, T - температура газа (на поверхности проточной части), M - молекулярная масса газа;

- Максимальное отношение давлений

$$\tau_{MAX} = P_{1-2} / P_{2-1}.$$

В настоящее время у нас в стране и за рубежом ведутся работы по созданию комбинированных ТМН с использованием в качестве форвакуумных – молекулярных и вихревых ступеней, расположенных на одном валу с рабочими колёсами ТМН. Такие насосы способны обеспечивать откачку от атмосферного давления до сверхвысокого вакуума.

Литература

1. Демихов, Н.К. Никулин Расчёт комбинированных турбомолекулярных высоковакуумных насосов // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2001. - №3. – с. 23-29.
2. Механические вакуумные насосы/ Е.С.Фролов, И.В.Автономова, В.И.Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.: ил.

Секция 1
**Физические явления в вакууме,
расчет вакуумных систем**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНЫХ ВАКУУМНЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

И. Ю. Акимов, В.П. Михайлов
МГТУ им. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5
E-mail: mikhailov@bmstu.ru

Введение

Наиболее жесткие требования по точности позиционирования предъявляются к оборудованию микролитографии для изготовления сверхбольших интегральных схем (например, для рентгенолитографии погрешность позиционирования не более 0,02 мкм), к сканирующим зондовым микроскопам, (погрешность позиционирования зонда относительно образца не более 0,1 нм). Все это заставляет более глубоко исследовать процессы трения в точных вакуумных механизмах автоматизированного оборудования. Одним из классов таких механизмов сверхточного позиционирования является класс устройств реологического типа. Основным элементом этих устройств является магнитореологическая жидкость (МР – жидкость), характеризующаяся тремя фундаментальными параметрами: эквивалентной динамической вязкостью $\mu_{\text{экв}}$, пластичностью τ_0 и упругостью E , влияющими на точность позиционирования привода. Принцип работы этих устройств, а также разработка методики проведения экспериментов были описаны в [1]. Данная работа посвящена исследованию пластичности МР – жидкости и определению составляющей суммарной погрешности позиционирования, которая определяется силами статического трения в МР – жидкости.

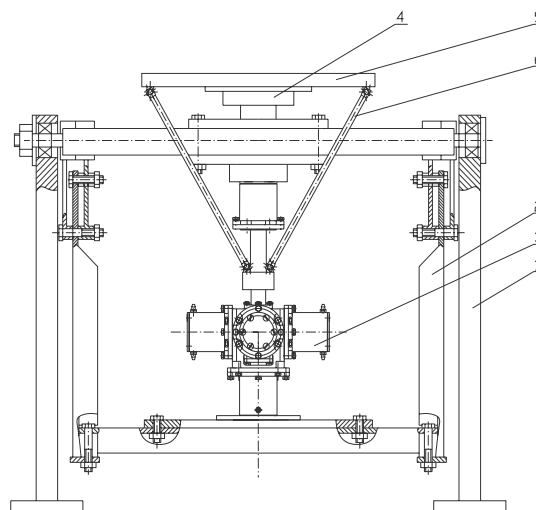


Рис. 1. Стенд для исследования характеристик МР – привода:

- 1 – неподвижная часть опоры;
- 2 – поворотная часть опоры;
- 3 – МР – привод; 4 – узел упругой подвески; 5 – макет элементарного сегмента зеркала; 6 – тяги

является класс устройств реологического типа. Основным элементом этих устройств является магнитореологическая жидкость (МР – жидкость), характеризующаяся тремя фундаментальными параметрами: эквивалентной динамической вязкостью $\mu_{\text{экв}}$, пластичностью τ_0 и упругостью E , влияющими на точность позиционирования привода. Принцип работы этих устройств, а также разработка методики проведения экспериментов были описаны в [1]. Данная работа посвящена исследованию пластичности МР – жидкости и определению составляющей суммарной погрешности позиционирования, которая определяется силами статического трения в МР – жидкости.

Методика проведения экспериментов по определению τ_0 , δ_c . Предельные сдвиговые напряжения как функцию $\tau_0 = f(p, H)$, где p – перепад давлений в вакуумной системе; H – напряжённость внешнего магнитного поля

можно определить по формуле: $\tau_0 = \frac{p \cdot d}{4 \cdot l}$ (1), где p - перепад давлений в вакуумной системе; d - диаметр стеклянной бюретки; l - длина рабочего зазора в направлении течения жидкости. Предельные сдвиговые напряжения определяют такую важную величину, как составляющую погрешности позиционирования, которая определяется силами статического трения в МР – жидкости, иначе говоря, границы применимости оборудования реологического типа. Составляющую суммарной погрешности позиционирования по силам статического трения в МР – жидкости можно определить по формуле: $\delta_c = k \cdot \tau_0 \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ (2), где $k = 4,2 \cdot 10^{-7}$ м/Н – коэффициент передачи МР – модуля по силам статического трения; d - диаметр стеклянной бюретки.

Для исследования характеристик МР – привода создан специальный стенд, показанный на рис. 1. Данный привод может быть использован для вакуумного аналитического оборудования, а также для позиционирования зеркал в больших астрономических телескопах, например АСТ – 25, поэтому стенд практически полностью повторяет одну из ячеек телескопа.

Экспериментальные исследования τ_0 , δ_c . По формуле (1) и (2) рассчитаны предельные сдвиговые напряжения и составляющая суммарной погрешности позиционирования по силам статического трения в МР - жидкости для трёх различных значений перепада давления ($p_1 = 3700$ Па, $p_2 = 5500$ Па, $p_3 = 8060$ Па): $\tau_{01} = 46,25$ Па; $\delta_{c1} = 6,1 \cdot 10^{-11}$ м; $\tau_{02} = 68,75$ Па; $\delta_{c2} = 9,1 \cdot 10^{-11}$ м; $\tau_{03} = 100,75$ Па; $\delta_{c3} = 13,3 \cdot 10^{-11}$ м.

Вывод: результаты проведённой работы показали, что использование привода реологического типа позволяет достичь потенциальной точности позиционирования порядка 10^{-10} м, определяемой силами статического трения в МР – жидкости.

Литература

1. “Вакуумная наука и техника” Материалы X научно – технической конференции в 2 – х томах. Под редакцией доктора технических наук, профессора Д. В. Быкова. М.: МИЭМ.2003-662с.
2. “Вакуумная техника: Справочник” /под общ. редакцией Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева, - М.: Машиностроение; 1992. –480 с. 2-е издание, переработанное и дополненное.
3. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИОННО- ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ КАТОД ПОДЛОЖКА

А.В. Ботин, В.В. Гайдаев, Н.А. Смоланов, Н.А. Панькин
МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Большевицкая, 68
e-mail: smolanovna@freemail.mrsu.ru

Плётки нитрида титана нашли широкое распространение в различных областях науки и техники – таких как машиностроение, микроэлектроника и т.д. Их применяют в качестве барьерных, защитных, упрочняющих и декоративных покрытий на различные подложки (металлы, стали, полупроводники, стекло и т.д.). Работы в данной области, в основном, посвящены изучению распределения составляющих низкотемпературной плазмы в объёме вакуумной камеры [1, 2] – атомы, ионы, капли материала катода (макрочастицы) и их зависимости от режимов ионно-плазменной модификации поверхности. При этом достаточно мало работ (особенно в российских научных журналах) по исследованию зависимости физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик системы «плётка-подложка» от местоположения подложки в рабочей области вакуумной камеры.

Поэтому целью нашей работы являлось исследование физико-механических свойств покрытий нитрида титана в зависимости от расстояния катод-подложка. Нами получены зависимости остаточных напряжений, параметров тонкой кристаллической структуры (микродеформации, дисперсность блоков), параметра кристаллической решётки, текстуры и элементного состава системы «плётка-подложка» от вышеуказанного параметра. Исследуемые плётки наносились на установке ННВ-6.6И4 с блоком дооснащения «Поток» методом конденсации с ионной бомбардировкой (метод КИБ), позволяющей одновременно фиксировать спектральный состав получаемой плазмы [3].

Рентгенографическое исследование проводилось на дифрактометре ДРОН-6 в фильтрованном медном излучении. Остаточные напряжения определяли методом $\sin^2\psi$ (метод поворота). В качестве эталона служил мелкодисперсный отожжённый порошок меди. Параметры тонкой кристаллической структуры определяли методом аппроксимаций профиля рентгеновской дифракционной линии. Элементный состав определяли на рентгенофлуоресцентном спектрометре СПАРК-1-2М. Для обработки данных применяли программные комплексы PDWin 4.0 и СПАРК-2W (НПО «Буревестник»).

Литература

1. Лунёв В.М. и др. ЖТФ. 1977, т. 47, № 7. с. 1486-1490.
2. Егоров В.Д. и др. ФХОМ. 1992, № 6. с. 69-75.
3. Смоланов Н.А. и др. Вакуумные технологии и оборудование. Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2002. С.223-226.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ДУГИ ПРИ НАНЕСЕНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ТИТАНА

Т.А. Аверченкова, Н.А. Смоланов, Н.А. Панькин
МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Большевицкая, 68
e-mail: smolanovna@freemail.mrsu.ru

Широкое применение низкотемпературной газоразрядной плазмы стало возможным, благодаря более эффективным (по сравнению с обычными термическими методами) осуществления реакций получения порошков, покрытий, плёнок. Получение низкотемпературной плазмы обусловлено взаимодействием электронов, обладающих достаточной энергией для возбуждения, диссоциации и ионизации атомов и молекул. Природа и механизм этих взаимодействий объясняется существованием электростатических сил и сил квантово-механической природы. Ионизация в низкотемпературной плазме, обусловленная электронным ударом, сопровождается испусканием различного излучения, в том числе и видимого. В зависимости от характера взаимодействия электрона с атомами механизм излучения может иметь дискретный, рекомбинационный и тормозной характер [1, 2].

В работе рассмотрены основные понятия, критерии и условия существования равновесной изотермической неравновесной плазмы с позиций термодинамики (условие детального равновесия). Определены границы электронной плотности, электронной температуры и дебаевского радиуса экранирования для плазменных потоков в тлеющих и дуговых разрядах низкого давления. Из всех процессов, реализуемых с помощью низкотемпературной газоразрядной плазмы, более детально рассмотрены плазмохимическое осаждение, ионно-плазменная модификация поверхности (физико-химическое осаждение вещества из материала мишени, модифицируемого в газовой фазе). Рассмотрены взаимодействия электрона с частицами, приводящие к возникновению фотонной эмиссии в газоразрядной плазме [3, 4].

Для исследования спектров была собран измерительный комплекс, включающий в себя установку для ионно-плазменной обработки материалов ННВ.6И4 с блоком дооснащения “Поток” и блок на базе монохроматора МДР-23. Регистрация оптического сигнала от светящейся плазмы в области между катодами и подложкой в камере установки ННВ - 6.6И4 осуществлялась через окно камеры (“гляделку”) фотоэлектронным умножителем ФЭУ-93.

Исследование спектра, записанного с помощью двухкоординатного самописца Н-307, проводилось в области 350-800 мкм (включающего инфра - и ультра-область излучения). Геометрия съёмки спектра позволило свести к минимуму излучение, связанное с высвечиванием возбужденных частиц над поверхностью катода, которое способно полностью подавить излучение, возникающее в объёме вакуумной камеры. Исследовались спектральные

составы плазмы, образованной распылением титанового катода (титан ВТ1-00 и ВТ1-0) в атмосфере аргона, азота, ацетилена и их соединений в межэлектродном пространстве. В качестве подложки использовались пластины нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Ток дуги не изменялся в ходе эксперимента и составлял 75 А., напряжение на подложке варьировалось от 220 до 600 В., давление в камере $10^{-1} - 10^{-2}$ Па, подача газов регулировалась в широком диапазоне. Съёмка спектра производилась при работе одного или двух испарителей.

По результатам спектральных измерений проведён анализ распределения частиц плазмы по энергиям. При этом были использованы метод изучения пространственного распределения плазмы с учётом интенсивности линий спектра. Распределение частиц металлической плазмы в объёме камеры определялось в основном током магнетрона, потенциалом, размером подложки и геометрией её размещения в вакуумной камере. Проведён сравнительный анализ распределения частиц по энергиям методом измерения сдвига и уширения контура спектральных линий в результате эффекта Доплера. Были исследованы контуры линий титана Ti I ($\lambda = 365.3$ нм и $\lambda = 430.5$ нм), Ti II ($\lambda = 368.5$ нм) и Ti III ($\lambda = 421.5$ нм).

Литература

1. В. В. Грицина. О моделях образования возбуждённых частиц при ионной бомбардировке твёрдых тел //Поверхность. Физика, химия, механика. 1982, № 4, с. 62 – 71.
2. В. В. Грицина. О некоторых направлениях развития исследований ионно-фотонной эмиссии //Радиотехника и электроника. 1992, т. 37, вып. 10, с. 1874 – 1822.
3. С. С. Поп, и др. Непрерывное излучение при ионной бомбардировке некоторых переходных металлов //ЖЭТФ. 1977, т. 73, вып. 1 (7), с. 93 – 98.
4. С. Ф. Белый, В. И. Векслер. О природе образования непрерывного спектра фотонов, испускаемых продуктами катодного распыления //Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1979, т. 43, № 3, с. 589 – 594.

СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОСОДЕРЖАНИЯ В МАТЕРИАЛАХ

И.П. Меньшиков, П.И. Коновалов.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5
e-mail: menshikov_ilya@mail.ru, nevshupa@mail.ru

Исследование газосодержания в материалах является актуальной проблемой, поскольку содержание газов в материалах влияет на их физические и химические свойства. В настоящее время существуют различные методы изучения и анализа количества газа в материале, но большинство из них не предназначены для изучения водорода и требуют больших энергетических и финансовых затрат. Таким образом, стоит актуальная проблема разработки дешёвого способа определения содержания газа в материалах, который был бы чувствителен ко всем газам и позволял бы определять распределение газа по глубине материала.

На основе последних исследований закономерностей поведения десорбции, проведённых МГТУ им. Н.Э. Баумана в сотрудничестве с институтом материалов Мадрида и институтом передовых технологий Японии, был предложен метод, основанный на трибодесорбции газа, то есть на выделении газа при трении.

Поскольку для точного анализа газосодержания необходимо по изменению давления судить о динамическом газовом потоке, выделяющемся из материала, то для реализации метода была разработана математическая модель поведения давления в вакуумной системе при прерывистом газовыделении.

Для экспериментальной проверки математической модели и реализации данного метода был разработан проект сверхвысоковакуумной установки для измерения газосодержания в материалах, которая будет изготавливаться по совместному проекту МГТУ им.Н.Э.Баумана и институтом материалов Мадрида.

Разработанный стенд состоит из вакуумной камеры, откачной системы и механического ввода для экспериментального изучения процесса газовыделения при трении. Измерение давления производится ионизационным вакуумметром, спектр газа измеряется масс-спектрометром.

Сущность эксперимента заключается в исследовании процессов трения, происходящих в вакуумной камере. Для этого разработан экспериментальный механический ввод, позволяющий производить трение индентора (наконечника с шариком диаметром 3 миллиметра) о поверхность исследуемого материала (образец размером 15*15мм). При трении происходит выделение газа из исследуемого образца. Таким образом, о потоке выделяющегося газа можно судить по измеряемому давлению с помощью использования математической модели.

Данный механический ввод выполнен в виде съемного модуля, что позволяет использовать его отдельно в других вакуумных системах.

Важными особенностями разработанной установки являются простота устройства и обслуживания экспериментального ввода, большой диапазон возможных исследований.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

М.А. Асташина, *Ю.К. Васильев, *С.Б. Нестеров

МЭИ, Москва, Красноказарменная, 14.

*ФГУП «НИИВТ им. С. А. Векшинского»

e-mail: mari315@front.ru, nesterovsb@niivt.ru

Использование вакуумного оборудования в различных областях современной науки и техники, например, в микро- и нанoeлектронике, термоядерной энергетике, физике твердого тела, установках имитации космического пространства и т. д. обуславливает необходимость выявления наиболее простого и вместе с тем эффективного метода проектировочных расчетов для исследования параметров вакуумного оборудования в разных режимах течения, что и является целью данной работы.

Для расчета применяется метод аналогии с электрическими цепями [1] (Дэшмановский подход) и метод единого универсального уравнения вакуумной техники [2, 3] (УУВТ).

В данной работе рассматривается многокомпонентная вакуумная система, состоящая из (рис.1):

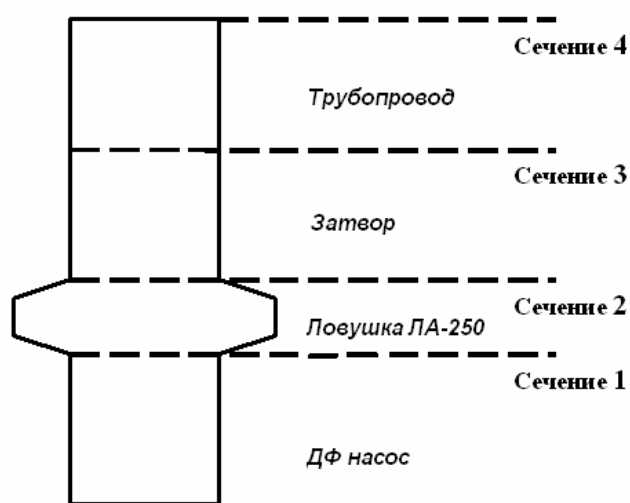


Рис. 1. Многокомпонентная вакуумная система

- диффузионного насоса HD-250 (серийно выпускаемый насос компании ВЭС-Edwards);
- ловушки ЛА-250 (серийно выпускаемая ловушка компании Вакууммаш);
- вакуумного затвора DN-250 (серийно выпускаемый затвор компании VAT Series 65);
- цилиндрического трубопровода круглого сечения; откачиваемого объема.

Использование реального оборудования в качестве элементов, составляющих анализируемую вакуумную систему, позволяет сравнить эти методы непосредственно в условиях, с которыми сталкивается проектировщик при решении актуальных задач разработки и оптимизации сложных вакуумных систем [4].

Для того чтобы сравнить и проанализировать эти методы, рассматривается молекулярный режим течения, вязкостный и переходный.

Несмотря на широкую известность и распространение аналитических подходов расчета составных систем, их развитие до сих пор продолжается, поскольку проектировщику необходим достаточно простой и, вместе с тем, эффективный метод расчета вакуумных систем, который можно использовать без освоения сложного и разветвленного математического аппарата различных численных методик [5]. Это позволит существенно сократить временные, технологические и финансовые затраты.

Исследование параметров вакуумного оборудования в разных режимах течения показало, что среди используемых методик расчета, наиболее точной (близкой к паспортным данным) является метод единого универсального уравнения вакуумной техники.

В данной работе рассматривались разные методики вычисления суммарной проводимости сложной многокомпонентной вакуумной системы. Безусловно, наиболее эффективным является метод расчета по универсальному уравнению вакуумной техники.

Для приблизительных расчетов суммарной проводимости можно применять традиционный метод.

Использование метода, основанного на универсальном уравнении вакуумной техники более эффективно, нежели традиционного (Дэшмановского) подхода. Однако его применение осложняется необходимостью наличия исчерпывающих данных о характеристиках элементов, в том числе их зависимостей от рабочего давления, что ограничивает его использование компоновкой вакуумной системы из элементов с известными параметрами. Кроме того, возможны некоторые неопределенности при анализе вакуумных систем, поскольку большая часть оборудования относится к пассивным элементам.

Литература

1. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. -М.: Мир, 1964.-873 с.
2. Беляев Л.А. — К расчету N-компонентных вакуумных систем — Вакуумная техника и технология, т. 12, н. 1, с. 31-44, 2002.
3. Беляев Л.А. — К расчету N-компонентных вакуумных систем. Часть 2 — Вакуумная техника и технология, т. 12, н. 4, с. 215-224, 2002.
4. Нестеров С. Б., Асташина М. А., Васильев Ю. К. Анализ различных методов расчета многокомпонентных вакуумных систем. Вакуумная техника и технология, 2004, №4.
5. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Андросов А.В., Методы расчета вакуумных систем. Москва, МЭИ, 2004. 220 с.

РАСЧЕТ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Т.В.Куликова, Н.К. Никулин
МГТУ им.Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5
e-mail: nkn@bmstu.ru

Цель работы – выбор метода расчета проводимости вакуумной системы и ее эффективной быстроты откачки.

Быстрота откачки вакуумной системы зависит от быстроты откачки насоса и проводимостей соединительных элементов. Как показала практика расчетов наиболее универсальным является расчет методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). При расчетах предполагается молекулярный режим течения, температура поверхностей вакуумной системы остается постоянной, отражение частиц от поверхностей вакуумной системы описывается диффузным законом распределения частиц по скоростям теплового движения, подчиняющегося закону Максвелла.

Анализ расчета сложных систем методом Монте-Карло показал, что необходимо проводить расчет каждого из элементов, входящего в рассматриваемую систему, отдельно. Основными элементами, входящие в вакуумную систему, являются вакуумный насос и соединительные магистрали. В данной работе расчет вакуумного насоса не рассматривается и задаются только его характеристики: быстрота действия насоса и давление всасывания.

По результатам расчета проводимость каждого из элементов, входящего в систему, определяется проводимость всей соединительной магистрали и эффективная быстрота действия всей системы.

Существует много методов определения проводимостей: Монте-Карло, традиционный метод Дэшмана и метод Оутли (вероятностный метод).

Как показали исследования в данной работе, традиционный метод Дэшмана полностью совпадает с методом Оутли, если представить проводимость каждого элемента как сумму собственной проводимости элемента и проводимости входного отверстия, как предлагал Дэшман.

В данной работе проведены расчеты по методу Дэшмана с учетом проводимости входного отверстия и без. Показана ошибка при расчете по методу Дэшмана, если не учитывается влияние сопротивления входного отверстия. Эта ошибка может превышать 100%. Результаты расчетов по методу Дэшмана с учетом проводимости входного отверстия, напротив, показывают точность данного метода и практически совпадают с результатами расчетов методами Монте-Карло и Оутли.

Проведены расчеты эффективной быстроты действия насоса для трубопроводов постоянного и переменного диаметра, для каждого случая вычислены вероятности прохождения частицы с входа на выход, а также построены графики зависимости этой вероятности с учетом и без учета проводимости входного отверстия от длины соединительной магистрали. Для сравнения построена кривая коэффициентов Клаузинга.

При расчете эффективной быстроты действия насоса также необходимо учитывать проводимость входного отверстия в насос. В противном случае возникает аналогичная ошибка, как и при расчете проводимостей сложного трубопровода.

Показано, что при определении проводимости сложного трубопровода, состоящего из элементов вакуумной системы, имеющих относительно небольшую проводимость по сравнению с проводимостью входного отверстия в данный элемент, может быть использовано традиционное уравнение Дэшмана без учета проводимости входа.

По результатам расчета можно проследить как длина трубопровода влияет на ошибку вычислений. Если взять за один элемент часть трубопровода, коэффициент Клаузинга для которого равен 0.672, то при длине трубопровода, состоящего из 5 таких элементов, ошибка вычисления без учета влияния проводимости входного отверстия составляет 57.3%, а с учетом влияния проводимости входного отверстия – всего 7.6%, соответственно при длине трубопровода из 10 таких элементов - 66% и 13.8%, при длине из 100 элементов – 74% и 22.2%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в уравнении Дэшмана можно не учитывать проводимость входа только для элементов в виде длинных трубопроводов, когда сопротивление входного отверстия намного меньше, чем собственное сопротивление трубопровода.

ПРОВОДИМОСТЬ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ, ОБРАЗОВАННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ПРИ МАЛЫХ ПЕРЕПАДАХ ДАВЛЕНИЙ В ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

А.Р. Валеев, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Расчет откачных характеристик любого бесконтактного вакуумного насоса базируется на знании величины обратных перетеканий через щелевые каналы различной геометрии. Уравнения, используемые в настоящее время для расчета массового расхода через щелевые каналы, чаще всего представляют собой аппроксимацию экспериментальных данных, полученных при продувке некоторых типов щелей [1,2]. В частности в работе [3] представлены зависимости проводимости U от среднего давления $P_{CP} = (P_1 + P_2)/2$ (где P_1 и P_2 – давления на входе и выходе), полученные для каналов 1-3 (рис.1) при малых перепадах давлений – $P_1 - P_2$ и варьировании размеров канала.

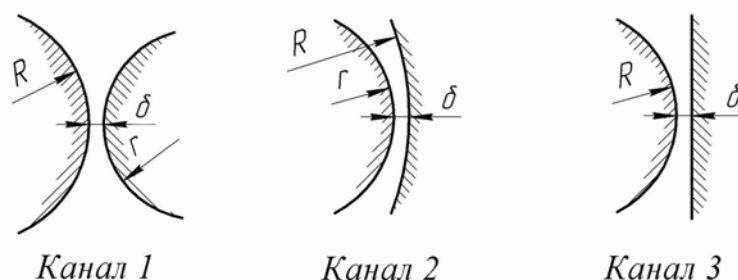


Рис 1. Конфигурация исследуемых каналов

Аппроксимация полученных данных позволила рекомендовать для каналов 2, 3 следующее уравнение

$$U = 29,333 \cdot 10^{-3} \frac{\delta^2 m^{0.3923} L}{\eta} P_{cp}, \quad (1)$$

где δ - величина минимального зазора, L - глубина щели, η - динамическая вязкость газа, $m = (\delta/r \pm \delta/R)$.

Использование для построения аппроксимации экспериментальных данных имеет ряд существенных недостатков: геометрия и относительные размеры щелевых каналов, зависящие для бесконтактных вакуумных насосов от формы профиля роторов, отличаются чрезвычайным разнообразием; погрешность экспериментальных данных по проводимости, как правило, увеличивается с понижением уровня давлений; факторы, влияющие на проводимость и массовый расход G (например, P_1 и $\tau = P_1/P_2$) могут изменяться в очень широком диапазоне.

Поэтому получить необходимые экспериментальные зависимости U и G для всех типов каналов при варьировании всех факторов практически невозможно. Для решения данной задачи можно воспользоваться численным решением уравнений, описывающих процесс течения газа в ламинарном режиме, а эксперимент применять в основном как средство проверки расчетных значений.

В данной работе путем численного решения системы дифференциальных уравнений для ламинарного течения сжимаемого газа рассчитаны значения U для каналов 1-3. Полученные расчетные зависимости для канала 2 представлены на рис.2.

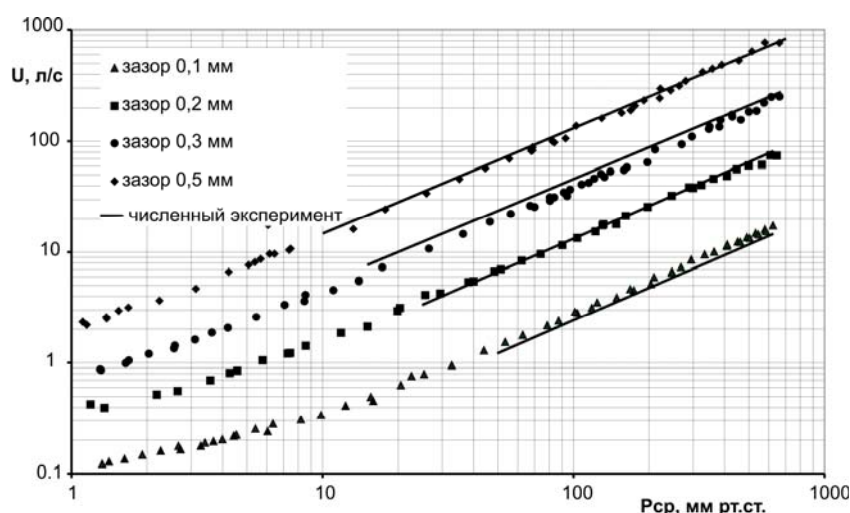


Рис.2 Проводимость канала 2 при $R=60$ м.; $r=22,5$ мм; $L=130$ мм

Со стороны низкого давления мы ограничились давлением, при котором критерий Кнудсена Kn для данной геометрии канала не превышал 10^{-2} , поскольку при более высоких Kn начинает сказываться скольжение газа на стенках. Этим объясняется увеличивающееся расхождение расчета и эксперимента при понижении давления.

Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей показывает их хорошее согласие (среднее отклонение 5 %, при максимальном отклонении 15 %).

Литература

1. Захаренко С.Е. Экспериментальные исследования протечек газа через щели. Тр.ЛПИ, 1953, №2, с.161-170.
2. Сакун И.А. Винтовые компрессоры. М.: Машгиз, 1960. 359с.
3. Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Панфилович К.Б., Бронштейн М.Д. Исследование проводимости щелевых каналов бесконтактных вакуумных насосов в вязкостном режиме течения газа// Компрессорная техника и пневматика, №2, 2005.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО ВОДОРОДА С НИОБИЕМ

Е.В. Воронкин, В.С. Петров
МГИЭМ, Москва, Б. Трехсвятительский, 3/12
e-mail: vspetrov@miem.edu.ru

При создании современных электрофизических установок важной задачей является обеспечение в них высокого вакуума. Для термоядерных реакторов эта проблема особенно актуальна, поскольку в них для стабильной работы необходимо поддерживать постоянный состав плазменного шнура. Основным откачиваемым газом в ТЯР является водород $1H$, попадающий в объём вместе с впрыскиваемым топливом и образующийся при ядерных реакциях в плазме. Для его непрерывной откачки было предложено использовать мембранные диффузионные насосы.

Для откачки водорода оптимальным материалом для изготовления фольги (мембраны) является ниобий. Одной из его особенностей является свойство «сверхпроницаемости» надтепловым водородом: при падении потока газа на поверхность мембраны скорость прохождения потока к противоположной (выходной) поверхности значительно превышает рассчитанную по коэффициенту диффузии. Эксперименты по получению эффекта сверхпроницаемости ниобия водородом были проведены неоднократно и исследована его зависимость от толщины мембраны и состояния её поверхности, однако до сих пор мало изучена зависимость проявления этого эффекта от температуры мембраны. При этом интерес представляет взаимодействие ниобия с тепловым водородом.

Целью работы является определение зависимости кинетических параметров взаимодействия водорода с ниобием для разработки теории водородопроницаемости ниобиевой фольги.

Измерения проводились на установке вакуумного термогравиметрического анализа. Основу установки составляют вакуумные коромысловые микровесы с торсионной подвеской коромысла, предназначенные для кинетических исследований в различных газовых средах при различных давлениях и температурах.

Для исследований использовались два различных образца.

Первый образец представляет собой тонкую пластину (фольгу) из химически чистого ниобия. Размеры образца $1\text{см} \times 3,84\text{см} \times 25\text{мкм}$; площадь поверхности $7,68\text{ см}^2$; исходный вес $8,071 \cdot 10^{-2}\text{ г}$; объём $0,0096\text{ см}^3$ при плотности ниобия $8,57\text{ г/см}^3$. Образец был изготовлен в РНЦ «Курчатовский институт». Образец имеет поликристаллическую структуру.

Второй образец – монокристалл ниобия в форме шайбы. Средний диаметр образца $12,5\text{ мм}$, толщина – $2,0\text{ мм}$. Площадь поверхности $3,30\text{ см}^2$, исходный вес $1,81947\text{ г}$, объём – $0,2123\text{ см}^3$. Монокристалл был получен методом выращивания в аргоновой плазме.

Температурные режимы были различны для каждого образца и представляли: для ниобиевой фольги – нагрев с постоянной скоростью от 20°C до 700°C; для монокристалла ниобия – нагрев с постоянной скоростью от 20°C до 700°C и последующую изотермическую выдержку при 700°C в течение 1 часа. Для обоих образцов скорости нагревания были равны 5°/мин, 10°/мин и 20°/мин.

В процессе измерений фиксировались зависимости температуры $T=f(\tau)$ и изменения веса исследуемого образца $\Delta m=f(\tau)$ от времени.

В результате измерений были получены температурные и временные зависимости изменения веса исследуемых образцов при взаимодействии с водородом.

По экспериментальным кривым были рассчитаны кинетические параметры взаимодействия ниобия с водородом в зависимости от условий проведения эксперимента и структуры образцов.

Отдельно рассмотрен колебательный процесс, происходящий при взаимодействии ниобиевой мембраны с водородом при температурах до 400°C.

Результаты проведенной работы:

1. Изучена зависимость параметров взаимодействия ниобия с водородом от структуры исследуемых образцов, температуры и скорости нагревания.
2. Проведено моделирование происходящих в системе процессов.
3. Рассчитаны кинетические параметры взаимодействия ниобия с водородом.
4. Обнаружен температурный интервал, на котором в системе возникает колебательный процесс.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Т.С.Васильева, *Ю.К.Васильев, *С.Б.Нестеров

МЭИ, Москва, Красноказарменная, 14

*ФГУП «НИИВТ им. С.А.Векшинского», Москва, Нагорный пр-д, 7

e-mail: tsvass@mail.ru, nesterovsb@niivt.ru

Одной из важнейших частей аппаратуры, используемой в таких областях как микро- и нанoeлектроника, термоядерная энергетика, ускорительно-накопительная техники является вакуумное оборудование, отвечающее за создание необходимых условий работы этой аппаратуры. Например, вакуумная изоляция в термоядерном реакторе, система создания разреженной газовой среды с заданными характеристиками в ускорительных установках. Таким образом, разработка, проектирование и модернизация такой аппаратуры не обходится без проработки вопросов, касающихся проектирования сопутствующих вакуумных систем. При этом необходимо отметить, что проведение исчерпывающих экспериментальных исследований на этапе проектирования нецелесообразно, так как вакуумные системы тесно интегрированы с другим оборудованием, и для их испытаний нужно собрать весь комплекс в целом, что невыгодно экономически и технологически. Поэтому актуальной становится задача проведения предварительного проектировочного анализа с целями выявления наиболее ответственных частей проекта, определения характеристик всей системы в целом и выбора наилучшей конфигурации из предложенного набора. На этапе модернизации также необходимо с наименьшими затратами улучшить уже существующую конструкцию.

Современные требования к достоверности и качеству анализа обуславливают необходимость развития таких методов, которые позволяют проанализировать весь комплекс характеристик вакуумных систем и учитывать их взаимное влияние. Кроме того, необходимой составляющей этих методов является возможность их автоматизации.

Данная работа посвящена разработке универсального метода комплексного анализа характеристик сложных вакуумных систем, а также различных аспектов, связанных с проектированием нового и модернизацией уже существующего вакуумного оборудования, широко используемого в самых разных областях науки и техники. Рассмотрен широкий спектр вакуумных систем и разработан ряд решений, позволяющий существенно уменьшить затраты при проектировании такого оборудования.

Проведенный в данной работе всесторонний анализ оборудования систем создания и поддержания вакуума как с технико-экономических, так и с проектно-эксплуатационных позиций позволил выявить основные особенности процессов разработки, проектирования, модернизации и эксплуатации. Одной из таких особенностей является стремление производителей вакуумного оборудования разрабатывать максимально

универсальные решения, с тем, чтобы минимизировать издержки на их адаптацию для конкретной области или сегмента рынка. Например, разрабатывая крионасосы для нужд микроэлектронной промышленности, производители стараются заложить в их конструкцию максимально возможный потенциал, который позволит использовать эти крионасосы и в ряде других областей без существенной модернизации. Путем простого масштабирования те же самые конструкции с успехом используются в термоядерной энергетике, нанотехнологии, установках физики твердого тела, системах имитации космического пространства и в других областях. Таким образом, основные акценты при разработке смещаются в сторону проведения проектировочных расчетов, а уже затем, с использованием их результатов – экспериментальных исследований.

На основании проведенного анализа основных тенденций проектирования и существующих подходов к анализу оборудования разработан универсальный метод комплексного исследования вакуумных систем на этапе проектирования и/или модернизации, включающий методику предварительного анализа как системы в целом, так и ее отдельных элементов с учетом всех технико-эксплуатационных факторов (сильная структурная усложненность, наличие неравновесных и нестационарных условий работы), алгоритмы анализа множества конструкций, с целью выявления наилучшей по заданным критериям, и дальнейшее проведение с учетом результатов расчетов экспериментальных исследований системы на разных уровнях детализации. Ядром разработанного подхода является метод Монте-Карло, модифицированный таким образом, что позволяет анализировать потоки молекул и других частиц с заданными траекториями движения и законами взаимодействия в геометрически сложных системах в неравновесных и нестационарных условиях [1, 2].

Предлагаемая методика проиллюстрирована на ряде актуальных задач вакуумной техники и технологии.

Совокупность всех разработанных алгоритмов, решений и технологий сведена в единый универсальный продукт (комплекс программ автоматизированного проектирования) – инструмент, позволяющий проектировщику в кратчайшие сроки проводить исчерпывающий анализ и на его основе разрабатывать более совершенные конструкции вакуумных систем без необходимости осваивать множество расчетных и экспериментальных методов исследований.

Литература

1. Нестеров С. Б., Строгова Т. С., Васильев Ю. К. Исследование характеристик разреженного газа в различных режимах течения. Материалы X Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». Москва, ОАО ЦНИТИ «ТЕХНОМАШ», 2004. 247-256.
2. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Андросов А.В., Методы расчета вакуумных систем. Москва, МЭИ, 2004. 220 с.

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ СЕЛЕКТИВНОГО СОРБЕНТА ВОДЫ

И.В.Белокрылов, В.А. Ткаченко
ОмГТУ, Омск, пр. Мира, 11
e-mail: BIV@OmGTU.ru

Методы регенерации адсорбентов можно подразделить на низкотемпературную термическую регенерацию, высокотемпературную термическую, химическую, вытеснительную и регенерацию понижением давления, а также горячую вакуумную регенерацию. Низкотемпературную термическую регенерацию адсорбентов проводят их обработкой перегретым или насыщенным острым водяным паром либо газами при температуре 100-400 °С.

Часть водяного пара, подаваемого на десорбцию, идет на нагрев адсорбента и аппарата, на компенсацию теплоты адсорбции и отрицательной теплоты смачивания. Другая, несконденсировавшаяся часть пара уносит десорбированное вещество из аппарата. С помощью водяного пара обычно регенерируют активный уголь. Силикагели, алюмогели и цеолиты регенерируют продувкой при повышенной температуре.

Выбор температуры регенерации определяется энергией связи адсорбат-адсорбент, необходимой полнотой десорбции, термической стойкостью адсорбента и временем регенерации. Чем выше энергия связи между молекулами адсорбата и адсорбента и полнее требуется десорбция, тем более высокой должна быть температура регенерации. За пороговую температуру, ниже которой процесс регенерации осуществлять нецелесообразно, принята величина, при которой половина адсорбата удаляется в вакууме в течение 10 мин.

В случае горячей вакуумной регенерации отсутствуют потери сжатого воздуха, т.к. он берется извне с помощью установленного на осушителе вакуумного насоса. Использование вакуумной технологии с низкими значениями температуры регенерации и экономичного соотношения адсорбента обеспечивает оптимальную эффективность и стабильное значение точки росы в течение длительного времени. Нагревание под вакуумом гарантирует высокую степень активации адсорбента. Вакуумная регенерация также означает низкую температуру пара. Активное нагревание обеспечивает меньшие затраты энергии и преимущество меньшего охлаждения.

В случае вакуумной регенерации скорость десорбции можно определить по уравнению

$$q_{\text{дес}} = N_{\text{нов}} (K_1 - \theta_0 K_2) e^{-K_2 t},$$

$$\text{где } K_1 = \frac{\alpha \cdot p}{N_{\text{нов}} \sqrt{2 \pi m k T}};$$

$$K_2 = \frac{\alpha \cdot p}{N_{\text{пов}} \sqrt{2\pi m k T}} + \frac{1}{\tau_0 e^{E_{\text{ад}}/R_0 T}}.$$

Здесь: α - коэффициент прилипания можно принимать равным 1;

R_0 – газовая постоянная;

$N_{\text{пов}}$ – количество молекул адсорбированных на единице поверхности, для воды $N_{\text{пов}} = 0,53 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$;

m – молекулярная масса, для воды $m = 2,992 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$;

θ_0 – коэффициент заполнения поверхности.

$E_{\text{ад}}$ – энергия адсорбции, для воды в угле при температуре $T = 283 \text{ К}$ $E_{\text{ад}} = 42 \text{ кДж/моль}$, при $T = 400 \text{ К}$ $E_{\text{ад}} = 30 \text{ кДж/моль}$;

$\tau_0 = 10^{-13} \text{ с}$ – коэффициент;

p – давление, Па;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана.

После преобразования данного уравнения получаем формулу для расчета времени десорбции

$$t = \frac{1}{K_2} \ln \frac{N_{\text{пов}} (K_1 - \theta_0 K_2)}{q_{\text{дес}}}.$$

Таким образом, для расчета времени регенерации необходимо знать энергию взаимодействия между сорбатом и сорбентом, количество адсорбированного вещества и скорость десорбции, в качестве которой можно задаваться эффективной быстротой откачки. В качестве устройств откачки можно применять водокольцевые или двухроторные вакуумные насосы с быстротой откачки до $5 \text{ м}^3/\text{с}$. Насосы данного типа работают в диапазоне низкого вакуума, не требуют использования форвакуумного насоса, недороги, просты в эксплуатации.

Проведенные расчеты использования системы вакуумной регенерации для промышленного адсорбера-осушителя показали возможность повышения эффективности работы установки за счет снижения времени десорбции, отсутствия затрат на использование горячего сжатого воздуха или пара.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ТРИБОСТИМУЛИРОВАННОЙ АБСОРБЦИИ ВОДОРОДА В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

А.В. Русанов, Р.А. Невшупа
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская, 5
e-mail: nevshupa@mail.ru, ton@km.ru

Известно, что водород влияет на многие свойства стали, например, увеличение содержания водорода в стали уменьшает ее пластичность, уменьшает предел прочности, способствует появлению следующих дефектов в стали: трещины, водородные пузыри, расслаивание. Для уменьшения влияния водорода на свойства стали необходимо уменьшить его содержание в ней. Для этого нужно провести исследование источников стимулирования процесса диффузии водорода в сталь. Одним из таких источников является трение.

Поэтому, в работе разрабатывается модель трибостимулированной абсорбции водорода в сталь, описывающая переход адсорбированных молекул в абсорбированное состояние при механическом взаимодействии поверхностей. Также в работе производится проверка модели с использованием экспериментальных данных, полученных в МГТУ им. Н.Э. Баумана [1].

Для получения модели рассматривается процесс проникновения атомов водорода и дейтерия с поверхности образцов в глубину материала и их последующая диффузия под действием разности концентраций и температур, возникающих в процессе контактного взаимодействия при трении. Решение уравнения Фика II рода для наших начальных и граничных условий имеет вид [2]:

$$c = \frac{Q}{2\sqrt{\pi D_D t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4D_D t}\right). \quad (1)$$

Результаты экспериментов для различной наработки $N_1 = 2 \cdot 10^3$ об. и $N_2 = 24 \cdot 10^3$ об., а также для покоящегося подшипника представлены на рис. 1а-в. Проверка модели производилась путем аппроксимации уравнения (1) к экспериментальным данным методом наименьших квадратов, что позволило определить значения параметров Q (количества диффузанта) и D_D (коэффициента диффузанта). Значения Q и D_D , найденные в результате аппроксимации, составляют $Q = (3,6 \pm 0,1) \cdot 10^{17}$ ат·м⁻² и $D_D = (9,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-16}$ м². Удельное количество диффузанта определялось также независимым способом путем численного интегрирования экспериментальных данных, что дало значение $Q' = 0,5 \cdot 10^{17}$ ат·м⁻². Полученные значения Q и Q' достаточно близки между собой, особенно учитывая те допущения, которые были сделаны при разработке модели. Экспериментальные данные и результаты моделирования представлены на рис.1г.

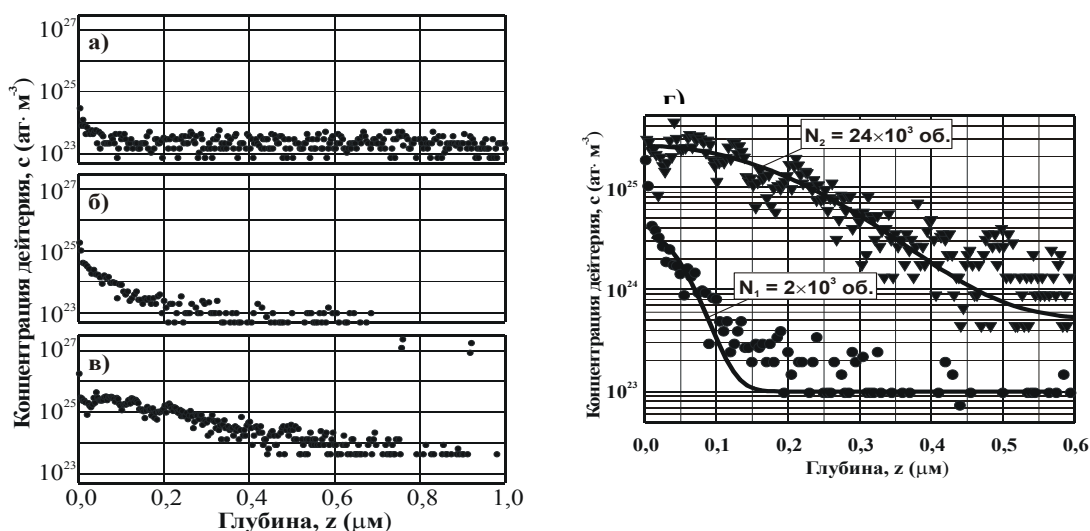


Рис. 1. Распределение концентрации по глубине для шарика шарикоподшипника а) базового образца; б) после $N_1 = 2 \cdot 10^3$ об.; в) после $N_2 = 24 \cdot 10^3$ об. г) экспериментальные данные и результаты моделирования.

В результате проделанной работы разработана модель трибостимулированной абсорбции газа, описывающая переход адсорбированных молекул в абсорбированное состояние при механическом взаимодействии поверхностей. Выведена формула, связывающая распределение концентрации газа в объеме, в зависимости от количества диффузанта и диффузионных характеристик материала и газа.

Проверка модели по имеющимся экспериментальным данным показала хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений для количества диффузанта. Значение Q , найденное из моделирования, составляет $Q = (3,6 \pm 0,1) \cdot 10^{17}$ ат·м⁻², что достаточно хорошо соответствует значению $Q' = 0,5 \cdot 10^{17}$ ат·м⁻², непосредственно найденному из экспериментальных данных. Однако, расхождение модельных и расчетных значений параметра $D_D t_D$ составило 8–10 порядков величины. Заниженное значение скорости диффузии, полученное в модели, связано, по-видимому, наличием в приповерхностном слое структурных дефектов, которые играют роль ловушек для диффундирующих атомов.

Полученные результаты могут рассматриваться как новые достижения в данной области и могут помочь уменьшить концентрацию водорода в конструкционных материалах, в частности, в стали, улучшая ее свойства.

Литература

1. Deulin E.A., R.A. Nevshupa. Appl. Surf. Sci. 144-145 (1999) 283-286.
2. Райченко А.И. Математическая теория диффузии в приложениях. Киев: Наукова думка, 1981, 396 с.
3. Nevshupa R.A., de Segovia J.L, Deulin E.A. Outgassing of stainless steel during sliding friction in ultra-high vacuum. Vacuum 53, 1999, с. 295-298.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

А.А. Войтеховский, В.А. Ветров, Б.Г. Львов
МИЭМ, Москва, Б. Трехсвятительский, 3/12
e-mail: bgl@miem.edu.ru

В современном мире значительный рост объемов научно-технической информации создает ситуацию, в которой разработчик вынужден все больше времени уделять ее поиску. При этом отдельные части искомого материала могут находиться в разных источниках, что усложняет проектирование.

Разработчикам вакуумных систем приходится иметь дело с большим количеством материалов, газов, элементов вакуумных систем, данные по которым не всегда доступны и систематизированы. Одним из решений этой проблемы является создание базы данных по ним и системы управления ею.

Созданная информационная вакуумная система (ИВС) содержит разнообразные характеристики объектов вакуумной техники и состоит из трех разделов, один из которых разбит на несколько подразделов:

- газы;
- материалы;
- элементы вакуумных систем:

низковакуумные насосы, высоковакуумные насосы, ловушки, вакуумная контрольно-регулирующая аппаратура, вакуумметры.

ИВС позволяет быстро найти информацию по самому широкому кругу параметров объектов вакуумной техники. Пользователю системы предоставляется возможность добавлять новые объекты, классы объектов и их характеристики, редактировать и удалять старые.

Для работы с системой нескольких человек предусмотрена возможность создания индивидуально настраиваемых баз данных. Исходная база данных остается неизменной и позволяет в случае потери данных в пользовательских базах восстановить их.

Удобный пользовательский интерфейс, снабженный системой подсказок, позволяет легко ориентироваться в базе данных. Возможность сортировки по различным характеристикам делает наглядными преимущества тех или иных объектов перед другими. Организация поиска минимизирует время получения разработчиком интересующей его информации.

Предусматривается вывод на печать выбранных отдельных фрагментов баз данных.

Созданная ИВС представляет из себя автоматизированное информационное обеспечение для решения задач выбора в области вакуумной техники и предназначена для разработчиков вакуумных систем как традиционных областей, так и смежных, таких как пищевая промышленность, медицина и др.

Помимо использования ИВС непосредственно в целях получения информации планируется ее применение в создаваемой системе моделирования работы вакуумных систем.

РАСЧЕТ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ ПРЯМОУГОЛЬНУЮ ЩЕЛЬ ПРИ ДОКРИТИЧЕСКИХ И КРИТИЧЕСКИХ ПЕРЕПАДАХ ДАВЛЕНИЙ

Н. М. Переведенцев, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, М.Д. Бронштейн
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Одним из наиболее распространенных случаев, встречающихся в вакуумной и компрессорной технике, является течение газа через плоскую прямоугольную щель, одна из сторон которой L во много раз больше другой δ . При молекулярном режиме течения проводимость такой щели легко определяется по формуле [1]

$$U = \frac{c}{4} L \frac{\delta^2}{l} \ln \frac{l}{\delta}, \quad (1)$$

где c – средняя тепловая скорость молекул газа, l – длина щели в направлении перетекания газа, L – глубина щели. В вязкостном режиме течения в справочной литературе [1] рекомендуется использовать уравнение, аналогичное уравнению Пуазейля для длинной трубы

$$U = \frac{\delta^3 \cdot L \cdot P_{CP}}{12 \cdot \eta \cdot l}, \quad (2)$$

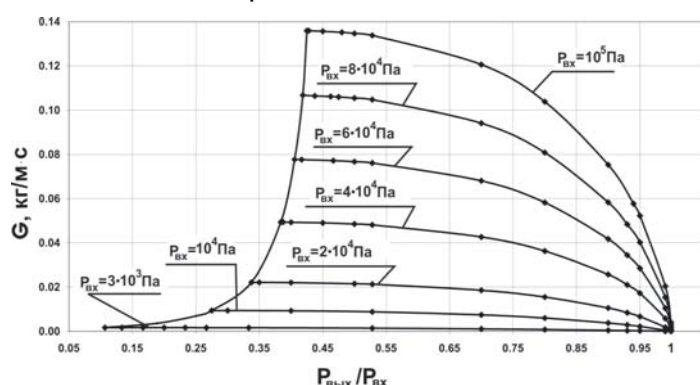


Рис.1 Зависимость удельного массового расхода от отношения давлений

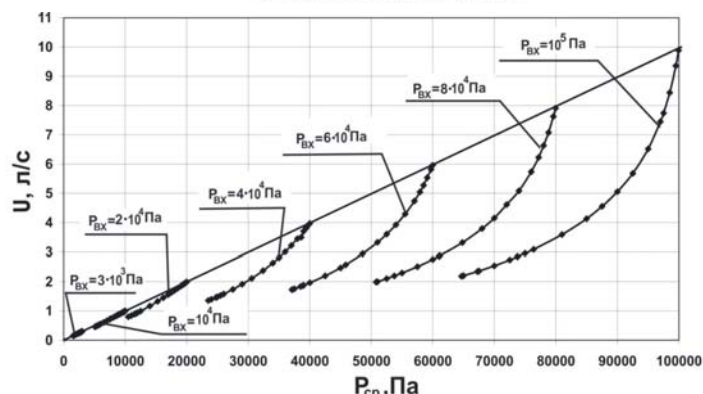


Рис.2 Зависимость проводимости плоской щели от среднего давления ($L = 130$ мм)

где $P_{CP} = (P_{BX} + P_{BЫX})/2$ – среднее давление; η – динамическая вязкость газа; P_{BX} и $P_{BЫX}$ – давления на входе и выходе из канала соответственно. Согласно (2) проводимость канала пропорционально среднему давлению и не зависит от перепада (отношения давлений

$\tau = P_{BЫX} / P_{BX}$) на его концах. Однако закон Пуазейля справедлив только при очень малых перепадах давлений ($\tau \rightarrow 1$), что реально далеко не всегда выполняется. Например, при откачке газа через узкие щели τ может сильно отличаться от

единицы, а в каналах бесконтактных насосов чаще всего τ вообще ниже критического значения. Поэтому в данной работе предпринята попытка получения зависимостей, позволяющих рассчитывать проводимость и массовый расход газа G при любых отношениях τ , включая критические. Для нахождения проводимости и массового расхода использовали численное решение дифференциальных уравнений, описывающих процесс течения газа в ламинарном режиме [2,3]. При этом в широком диапазоне варьировались значения l и δ . Давление на входе в щель изменялось от 10^5 до 3000 Па, отношение давлений от 0,999 до критического. Полученные в результате расчета зависимости удельного массового расхода G от отношения давлений τ для плоской щели с $l = 35$ мм и $\delta = 0,7$ мм представлены на рис.1. Здесь выделена граница достижения критического расхода в щели. Естественно, что при снижении P_{BX} граница критического расхода смещается в область меньших τ , а в ряде случаев (низкие P_{BX} и большие l) критический режим вообще не достигается.

На рис.2 показаны зависимости $U = f(P_{CP})$ для шести входных давлений при различных τ . Прямая линия соответствует уравнению (2). При низких входных давлениях и малых перепадах давлений хорошо работает уравнение (2). Однако уже при $P_{BX} > 10^4$ Па даже незначительное отклонение τ от единицы приводит к существенному снижению проводимости по сравнению с расчетом по (2). Например, для $P_{BX} = 10^5$ Па проводимость при $\tau = 0,294$ отличается от расчета по (2) в пять раз.

На основании обобщения зависимостей, полученных для различных l и δ , рекомендуется уравнение, учитывающее влияние отношения давлений на проводимость:

$$U = \frac{\delta^3 L P_{CP}}{6\eta l} \cdot \frac{1}{\left[1 + \sqrt{1 + \frac{\delta^3 8,71 \cdot 10^{-2} \delta}{6\eta^2 l^2 RT} (P_{BX}^2 - P_{ВЫХ}^2)} \cdot (0,07 + 0,06 \cdot \ln(P_{BX} / P_{ВЫХ}) - 0,01 \cdot \ln^2(P_{BX} / P_{ВЫХ})) \right]}$$

Погрешность этого уравнения не превышает 9% во всем исследованном диапазоне P_{BX} , τ , l , и δ .

Литература

1. Фролов Е.С., Минайчев В.Е., Александрова А.Т., и др. Вакуумная техника. Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. -360 с.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: ЭнергоАтомИздат, 1984.
3. Fluent Inc. Fluent 6.1 Users Guide, Lebanon, 2003.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ “ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА СПЛОШНЫХ И РАЗРЕЖЕННЫХ СРЕД”

А.В. Тютин, С.Н. Коледов, Д.И. Сагдеев
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

Компьютерные технологии проникли во все области человеческой деятельности. Высокий удельный вес использования компьютеров приходится на высшие учебные заведения. Развитие и совершенствование методов и средств современной информатики позволило ей уверенно войти в среду образования и научных исследований. Диапазон использования компьютеров в учебно-воспитательном процессе весьма велик - от тестирования студентов [1], учёта их личностных особенностей до специализированных моделирующих программ.

Перед нами была поставлена задача по созданию тестов к лабораторным работам по дисциплине “Газовая динамика сплошных и разреженных сред”. Для компьютерной реализации тестовых заданий был использован программный комплекс TestMaker, который позволяет создавать качественный тест с большим разнообразием форм вопросов и ответов. Эта система позволяет создавать различные виды вопросов: открытые, закрытые, вопросы на соответствие. Причем закрытые вопросы могут иметь как один, так и несколько правильных ответов, а это позволяет усложнить процесс опроса. При проведении тестирования с группой студентов можно изменять последовательность вопросов и работать в режиме обучения или контроля. Программный комплекс TestMaker позволяет в текст вопроса ввести буквенно-графические обозначения и представить иллюстрационный материал в виде схемы. Это разнообразит тест, делает его более динамичным и интересным для выполнения. Общий вид дизайнера вопросов представлен на рис.1.

Работа с программой показала, что более удобны вопросы на соответствие и закрытые вопросы. Открытые вопросы нельзя широко использовать ввиду существования нескольких возможных правильных формулировок ответов. В этом вопросе контролируется только набор слов, который у каждого студента может быть свой собственный и предвидеть все варианты при составлении теста не представляется возможным.

Вопросы на соответствие позволяют вносить в тест две разновидности вопросов: непосредственно на соответствие между двумя элементами ответа, и, что более интересно, определение правильной последовательности элементов ответа. Такая возможность составления вопроса и ответа особенно удобна при рассмотрении формул и выражений. Данный вид вопросов также дает возможность разнообразия: можно поставить в соответствие каждому элементу ответа не единственно правильный элемент, а несколько элементов.

При большом количестве вопросов теста (а только тогда можно объективно оценить знания студентов) такое разнообразие форм вопросов, а также ответов, позволяет удерживать внимание и сосредоточиться на каждом последующем вопросе, поскольку он отличается от предыдущего.

Рис.1. Общий вид дизайнера вопросов

Анализ данных, полученных по результатам компьютерного тестирования, позволяет преподавателю объективно оценить знания студентов и построить процесс обучения таким образом, чтобы достичь заданного уровня усвоения материала. Опрос тестируемых показал, что отвечать на вопросы такого теста интересно и он позволяет студенту проявить свою профессиональную подготовку.

Литература

1. Сагдеев Д.И., Фомина М.Г., Хубатхузин А.А., Лонцаков О.А., Бурмистров А.В., Поливанов М.А., Аляев В.А., Гумеров Ф.М. Организация компьютерного тестирования в Технологическом университете. Proc. IEEE International Conf. on Advanced Learning Technologies, 9-12 September, 2002, Kazan, Tatarstan, Russia, p.112-115.

РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ГЕТТЕРА

А.С. Барышников, С.Б. Нестеров

ФГУП «НИИВТ им. С.А. Векшинского», Москва, Нагорный проезд, 7

e-mail: baryshnikovas@mail.ru, nesterovsb@niivt.ru

Разработанные методы исследования сорбционно-десорбционных характеристик геттеров практически нельзя использовать для определения их газонасыщенности в работающих вакуумных установках.

Было предложено оценить газонасыщенность геттера с помощью токов в вакууме, возникающих за счёт процессов в порах геттера под воздействием внешнего напряжения. В этом способе исследуемый геттер является катодом, а подводимый к нему на некоторое расстояние электрод – анодом. При появлении вблизи поверхности поры электрического поля напряжённостью $\sim 5 \cdot 10^2$ В/см появляется ток через вакуумный промежуток (пороэлектронная и пороионная эмиссии). Эти эмиссии возникают вследствие резонансной десорбции газа при наличии на поверхности молекул воды, кислорода, азота и т. д.

В данной работе представлены результаты исследования титано-ванадиевого нераспыляемого геттера, изготовленного из порошкового материала.

Исследуемый геттер был помещён в вакуумный стеклянный прибор на расстоянии $d = 4$ мм от анода.

На рисунке 1 показаны линейные участки ВАХ после прогрева геттера до 240°C (кр. 1.), после выдержки при давлении $p = 78$ мм. рт. ст. (кр. 2.) и далее через день (кр. 3.) и последующие 2 (кр. 4.) и 3 (кр. 5.) дня от начала откачки.

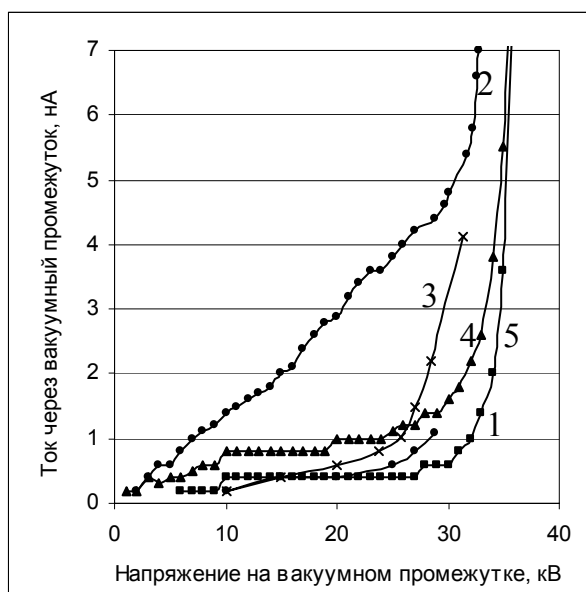


Рис. 1.

Из рисунка 1 хорошо виден ступенчатый характер изменения тока при одних и тех же напряжениях, что не наблюдалось для напылённых геттеров. Вероятно, это связано со спецификой микрогеометрии поверхности исследуемого геттера.

Наблюдалось восстановление эмиссионной способности геттера после длительного отбора тока, которое можно объяснить диффузией газа из объёма к поверхности.

В процессе исследования был разработан экспериментальный прибор (рис. 2.). Особенностью прибора является возможность прогрева электрода (катода). Прогрев позволяет очистить поверхность, т.е. удалить плёнку окисла, и снизить газонасыщенность до минимальной величины.

Данный прибор представляет собой прообраз датчика, задача которого – количественная оценка газонасыщенности геттера. Экспериментальный прибор выполнен из стекла. Исследуемый геттер помещён в шаровую колбу (поз.1). Он представляет собой пластину (поз.2), которая прогревается при подаче напряжения через держатели (поз.3). Напротив геттера на расстоянии примерно 1 мм размещён анод (поз.4). Экспериментальный прибор сначала напаяется на вакуумную установку. После получения высокого вакуума и прогрева геттера до отсутствия окисных плёнок, возможно, прибор будет отпаян, и дальнейшая откачка будет производиться электроразрядным насосом (поз.5). Для измерения высокого и низкого вакуума используются датчик ПМТ-6 (поз.6) и ионизационные манометры (поз.7,8). Для охлаждения геттера жидким азотом используется сосуд Дьюара (поз.9). По мере насыщения геттера измеряются токи в вакуумном промежутке при постоянном напряжении.

При калибровке датчика для каждого уровня газонасыщенности определяется количество поглощённого геттером газа. Для этого проводится импульсный нагрев геттера, и количество выделенного газа фиксируется датчиками (поз.6,7,8) и вакуумметрами ВМБ – 8 и 13 ВТЗ – 003.

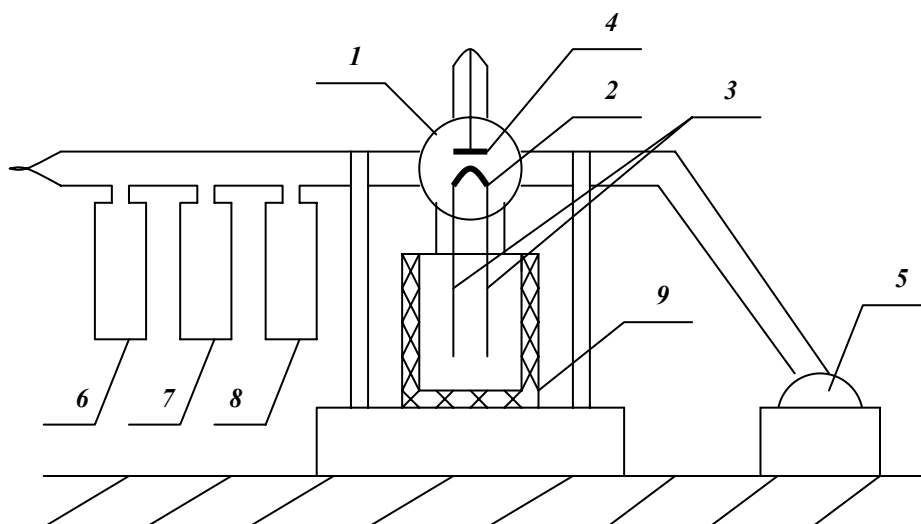


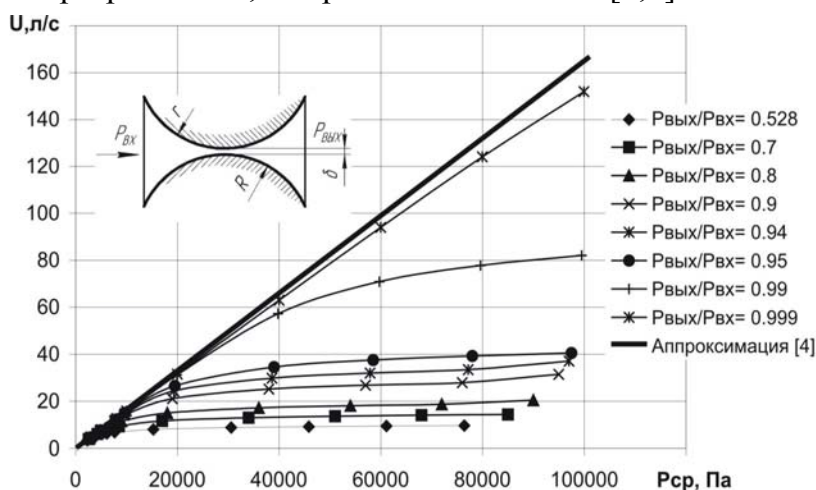
Рис.2.

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЧЕРЕЗ ЩЕЛЕВЫЕ КАНАЛЫ, ОБРАЗОВАННЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СТЕНКАМИ, В ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ

А.В. Пальцев, Р.М. Даутов, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Проводимость щелевых каналов в ламинарном режиме течения газа является сложной функцией большого количества факторов: геометрии канала, его размеров, величины давлений на входе $P_{вх}$ и выходе $P_{вых}$, рода откачиваемого газа и его температуры. Причем перечисленные факторы могут изменяться в очень широком диапазоне.

Значительный интерес представляют каналы, образованные различными сочетаниями выпуклых и вогнутых цилиндрических поверхностей, поскольку большинство профильных щелей бесконтактных вакуумных насосов могут быть приведены к одному из типов таких каналов. В работе [1] предложены уравнения, позволяющие с достаточной точностью рассчитать проводимость U при варьировании радиусов цилиндров, образующих канал, r , R , зазора δ и среднего давления $P_{ср} = (P_{вх} + P_{вых})/2$. Однако эти уравнения получены для малых перепадов давлений на концах каналов ($\tau = P_{вых}/P_{вх} \rightarrow 1$). В бесконтактных насосах такой режим может наблюдаться только в короткий пусковой период, а при работе τ практически всегда существенно меньше, и может достигать критического значения. Поэтому в данной работе рассчитаны зависимости проводимости и массового расхода G при варьировании вышеперечисленных факторов. Для этого численным методом (метод контрольных объемов) решалась система дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнения движения, неразрывности, энергии и состояния [2,3]. Отношение давлений на концах



изменялось от 0,999 до критического τ , при котором массовый расход в канале становится постоянным.

На рис.1,2 представлены расчетные зависимости $U = f(P_{ср})$ для двух типов каналов при различных отношениях давлений на концах канала. Там же нанесена аппроксимация

экспериментальных данных работы [4].

Линейная расчетная зависимость проводимости от P_{cp} наблюдается только при низких давлениях $P_{cp} < 20000$ Па и малых перепадах ($\tau \rightarrow 1$). Увеличение перепада давлений на концах канала (уменьшение τ) приводит к резкому снижению проводимости. Особенно сильно это проявляется при высоких P_{cp} .

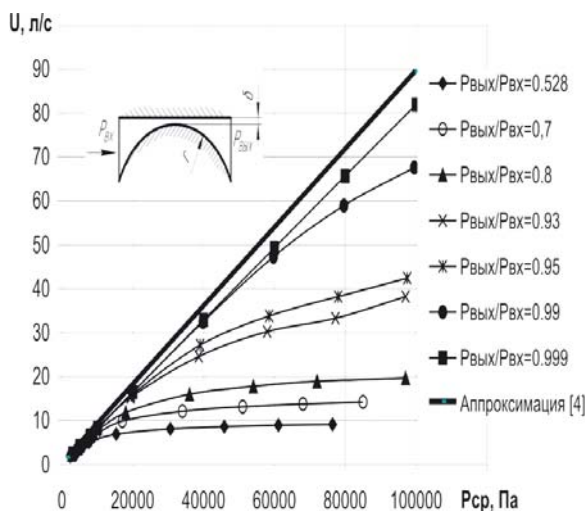


Рис.2 Зависимость проводимости от среднего давления
($R=60$ мм, $\delta=0,2$ мм, $L=130$ мм)

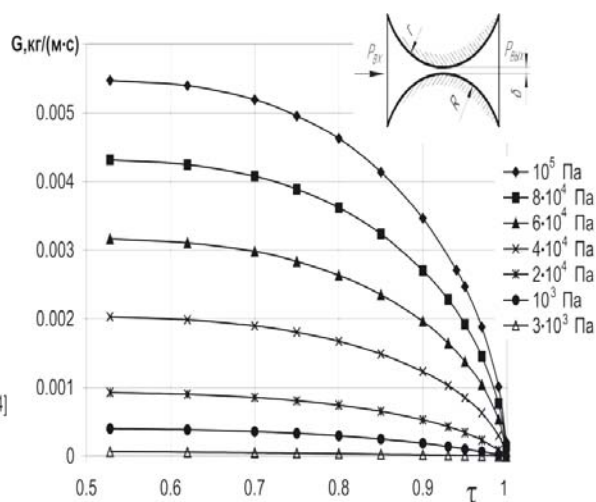


Рис.3 Зависимость удельного массового расхода от τ
($R=60$ мм, $r=22,5$ мм, $\delta=0,2$ мм, $L=130$ мм)

На рис.3 показаны зависимости удельного массового расхода газа через щель от отношения давлений. При снижении отношения давлений массовый расход через щель стремится к критическому значению, достигаемому при «запирании» зазора. Аппроксимация представленных значений позволит получить уравнения для расчетного определения проводимости и массового расхода при любых $P_{вх}$ и τ .

Литература

1. С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, К.Б. Панфилович, М.Д. Бронштейн. Исследование проводимости щелевых каналов бесконтактных вакуумных насосов в вязкостном режиме течения газа// Компрессорная техника и пневматика, №2, 2005.
2. С. Патанкар. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: ЭнергоАтомИздат, 1984.
3. Fluent Inc. Fluent 6.1 Users Guide, Lebanon, 2003.
4. С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, К.Б. Панфилович. Проводимость щелевых каналов, образованных цилиндрическими поверхностями, в вязкостном режиме// Материалы XI науч-техн. конфер. «Вакуумная наука и техника». М.: МИЭМ. 2004 – С.57-62.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Н.А. Новикова, А.Р. Мутыгуллина, Т.Г.Булатова
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68.
e-mail: vacuum@kstu.ru

Целью работы было исследование и получение оптимальных значений угловых коэффициентов, на основе выражений, полученных аналитическим методом и методом оптимизации на основе MathCADa.

Были рассмотрены два случая. Первый вариант – кольцевой элемент на внутренней поверхности цилиндра и торец цилиндра рис.1. и второй вариант представляет элемент плоскости и перпендикулярный ему диск, рис.2.

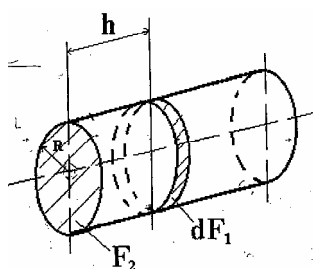


Рис. 1

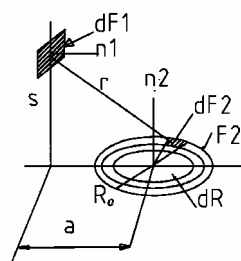


Рис. 2

Метод оптимизации интересен тем, что, меняя геометрические размеры, можно наглядно наблюдать изучаемые параметры. Описываемая и полученная функция для угловых коэффициентов задавалась как целевая функция $f(x)=f(x_1, x_2...x_n)$, для которой проводился поиск экстремума на множестве $x \in R^n$. Точки x^* - оптимального значения, находилась как точка глобального максимума функции f , если $f(x^*) \geq f(x)$ для всех $x \in X$.

Для первого случая, исходным выражением было следующее:

$$d\varphi_{dF1-dF2} = \frac{1}{2R} \left[\frac{h^2 + 2R^2}{\sqrt{h^2 + 4R^2}} - h \right]. \quad (1)$$

Меняя h и R методом оптимизации были получены следующие результаты значения угловых коэффициентов (M_i) рис. 3.

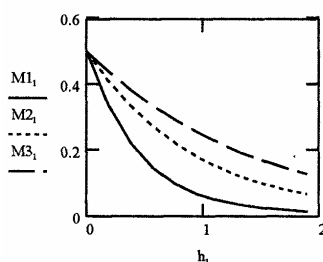


Рис. 3

Для второй конструкции аналитически решение было выполнено с помощью MathCADa:

$$\varphi_{dF_1-F_2} = \frac{s}{2a} \left[\frac{s^2 + a^2 + R_0^2}{\sqrt{(s^2 + a^2 + R_0^2)^2 - 4a^2 R_0^2}} - 1 \right] \quad (2)$$

и методом оптимизации получены результаты графически представленные на рис. 4.

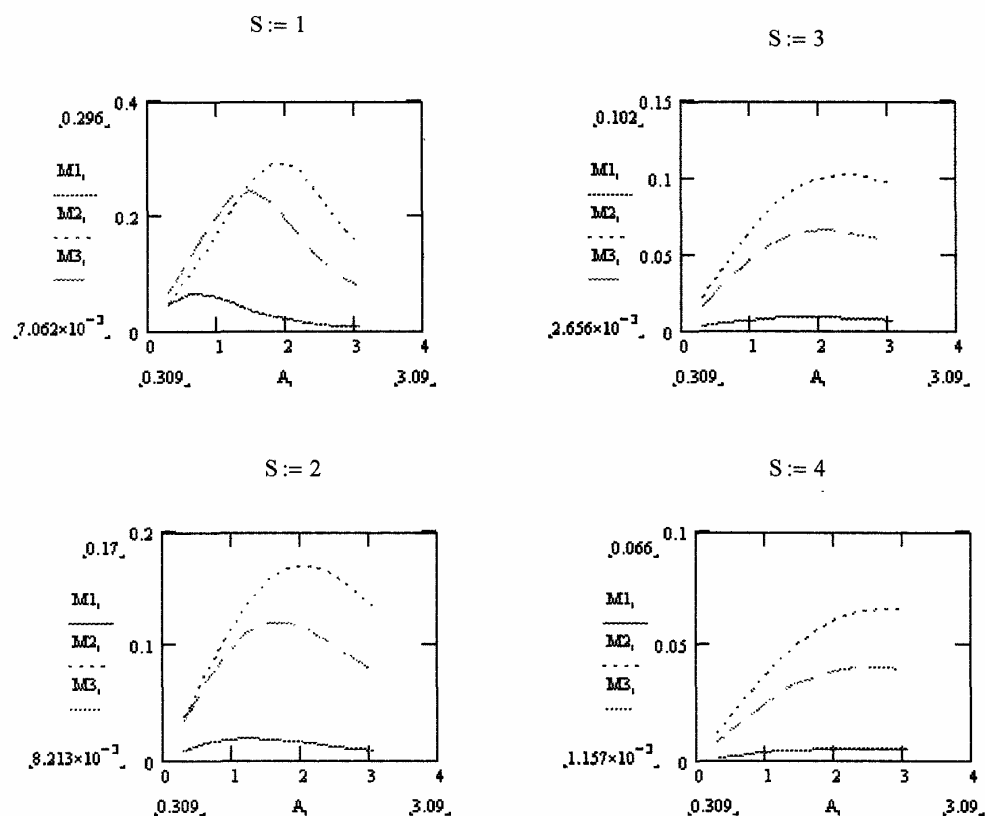


Рис. 4

R_0 было зафиксировано $R_0 = 0,5$, а - менялось в диапазоне от 0 до 4, и S принимало 4 значения. Вектор численных параметров для оптимального варианта был получен в виде матрицы значений.

Метод оптимизации интересен для учебного процесса тем, что позволяет наглядно изучать различные конструкции и получать для них оптимальные значения, которые можно рекомендовать для реальных вариантов оборудования.

Секция 2

**Средства получения
и измерения вакуума**

КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Е.А. Ивченко, Е.А. Деулин
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская, 5
e-mail: jenius9@yandex.ru

Создана улучшенная система диагностики турбомолекулярных насосов (ТМН). Показано, что наличие незначительной осевой нагрузки (вес ротора на шарикоподшипник) приводит к зажатию шариков между кольцами, их «разбеганию» во время работы и интенсивному износу сепаратора, что в свою очередь вызывает увеличение вибрации и аварийный отказ ТМН. Для оценки уровня износа сепаратора был использован вибрационный метод [1], оценивающий изменения амплитуды колебаний на частоте контактирования «шарик-сепаратор». В модернизированной системе предлагается измерять мощность этого взаимодействия. Показано, что периодичность взаимодействия (шарик-сепаратор) носит случайный характер, а величина момента сопротивления подчиняется экспоненциальному закону распределения [2]. Момент сопротивления определяет ту долю мощности электродвигателя, которая тратится на преодоление сопротивления шарикоподшипника.

Определено значение этой мощности. Так для насоса типа ТМН 1500 004 расчетная максимальная мощность взаимодействия «шарик-сепаратор» для двух шарикоподшипников составляет 0,47кВт; при номинальной мощности $N_{\text{ном}}$ сопротивление этих шарикоподшипников 0,05кВт. Показано, что колебание момента сопротивления находится в пределах от $M_{\text{ном}} = 0,023$ до $M_{\text{макс}} = M_{\text{ном}} + M_{\text{ш.п.}} = 0,19$, что вызывает колебание частоты вращения ротора ТМН в диапазоне $n = 2.23 \times 10^4 - 2.1 \times 10^4$ об/мин.

Показано, что вместо оптического способа контролирования вращения ротора может быть использована характеристика электродвигателя «нагрузка – частота вращения», упраздняющая оптический датчик и удешевляющая систему диагностики.

Литература

1. Е.А. Деулин, А.Б. Николаев, Т. Sawada. Система ранней диагностики ТМН. Труды 5-й Российской конференции «Вакуумные науки и технологии», Гурзув 1998г, стр. 85-88.
2. Е.А. Деулин, А.Г. Пересадыко. Тесты. Диагностика.- 5 1998.-стр. 21-28.

РАСЧЕТ ОТКАЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТМН С ДВУМЯ ВСАСЫВАЮЩИМИ ПАТРУБКАМИ

Е.А. Горячева, Н.К. Никулин
МГТУ им. Н.Э.Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5
e-mail: nkn@bmstu.ru

Цель работы – расчет откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса, имеющего два всасывающих патрубка. Один имеет традиционное исполнение, второй расположен в середине проточной части насоса.

Для этого исследовалась откачная характеристика всего насоса и части насоса, которая обеспечивает работу второго всасывающего патрубка.

Откачная характеристика турбомолекулярного вакуумного насоса определяется предельным остаточным давлением, рабочей быстротой действия и форвакуумным давлением.

Предельное остаточное давление, создаваемое насосом при молекулярном режиме течения газа на стороне нагнетания, зависит от числа ступеней, потоков газовыделения с внутренней поверхности корпуса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания, быстроты действия, а также степени герметичности рабочей полости насоса.

Откачные характеристики получены методами, разработанными на кафедре Э5 «Вакуумная и компрессорная техника физических установок». Методика заключается в следующем:

1. Выполняют газодинамический и прочностной расчеты рабочих колес и определяют их объемные характеристики и размеры.
2. Определяют суммарный поток газовыделения с внутренней поверхности корпуса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания насоса, а также между рабочими колесами.
3. Определяют предельное остаточное давление.
4. Выбирают форвакуумный насос, обеспечивающий за последним колесом ТМН молекулярный режим течения газа.
5. Определяют число рабочих колес (роторных и статорных), последовательно подсчитывая отношение давлений, создаваемое каждым колесом, начиная с первого, до достижения форвакуумного давления, а также определяют общее отношение давлений для насоса. При этом считают, что быстрота откачки первого рабочего колеса, а, следовательно, быстрота действия всего насоса $S_n=0$, что соответствует минимальному потоку газа. Таким образом, быстрота откачки первого колеса складывается из потока газовыделения на всасывании и потока газа, перетекающего через радиальный зазор.
6. Задаваясь значениями потока газа в пределах от $Q_{min\phi}$ до $Q_{max\phi}=S_{max}P\phi$, определяют расчетные точки откачной характеристики насоса во всем диапазоне давлений всасывания.

Определение откачной характеристики насоса основано на согласованности последовательно работающих роторных и статорных колес, характеризуемой уравнением потока $Q=Sp=\text{const}$.

Расчет откачной характеристики второй ступени может быть проведен на основе уравнения сохранения количества откачиваемого газа.

Поток газа, создаваемый второй ступенью, оказывает влияние на характеристику первой ступени. В то время как взаимное влияние ступеней приводит к изменению давления всасывания при входе в насос и в промежуточную ступень.

В ходе исследования откачных характеристик насоса были приняты следующие допущения:

1. молекулярный режим течения;
2. газовыделения отсутствуют;
3. натекания не учитываются.

Для расчетов приняты следующие параметры:

1. число рабочих колес насоса – 33;
 2. максимальная быстрота откачки $S_{\text{max}}=500$ л/с;
 3. максимальное отношение давлений при быстроте откачки, равной нулю, и с учетом перетекания через радиальный зазор: $t_{\text{max}}=2,6$;
- форвакуумное давление $P_{\text{ф}}=0,1$ Па.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ШУМА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РАБОТЕ ДВУХРОТОРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

И.Х. Хуснутдинов, А.В. Бурмистров, М.Д. Бронштейн
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Одним из существенных недостатков механических вакуумных насосов является шум, создаваемый движущимися частями при работе. Поскольку шум отрицательно воздействует на рабочий персонал, то ведущие производители стремятся выпускать насосы и агрегаты минимальным уровнем шума. Кроме того, уровень шума может служить косвенным показателем износа рабочих органов насоса.

В предложенном докладе рассматривается один из способов понижения шума и температуры в двухроторных вакуумных насосах (ДВН) типа Рутс (рис.1).

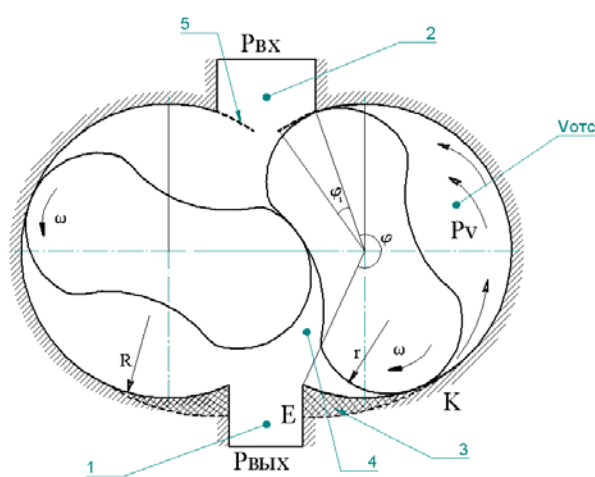


Рис.1 Двухроторный вакуумный насос типа Рутс

Источником шума и нагрева в ДВН являются, во-первых, вращающиеся косозубые шестерни, синхронизирующие ротора. Во-вторых, динамический удар, возникающий при соединении отсеченного объема с давлением P_v , и выходного патрубка с давлением $P_{вых}$. Как известно, ДВН типа Рутс является машиной с внешним сжатием. Поэтому ротор захватывает на входе объем газа с давлением $P_{вх} \approx P_v$ и переносит его на выход с давлением $P_{вых}$. При этом давление $P_{вых}$ существенно превышает P_v . При открытии отсеченного объема на выходе газ за счет разности давлений $P_{вых} - P_v$ очень резко и с большой скоростью заполняет отсеченный объем. Струя газа ударяется о ротор в направлении, противоположном его вращению, и возникает динамический удар, приводящий к увеличению уровня шума, изнашиванию шестерен и подшипников, повышению температуры роторов и откачиваемого газа.

Для снижения пульсации газа на выходе можно использовать следующий способ: как только объем $V_{отс}$ отсоединится от входного патрубка 2, следует уравнивать давления $P_{вых}$ и P_v до того момента, пока отсеченный объем не соединился с выходным патрубком 1. С этой целью необходимо, во-первых, увеличить зазор между ротором и корпусом на участке EK и тогда газ будет заполнять объем $V_{отс}$ более плавно. Во-вторых, целесообразно увеличить время τ , в течение которого объем $V_{отс}$ отсоединен и от выходного, и от входного патрубков. За это время давления $P_{вых}$ и P_v должны успеть уравниваться. Отметим, что τ зависит от частоты вращения роторов и угла ϕ , между кромками входного и выходного патрубков. Увеличить угол ϕ можно за счет увеличения «полноты» ротора, что привело бы к снижению величины отсеченного объема. Уменьшение выходного патрубка нецелесообразно, так как это вызвало бы дополнительное поджатие газа в объеме 4 и увеличение его пульсаций и нагрева. Поэтому угол ϕ можно увеличить, продлив стенку корпуса на входе на угол ϕ_1 (рис.1). Диаметр входного патрубка не изменяется, за счет чего сопротивление входного тракта увеличивается незначительно.

Проведен расчет величины необходимого зазора на участке EK и потерь быстроты откачки на входе для насоса типа ДВН-50 при $S_v = 50 \text{ л/с}$ и $n = 3000 \text{ об/мин}$. Угол ϕ_1 выбирался с тем условием, чтобы потери на входе за счет продления стенок корпуса не превышали 10%. Величина дополнительного сопротивления на входе определялась по формуле для диафрагмы при докритическом течении газа в ламинарном режиме [1].

$$U_{диф} = F \frac{\tau^{1/k}}{1-\tau} \sqrt{\left(1 - \tau^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{2k}{k-1} \frac{RT}{M}},$$

где $\tau = \frac{P_{вх}}{P_v}$, F - площадь диафрагмы, k - показатель адиабаты, R - газовая постоянная, M - молекулярная масса газа, T - температура газа.

Предварительные расчеты показали, что величина зазора на участке EK в зависимости от уровня давления может быть порядка 2 мм, чтобы давления $P_{вых}$ и P_v могли уравниваться. Предлагаемая доработка насоса позволит снизить уровень шума и расширит диапазон рабочих давлений ДВН.

Литература

1. Фролов Е.С., Минайчев В.Е., Александрова А.Т., и др. Вакуумная техника. Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. -360 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕРАСПЫЛЯЕМЫХ ГЕТТЕРОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА С ВОДОРОДОМ, АЗОТОМ И АММИАКОМ

А.А. Комкова, В.С. Петров
МГИЭМ, Москва, Б. Трехсвятительский, 3/12
e-mail: vspetrov@miem.edu.ru

В настоящее время в РНЦ «Курчатовский институт» в производстве геттерных насосов успешно применяется пористый геттер из сплава титан-ванадий. По вакуумным характеристикам данный сплав оказался эффективнее традиционно применяемого титанового геттера. Но в то же время причина улучшения характеристик была не ясна. Чтобы определить эту причину была проведена работа по определению кинетических констант взаимодействия пористого титана и сплава титан-ванадий в одинаковых условиях в атмосфере одинаковых газов: водорода, азота, аммиака. Выбор газов обусловлен преимущественно водородной задачей, а азот и аммиак выбраны, как удобные модельные газы.

В качестве основного метода исследований был принят термогравиметрический анализ, в котором происходит измерение изменения веса образца (чувствительность 10^{-7} г). Одновременно с этим регистрировалось давление газа и масс-спектр реакционной атмосферы. Температурный режим измерений задавался процессорным терморегулятором.

Для исследований применялись два образца. Образец №1 – пористый геттер из титана в форме двух прямоугольных пластинок с размерами $3,05 \times 1,53 \times 0,08$ см, исходный вес $m_{исх} = 2,45365 \pm 1 \cdot 10^{-5}$ г. Образец №2 – пористый геттер из сплава титана (70 мас.%) и ванадия (30 мас.%) в форме двух прямоугольных пластинок с размерами $1,53 \times 3,04 \times 0,08$ см и $1,53 \times 3,02 \times 0,08$ см, исходный вес $m_{исх} = 1,85676 \pm 1 \cdot 10^{-5}$ г.

Перед началом каждого измерения проводилось активирование образца. В процессе измерения давление газа поддерживалось постоянным. Напуск газа в реакционную камеру проводился в режиме динамической откачки. Давление остаточных газов перед началом процесса составляло $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Давление водорода, азота, аммиака при проведении эксперимента составляло $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Водород и азот напускали из баллона, аммиак напускали из 20-ти процентного водного раствора через осушитель (NaOH).

Режим сорбции представлял собой нагрев образца до температуры 200°C со скоростью $10^\circ/\text{мин}$ и дальнейшую изотермическую выдержку при 200°C в течение 1 часа в газовой атмосфере.

Результатами проведённых измерений являются температурные и временные зависимости изменения веса двух образцов при сорбции водорода, азота и аммиака.

По данным измерений были рассчитаны кинетические константы процессов взаимодействия титана и титан-ванадиевого сплава с водородом, азотом, аммиаком: константы скорости процессов; удельная сорбционная ёмкость, рассчитанная как отношение максимально достижимого веса поглощённого газа к исходному весу образца, без учёта неизотермического участка; фрактальная размерность.

Таблица
Основные кинетические параметры взаимодействия Ti с газами.

Кинетические параметры	Ti			Ti-V		
	H ₂	N ₂	NH ₃	H ₂	N ₂	NH ₃
$a_{уд} \cdot 10^4$, г/г	1,84	1,57	2,03	4,74	2,31	1,96
$k \cdot 10^4$, с ⁻¹	1,71	1,65	1,21	1,13	0,91	1,84
d	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Из сравнения полученных констант взаимодействия для двух образцов видно, что: 1) наибольшей сорбционной ёмкостью по водороду и азоту обладает сплав титан-ванадий, по аммиаку – преимущества одного из образцов не выявлено; 2) наибольшей константой скорости реакции при взаимодействии с водородом и азотом обладает образец из титана, а при взаимодействии с аммиаком – образец из сплава титан-ванадий.

Из результатов измерений были рассчитаны температурная и временная зависимости коэффициента прилипания для всех измерений.

Также при сорбции аммиака титаном в изотермическом режиме одновременно с измерением изменения веса образца была измерена временная зависимость масс-спектра атмосферы, из которой рассчитали плотности парциальных потоков компонентов газовой фазы.

В результате проведённого исследования были определены:

1. Кинетические параметры взаимодействия пористых титана и титан-ванадиевого сплава с водородом, азотом, аммиаком, значения которых указывают на определяющее влияние пористости образца на геттерные характеристики.

2. Температурная и временная зависимости коэффициента прилипания для двух образцов при сорбции водорода, азота, аммиака.

3. При сравнении данных, полученных с помощью масс-спектрометрического и термогравиметрического анализов, определено, что при сорбции аммиака титаном идёт преимущественное образование нитридной фазы (преимущественное поглощение азота).

ЭКСПРЕСС - РАСЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ БЕСКОНТАКТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Л.З. Шарафиев, А.В. Бурмистров, М.Д. Бронштейн
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Наибольшее распространение в качестве безмасляных средств откачки получили различные виды бесконтактных насосов. Основная тенденция в совершенствовании бесконтактных машин - снижение обратных перетеканий с целью повышения удельных откачных характеристик. Параметром, характеризующим величину обратных перетеканий, является проводимость, которая для молекулярного режима течения определяется

$$U = \frac{C}{4} \delta \cdot L \cdot K_3 \quad (1)$$

где C – средняя тепловая скорость молекул газа; L – глубина канала; δ – межроторный зазор; K_3 – коэффициент проводимости. Наибольшую сложность расчет K_3 представляет для межроторных каналов, поскольку геометрия канала меняется в зависимости от профиля и угла поворота роторов. Здесь можно использовать метод Монте-Карло (ММК). В частности, в работе [1] ММК применен для расчета проводимости межроторного и радиального каналов двухроторных вакуумных насосов (ДВН).

В ряде случаев при зазорах в сотые и десятые доли миллиметра применение ММК занимает неоправданно много машинного времени. В то же время достаточно часто требуется быстрая оценка изменения K_3 в зависимости от геометрических параметров профиля. Практически все каналы бесконтактных вакуумных насосов – это щелевые каналы переменного в направлении перетекания сечения. Для них проводимость с достаточной точностью определяется участком в окрестности минимального зазора δ . Если участок, дающий основное сопротивление потоку, имеет

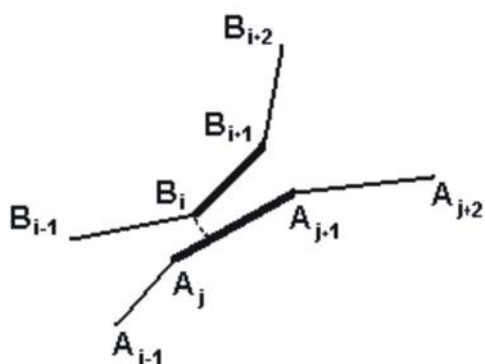


Рис.1 Ближайшее расстояние между роторами.

небольшую протяженность, то профиль на этом участке хорошо аппроксимируется дугой окружности и тогда проводимость канала можно вычислять по формуле, полученной в работе [2]

$$K_3(\delta, r, R) = \left(\frac{\delta}{r} \pm \frac{\delta}{R} \right)^{0.38} \quad (2)$$

где R, r – радиусы кривизны профилей в точке минимального зазора. Знак “+” выбирается, если стенки обращены выпуклостями навстречу друг другу, “-” – в противном случае. В данной работе

предлагается метод экспресс – расчета значений K_3 для роторов с произвольными профилями. Стенки канала задаются в виде массива точек, и профили рассматриваются как ломаные. Разработан специальный алгоритм, позволяющий найти звено на каждой ломаной, наиболее близкое ко второй ломаной (рис.1) и вычислить минимальное расстояние между ближайшими звеньями. Затем для ближайшего ко второй ломаной звена $A_j A_{j+1}$ на первой ломаной находится среднее арифметическое значение радиусов кривизны участков $A_{j-1} A_j A_{j+1}$ и $A_j A_{j+1} A_{j+2}$. Аналогично находится кривизна на второй ломаной. Для определения кривизны ломаной на участке с вершинами в произвольных точках $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)$ была выведена следующая

$$\text{формула } r_{p_1 p_2 p_3} = \frac{\sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)((x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2)((x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2)}}{2(x_3(y_1 - y_2) + x_2(y_3 - y_1) + x_1(y_2 - y_3))}$$

Таблица
Коэффициенты проводимости межроторного
канала ДВН с эллиптическим профилем.

δ/a	r/a	b/a	$K_{зрр}$, расчет ММК [1]	$K_{зрр}$, наш расчет	Погрешность, %
0.001333	0.8	0.72	0.1018	0.1021	0.29%
	0.8	0.77	0.1092	0.1096	0.37%
	0.8	0.83	0.1197	0.1223	2.17%
	0.64	0.72	0.0926	0.0958	3.46%
	0.64	0.77	0.0904	0.0938	3.76%
	0.64	0.83	0.0900	0.0932	3.56%
0.002667	0.8	0.72	0.1311	0.1327	1.22%
	0.8	0.77	0.1381	0.1423	3.04%
	0.8	0.83	0.1520	0.1586	4.34%
	0.64	0.72	0.1202	0.1222	1.66%
	0.64	0.77	0.1182	0.1259	6.51%
	0.64	0.83	0.1160	0.1212	4.48%
0.008	0.8	0.72	0.1911	0.2018	5.60%
	0.8	0.77	0.2001	0.2164	8.15%
	0.8	0.83	0.2137	0.2413	12.92%
	0.64	0.72	0.1818	0.1901	4.57%
	0.64	0.77	0.1765	0.1859	5.33%
	0.64	0.83	0.1733	0.1844	6.41%

a – радиус начальной окружности
 b – расстояние от центра ротора до центра головки
 r – радиус головки ротора

Эта формула позволяет учесть направления выпуклости профиля по знаку $r_{p_1 p_2 p_3}$. Рассчитаны средние по всем углам поворота значения K_3 для роторов с эллиптическим профилем при изменении его геометрических параметров. Результаты представлены в таблице. Сопоставление наших данных с расчетом ММК [1] показывает, что экспресс – метод в основном дает возможность вычислять K_3 с погрешность менее 5%, позволяет сократить время расчета откачных параметров в сотни раз и сделать более доступным поиск оптимальной геометрии ротора.

Литература

1. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс // Компресс. техн. и пневматика, 2004, № 6, С. 38-40.
2. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Уравнения для расчета проводимости различных видов щелевых каналов в молекулярном режиме течения // Вакуумная техника и технология, Т 14, № 1, 2004, С. 9-13.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ СРЕДЫ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ РАБОТЕ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

А.Н. Залесов, Ю.В. Панфилов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская, 5

e-mail: panfilov@mx.bmstu.ru

Требования к составу и свойствам современных тонкопленочных покрытий таковы, что нанести их при помощи одного технологического источника не представляется возможным. Комбинация двух различных ростовых процессов в одной установке приводит к новым технологическим возможностям выращивания тонких пленок. Широкое применение находят пленки, полученные при последовательной или одновременной работе технологических источников. В первом случае речь идет о нанесении многослойных покрытий. При одновременной работе нескольких источников получают многокомпонентные пленки. Кроме того, при такой работе источников реализуются различные методы ассистирования при нанесении пленок и стимулирования растущей пленки.

Для реализации задачи одновременного использования нескольких технологических источников была модернизирована установка, оборудованная магнетронной распылительной системой (МРС), автономным источником ионов (АИИ) и дуговым испарителем. Конструктивное расположение источников внутри камеры и конструкция подложкодержателя позволяет одновременно наносить покрытие посредством магнетронной распылительной системы или дугового источника, а также обрабатывать поверхность подложки ионным пучком посредством автономного источника ионов. Также с помощью такого расположения может быть реализовано нанесение многокомпонентных пленок – одновременное нанесение пленки посредством двух разных источников: МРС и АИИ. При этом подложка устанавливается под углом к каждому из технологических источников.

В настоящее время известно небольшое количество результатов экспериментов по нанесению многокомпонентных тонкопленочных покрытий при одновременной работе этих источников из-за сложности подбора режимов. Нами был проведен эксперимент по подбору режимов нанесения многокомпонентной пленки Ti - α -C:H.

Для выбора режимов было проведено теоретическое обоснование и расчет параметров одновременной работы двух источников в вакууме. Для согласования режимов работы МРС и АИИ важнейшим параметром является рабочее давление. Рабочее давление магнетронной системы определяется условиями поддержания разряда и, как правило, находится в пределах $1 \cdot 10^{-1} - 3$ Па. Физические пределы работы определяются условиями возникновения разряда в вакууме. При высоком давлении и неизменной магнитной индукции вольтамперная характеристика (ВАХ) МРС сдвигается в область больших токов при небольшом напряжении. При низком давлении ВАХ, наоборот,

сдвигается в область небольших токов при значительных напряжениях, и приближаются к линейной зависимости.

Давление влияет не только на сам процесс зажигания разряда, но и определяет величину свободного пробега молекул. Пленка будет формироваться на подложке с наибольшей вероятностью при условии $l \leq L$ (1), где l – расстояние катод-подложка, L – длина свободного пробега атомов и молекул, покидающих катод в результате его физического распыления ионами, ускоренными в катодном падении потенциала при данном давлении. Длина свободного пробега в зависимости от давления определяется соотношением [1]:

$$L = \frac{4kT}{\pi p (\sigma_1 + \sigma_2)^2 \sqrt{1 + \frac{M_1}{M_2}}}, \text{ где } k - \text{постоянная Больцмана,}$$

T – температура, p – давление газа, σ_1 и σ_2 – радиусы атомов, покидающих катод, и газа, соответственно, M_1 и M_2 – массы атомов катода и газа, соответственно.

Из расчета длин свободного пробега для МРС видно, что указанное неравенство (1) выполняется при малом расстоянии между катодом и подложкой. Однако в таких условиях возникают проблемы с неконтролируемым влиянием плазмы разряда на формируемую пленку.

Требования, предъявляемые ионным источником к вакуумной системе, вытекают из физической особенности системы ионный источник – обрабатываемый объект. Чтобы избежать рассеяния и перезарядки пучка ионов в технологической камере, давление в ней не должно превышать 10^{-1} Па.

Рассчитаем длину свободного пробега ионов углерода, поступающих в камеру из ионного источника при его совместной работе с магнетронной системой. Т.к. при совместной работе МРС и АИИ в камеру напускается аргон, будем считать, что ионы углерода испытывают столкновения только с атомами аргона. Для расчета удобно рассматривать движение атома диаметром $d_c = 4,3d_m$, где d_m – диаметр атома углерода (считаем, что атом аргона в 3,3 раза больше атома углерода в диаметре [1]). В результате получим, что длина свободного пробега L определяется следующими зависимостями:

$$L = \frac{1}{4,6\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_m^2 \cdot n_{Ar}}, \text{ где } n_{Ar} = \frac{p}{kT}.$$

Сравнение расчетных (наилучшее с точки зрения длины свободного пробега – $5 \cdot 10^{-2}$ Па) и экспериментальных ($3 \cdot 10^{-1}$ Па) значений давления рабочего газа в технологической камере показало, что они отличаются практически на порядок. Будем считать, что эти значения определяют границы диапазона давлений совместной работы двух источников и следующей задачей является нахождение оптимального давления по критерию максимальной скорости осаждения тонкопленочного покрытия.

Литература

1. Л.Н. Розанов. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990, 320 с.

К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Н. М. Переведенцев, Э.Р. Бикулов, А.В. Бурмистров, М. Д. Бронштейн
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

При проектировании новых двухроторных вакуумных насосов (ДВН) необходимо стремиться к увеличению объема, отсекаемого роторами за один оборот $V_{отс}$, и снижению проводимости каналов роторного механизма U_0 . Величина отсеченного объема прямопропорциональна коэффициенту использования объема χ . Значение U_0 складывается из проводимостей параллельно включенных каналов, причем наибольший вклад вносит межроторный канал, проводимость которого прямопропорциональна коэффициенту $K_{зpp}$.

Значения χ и $K_{зpp}$, в первую очередь, определяются типом профиля ротора и его геометрическими соотношениями. Для профиля с эллипсом на головке ротора такими соотношениями являются b/a и r/a (a – радиус начальной окружности, r – радиус головки ротора, b – расстояние от центра ротора до центра головки).

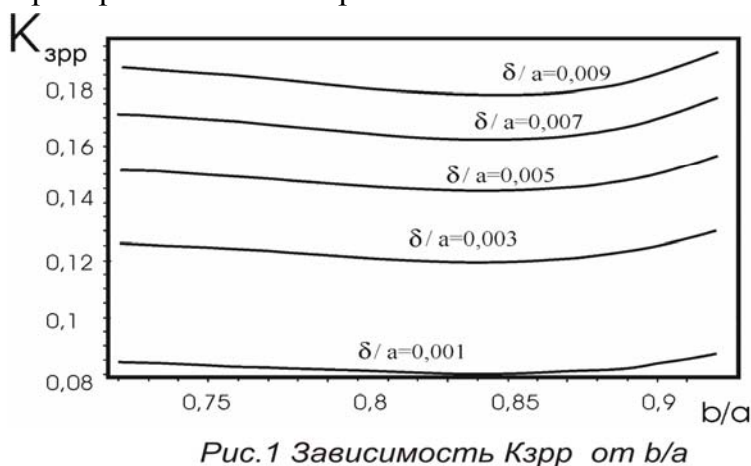


Рис.1 Зависимость $K_{зpp}$ от b/a

При нахождении оптимальных соотношений b/a и r/a мы использовали уравнения, полученные для $K_{зpp}$ и χ в работе [1]

$$K_{зpp} = 8,7 \cdot \left(\frac{\delta/a}{1 + \exp(-16,0789 + 14,662(r/a) + 14,4621(b/a))(\delta/a)^2} \right)^{0,365} \times \\ ((-13,9065 + 51,5(b/a) - 62,53(b/a)^2 + 25,363(b/a)^3) \exp(-1,7(r/a)) + \\ \exp(23,4064 + (r/a)(40,5(b/a) - 26,16) - 36,476(b/a) - 16,953(b/a)^2 + 17,711(b/a)^3))$$

$$\chi = -5,3767 + 10,3045(b/a) - 6,2(b/a)^2 + 1,26075(b/a)^3 + 10,1997(r/a) - 12,3672(b/a) \times \\ (r/a) + 3,94595(b/a)^2(r/a) - 6,09471(r/a)^2 + 3,89595(b/a)(r/a)^2 + 1,27696(r/a)^3$$

Одним из вариантов оптимизации геометрических параметров является нахождение минимального значения $K_{зpp}$, во всем значимом с практической точки зрения диапазоне. Путем перебора на ЭВМ значений r/a , для

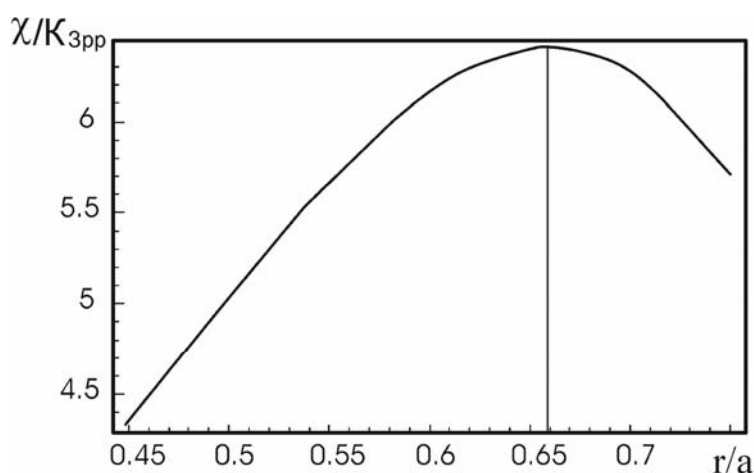


Рис.2 Зависимость $\chi/K_{зpp}$ от r/a

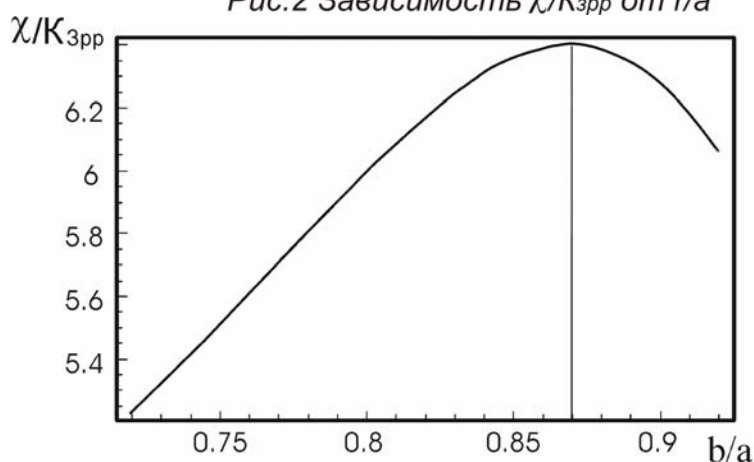


Рис.3 Зависимость $\chi/K_{зpp}$ от b/a

установленного значения b/a определялись значения $K_{зpp}$. Далее для выбранного отношения b/a определялись минимальные значения $K_{зpp}$ и соответствующее r/a . В частности, на рис.1 представлены зависимости $K_{зpp}$ от отношения b/a для различных относительных зазоров. Анализ показал, что минимальные перетекания через межроторный канал для всех рассмотренных зазоров достигаются при $b/a \approx 0.84 \div 0.85$ и $r/a = 0.610 \div 0.617$.

На практике большое значение имеет не нахождение минимальных перетеканий, а нахождение максимального отношения $\chi/K_{зpp}$, которое определяет максимальное отношение

давлений. Используя тот же метод подбиралось максимальное отношение $\chi/K_{зpp}$ и соответствующие ему отношения b/a и r/a . Зависимости $\chi/K_{зpp}$ представлены на рис. 2,3. Оптимальные отношения: $b/a = 0.87$, $r/a = 0.657$.

Использование представленных рекомендаций по выбору геометрических соотношений позволит улучшить откачные характеристики ДВН с эллиптическим профилем роторов.

Литература

1. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс // Компресс. техн. и пневматика, 2004, № 6, С. 38-40.

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РОТОРА ДВН С ЦИКЛОИДАЛЬНОЙ ГОЛОВКОЙ

Н. М. Переведенцев, А.В. Бурмистров, М. Д. Бронштейн
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Для улучшения откачных параметров двухроторных вакуумных насосов (ДВН) важно подобрать оптимальный профиль ротора.

В ДВН профиль головки ротора может быть образован различными кривыми: дугой окружности, эллипса, участком эвольвенты. В данной работе исследуется возможность построения профиля с циклоидальной головкой, при различных соотношениях между параметрами. Данный вопрос был решен в частном случае в работе [1], когда центр начальной окружности циклоиды совпадал с центром ротора. В этой ситуации имеется простая зависимость между углами поворота ротора и производящей окружностью. Однако этот способ ограничивает поиски оптимальной геометрии среди относительно небольшого семейства профилей.

Поэтому мы провели исследование общей ситуации, когда свободных параметров на три больше. В общем случае уравнение циклоиды можно записать:

$$\left. \begin{aligned} X(\psi) &= X_c + (R_1 + R_2) \cos \psi + R_3 \cos \left(\psi + \left(\psi_{02} + \psi \frac{R_1}{R_2} \right) \right) \\ Y(\psi) &= Y_c + (R_1 + R_2) \sin \psi + R_3 \sin \left(\psi + \left(\psi_{02} + \psi \frac{R_1}{R_2} \right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где X_c, Y_c – координаты центра начальной окружности, отстоящей от центра ротора; ψ – параметр задающий точку на головке; ψ_{02} – угол образованный векторами O_2M и O_1O_2 при $\psi=0$ (рис.1).

Если направить ось X_2 так, чтобы она делила пополам дугу центроиды, на которую опирается головка, то условие для граничных точек дуги, определяющее головку, можно записать в виде:

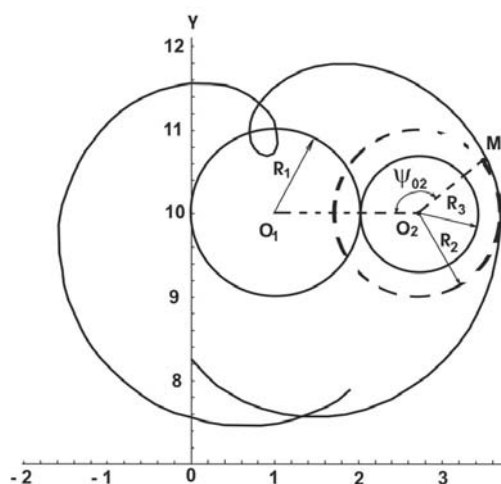


Рис.1 Построение циклоиды

$$\left\{ \begin{aligned} (X(\psi_0), Y(\psi_0)) &= \frac{A}{2} \left(\cos \left(\frac{-\pi}{2N} \right), \sin \left(\frac{-\pi}{2N} \right) \right) \\ (X(\psi_1), Y(\psi_1)) &= \frac{A}{2} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2N} \right), \sin \left(\frac{\pi}{2N} \right) \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где N – число головок, A – расстояние между центрами роторов.

На настоящий момент мы исследовали случай когда $Y_c = 0$ и $\psi_{02} = 0$, и когда начальная точка головки ротора, лежащая на центроиде,

симметрична конечной, т.е. $\Psi_0 = -\Psi_1$. В общем случае они могут быть не равными. При нахождении кривой, описывающей головку ротора, R_3 и X_c подбирались таким образом, чтобы головка ротора опиралась на дугу центроиды величиной π/N . Чтобы профиль существовал, для вводимых параметров должно выполняться следующее условие:

$$\left| \frac{(X^2(\psi) + Y^2(\psi))'_\psi}{A\sqrt{(X'_\psi(\psi))^2 + (Y'_\psi(\psi))^2}} \right| \leq 1 \quad (3)$$

При не выполнении этого условия, некоторые точки на головке ротора никогда не войдут в контакт. Это означает наличие перевальных объемов, что значительно ухудшает максимальное отношение давлений.

В данной работе изменялись параметры Ψ_0 , R_1 , R_2 , и наблюдалось когда выполняется условие (3) и какое при этом получается значение коэффициента используемого объема.

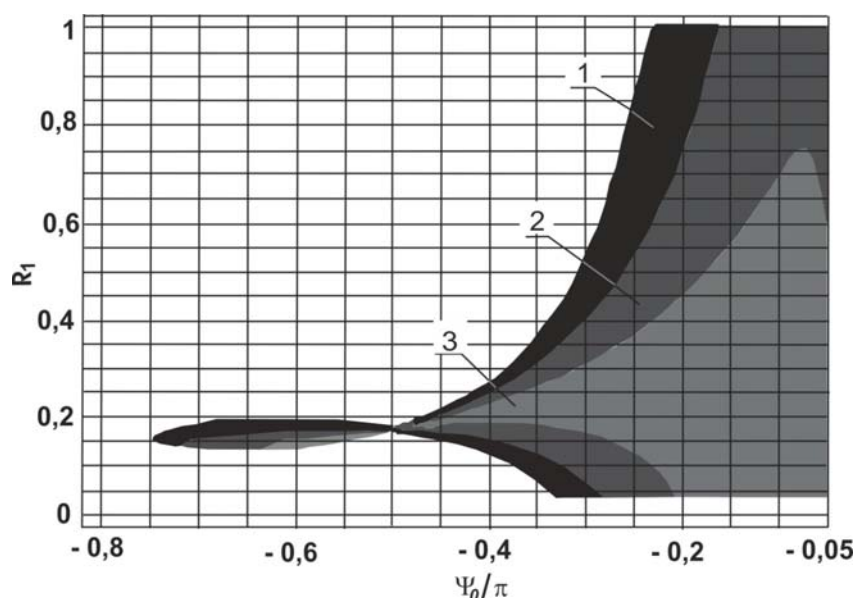


Рис.2 Области профилирования роторов с циклоидальной головкой при $R_1 = R_2$ и $\Psi_0 = -\Psi_1$

На рисунке 2 показана область, где существует профиль (выполняется условие (3)). Всю область профилирования, в зависимости от коэффициента используемого объема – χ , поделили на три части. В области 1 коэффициент χ больше 0,5, в области 3 меньше 0,3, а в области 2 занимает промежуточное значение.

Литература

1. Сакун И.А. Винтовые компрессоры. Л.: Машиностроение, 1970. 400с.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ЗАТВОР ИЛИ “АНТИНАСОС” ГЕДЕ

М.В.Добрынина, М.Д.Бронштейн, К.Б.Панфилович

КГТУ, г. Казань, ул. К.Маркса, 68

e-mail: vacuum@kstu.ru

Рассмотрена возможность использования динамического затвора для разделения смесей газов. Затвор имеет такое же устройство, что и молекулярный насос Геде, но ротор вращается в противоположную сторону (рис. 1). Ротор диаметром D расположен в корпусе. Зазор между ротором и корпусом равен h . В верхней части корпуса имеется вставка, зазор между ней и ротором должен быть минимально возможным. Поток молекул газа движется из сосуда 1 в сосуд 2. В смеси газов масса молекул неодинакова.

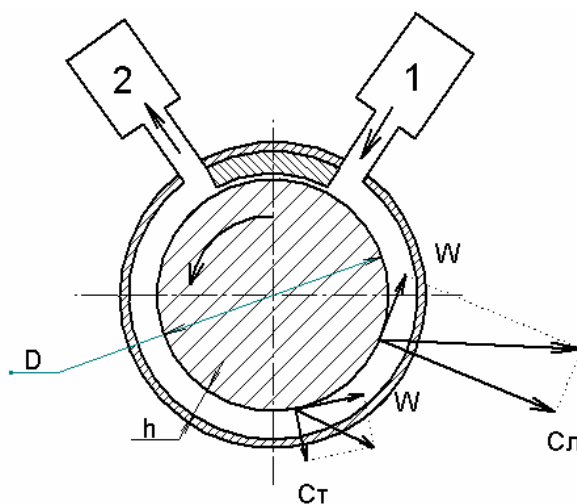


Рис.1. Схема движения газов в “антинасосе” Геде:

1 – сосуд с исходной смесью газов; 2 – сборник газов

Расчет потоков газов из сосуда 1 по каналу в сосуд 2 рассчитан методом статистических испытаний. Режим течения газов – молекулярный, отражение молекул от стенок диффузное. Давлением газов в сосуде 2 можно пренебречь. Проводимость канала рассчитана при разных числах оборотов ротора, тепловые скорости молекул газа имеют максвелловское распределение.

После столкновения молекул газа со стенкой, скорость молекулы находилась как векторная сумма тепловой C и окружной W скоростей.

Окружная скорость стенки ротора W постоянна при заданном числе оборотов, тепловая скорость у тяжелых молекул $Ст$ меньше, чем у легких $Сл$. Следовательно, суммарные вектора скоростей стенки и тепловых скоростей молекул будут разными. У легких молекул больше шансов уйти в сосуд 2, чем у тяжелых. Таким образом, смесь газов в сосуде 1 обогащается тяжелым компонентом.

Результаты расчета даны на рис. 2, где обозначено: M_0 – начальная масса смеси в сосуде 1, M – масса смеси газов в сосуде 1 при заданной доле тяжелого компонента в смеси $f = M_T/M$, где M_T – масса тяжелого компонента в сосуде 1. Начальная доля тяжелого компонента $f_0 = M_{0T}/M_0$ принята равной 0,02. Отношение масс тяжелого и легкого компонента в расчетах равно 1,1.

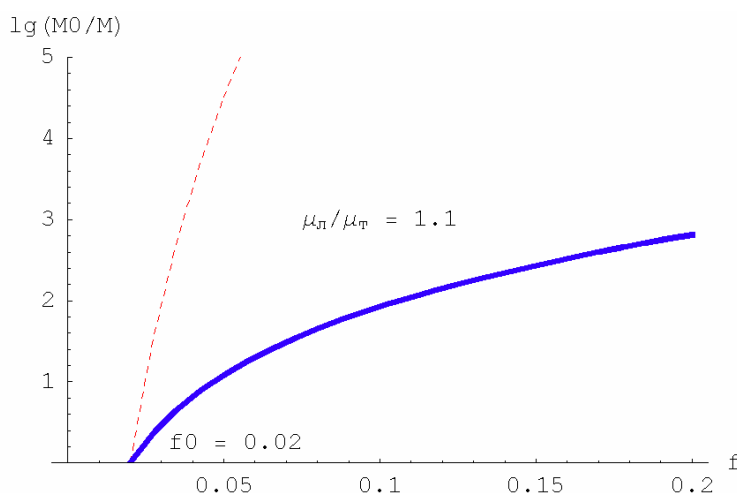


Рис. 2. Зависимость отношения M_0/M от массовой доли f тяжелого компонента в оставшейся смеси

Если ротор не вращается, то наблюдается обычное разделение смеси при истечение легкого и тяжелого газов из сосуда 1 в сосуд 2 (пунктирная линия на рис. 2). Для получения доли $f=0,12$ в сосуде 1, нужно израсходовать примерно 90% всей смеси. При вращении ротора ($n=100 \text{ с}^{-1}$) для получения той же величины $f=0,12$ в сосуде 1 остается 50% исходной смеси (сплошная линия на рис. 2). Увеличение отношения молекулярных масс газов значительно улучшает процесс разделения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВИСКОЗИМЕТРА С ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ

А.Д. Гарифуллин, Д.И. Сагдеев, *Р.Г. Тахавутдинов

КГТУ, Казань, К. Маркса, 68

*КГЭУ, Казань, ул. Красносельская, 51

e-mail: vacuum@kstu.ru

Оптимизация состава вакуумных рабочих жидкостей обеспечивает повышение технико-экономических и эксплуатационных характеристик вакуумного откачного оборудования. Вязкость является одним из важнейших физико-химических свойств наиболее полно характеризующим молекулярное строение и состав исследуемой жидкости.

Для повышения эффективности научно-исследовательских работ требуются многоплановые исследования, включая физическое и математическое моделирование. Проведение физических экспериментов обходится дорого. Поэтому представляется целесообразным более широкое привлечение методов компьютерного моделирования при разработке новых конструкций измерительных приборов. Гидродинамическая обстановка в вискозиметрах с падающим грузом может быть детально изучена с применением программных комплексов для расчета гидродинамики.

В данной работе для моделирования использована версия 2002 года «PHOENICS-3.5». Программный продукт «PHOENICS» решает балансовые уравнения для различных видов субстанций [1]. В дифференциальной форме эти соотношения баланса для однофазного потока выражаются следующим обобщенным уравнением

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho U_\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) = S_\phi, \quad (1)$$

где ϕ - вид субстанции - импульс единицы массы (т.е. скорость), энтальпия (т.е. тепловая энергия), концентрация, кинетическая энергия турбулентности и т.д.; ρ - плотность; Γ - коэффициент переноса (коэффициент вязкости, теплопроводности, диффузии и т.д.); U - вектор скорости; S - источник.

В «PHOENICS» используется метод конечных объемов. Вся расчетная область разбивается на достаточно мелкие контрольные объемы, и записывается дискретный аналог указанных выше дифференциальных уравнений. Дискретный аналог выражает баланс потоков субстанции, то есть: (вход в ячейку) - (выход из ячейки) = (источник внутри ячейки).

Запись подобных соотношений для всех ячеек и их сопряжение вместе с краевыми условиями на границах расчетной области позволяет замкнуть задачу.

В данной работе рассчитаны поля давления и скоростей при истечении вязкой жидкости через узкий кольцевой канал между жёсткой непроницаемой трубкой и падающим в ней коаксиально цилиндрическим грузом.

Для решения нашей задачи падающий груз жестко фиксируется, а перемещается цилиндрическая трубка с калибровочной жидкостью относительно груза. Скорость перемещения цилиндрической трубки и жидкости приравниваем к скорости падения груза и ее значение задается на входе и на выходе из трубки.

Нами использована модель ламинарного режима, которая хорошо работает при описании медленных (ползучих) течений. В программном комплексе использованы встроенные граничные условия для стенки с заданием пристеночных функций вблизи стенки.

Результаты моделирования для всей расчетной области с использованием программного комплекса “PHOENICS” представлены в виде полей давления рис.1. и скоростей на рис.2. Числовые значения давлений и скоростей рассчитаны для калибровочной жидкости (вода дистиллированная) и груза при числе Рейнольдса $Re=9,48$.

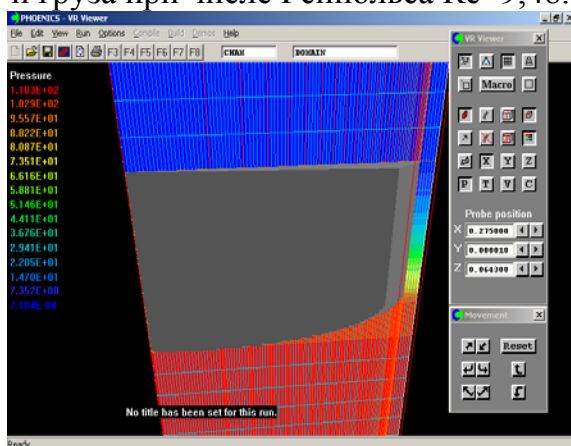


Рис.1. Поле давлений

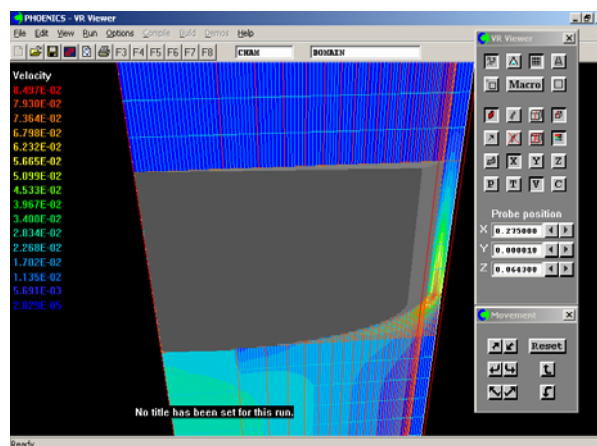


Рис.2. Поле скоростей

Результаты компьютерного моделирования, с использованием программного комплекса “PHOENICS”, поля давлений показали, что область высокого давления располагается под падающим грузом и постепенно уменьшается в кольцевом зазоре до разряжения над грузом. Для поля скоростей наблюдается максимальная скорость течения калибровочной жидкости при входе в цилиндрическую часть падающего груза.

Литература

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

МЕТОД СИМПЛЕКСНЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ СМЕСЕЙ ВАКУУМНЫХ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

Н.А. Шагиева, А.Д. Гарифуллин, А.А. Хубатхузин, Д.И. Сагдеев
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

Широкое использование вакуумных рабочих жидкостей (ВРЖ) в откачном оборудовании вакуумных установок повышает спрос на минеральные вакуумные масла для них. Минеральные вакуумные масла представляют собой сложные смеси парафиновых, ароматических и непредельных углеводородов. При разработке новых сортов и марок масел одним из основных является требование к их вязкостно-температурным свойствам [1,2].

Основной задачей при исследовании реальных смесей ВРЖ является выявление закономерностей изменения их свойств от состава и параметров состояния. Располагая подобной зависимостью, полученной методом симплексных решеток с использованием компьютерного моделирования, изменяя концентрации компонентов, температуру, можно находить оптимальные условия, удовлетворяющие требованиям по выходным параметрам. В данном сообщении в качестве примера рассматривается компьютерное моделирование плотности смесей вакуумных масел в широком диапазоне изменения температур.

В программу экспериментальных исследований плотности включены минеральные вакуумные масла (ВМ-1 и ВМ-5), непредельные углеводороды (1-октен) и их бинарные и одна трехкомпонентная смесь, представленные в табл.1.

Таблица 1

Характеристика исследованных ВРЖ

№	Наименование вещества	Плотность, ρ^{25} , кг/м ³	Интервал температур, К
1	ВМ-1	885.01	298-368
2	ВМ-5	864.46	298-368
3	1-октен	662.86	298-368
4	50% ВМ-1 +50% ВМ-5	874.19	298-368
5	50% ВМ-1 +50% 1-октен	796.23	298-368
6	50% ВМ-5 +50% 1-октен	744.13	298-368
7	33.3% ВМ-1+33.3% ВМ-5+ 33.3% 1-октен	820.78	298-368

В работе [3] рассмотрена возможность компьютерного моделирования физико-химических и теплофизических свойств с применением симплекс-решетчатых планов для обработки результатов измерений плотности и коэффициентов динамической вязкости трехкомпонентных смесей непредельных углеводородов, которая позволяет использовать данную

обработку результатов экспериментальных исследований и на класс полиэтиленгликолей.

Преимущество симплекс-решетчатых планов состоит в том, что располагая результатами эксперимента для чистых веществ, бинарных систем и одной трехкомпонентной системы, как в нашем случае, можно предсказать значение свойств для трехкомпонентной смеси любого состава.

Для получения симплекс-решетчатых планов был использован пакет STATGRAPHICS Plus, который для модели второго порядка с центральной точкой внутри решетки позволил получить коэффициенты расчетных выражений для фиксированных температур, а также и зависимости коэффициентов от температуры (табл.2)

$$Y = \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + \beta_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + \beta_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + \beta_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3,$$
 где X_1, X_2, X_3 - % содержание компонентов в смеси, соответственно, ВМ-1, ВМ-5, 1-октен.

Таблица 2

Значения коэффициентов симплекс-решетчатого плана

Коэффициенты симплекса	R^2
$\beta_1 = 900.37 - 0.6101 \cdot t$	0.9996
$\beta_2 = 880.15 - 0.6276 \cdot t$	1
$\beta_3 = 686.94 - 0.9706 \cdot t$	0.9996
$\beta_{12} = 15.876 - 0.8575 \cdot t + 0.0054 \cdot t^2$	1
$\beta_{13} = 87.378 + 0.0327 \cdot t + 0.0016 \cdot t^2$	1
$\beta_{23} = -78.175 + 0.0564 \cdot t - 0.0022 \cdot t^2$	1
$\beta_{123} = 286 + 6.2412 \cdot t - 0.0297 \cdot t^2$	1

Располагая результатами эксперимента для чистых веществ, бинарных систем и одной трехкомпонентной системы, можно предсказать значение свойства для трехкомпонентной смеси любого состава, при использовании стандартной надстройки “Подбор параметра”.

Литература

1. Артемьева В.П., Орлова С.Н. Влияние состава вакуумного масла на эксплуатационные характеристики насосов. Нефтепереработка и нефтехимия., 1983, вып.3., с.20-22.
2. Широкова Г.Б., Калинина Э.В., Ермакова Т.И., Эстрина Т.М., Школьников В.М. Метод расчета смешения основ для рабочих жидкостей гидравлических систем. .
3. Сагдеев Д.И., Хубатхузин А.А., Фомина М.Г., Воробьев Е.С., Мухамедзянов Г.Х. Компьютерное моделирование методом симплексных решеток плотности и вязкости многокомпонентных смесей непредельных углеводородов в широком диапазоне изменения параметров состояния. Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. том 3, №10, с.50-54.

РАСЧЕТ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВН С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ СТЕНОК КАНАЛОВ РОТОРНОГО МЕХАНИЗМА

И.А. Сабиров, Д.Г. Караблинов, А.В. Бурмистров
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: burm@kstu.ru

Для разработки новых и совершенствования существующих двухроторных вакуумных насосов (ДВН) необходим метод предсказания их откачных характеристик при варьировании конструктивных параметров и эксплуатационных факторов. В работе [1] предложен метод расчета, основанный на рассмотрении ДВН как комбинированного объемно – скоростного насоса. Для расчета перетекания газа через зазоры рекомендуется использовать подходы, используемые для кинетических (молекулярных) насосов. Это позволяет строить откачную характеристику ДВН по двум характерным точкам:

1. Максимальная быстрота действия ДВН (при $P_{\text{ВЫХ}} / P_V = 1$)

$$S_{V_{\text{max}}} = S_{\Gamma} + U_{\text{ПР}} - U_{\text{ОБР}}, \quad (1)$$

где S_{Γ} - геометрическая быстрота действия; $U_{\text{ПР}}$ - прямая (в направлении со входа на выход) суммарная проводимость каналов; $U_{\text{ОБР}}$ - обратная (с выхода на вход) суммарная проводимость каналов; $P_{\text{ВЫХ}}$ и P_V - давления на выходе и давление в отсеченном объёме соответственно.

2. Максимальное отношение давлений ДВН при безрасходном режиме:

$$(P_{\text{ВЫХ}} / P_V)_{\text{max}} = (S_{\Gamma} + U_{\text{ПР}}) / U_{\text{ОБР}}. \quad (2)$$

Основную проблему на данном пути составляет нахождение $U_{\text{ПР}}$ и $U_{\text{ОБР}}$. Экспериментальное определение этих величин невозможно, поскольку в ДВН на процесс перетеканий через каналы накладывается объёмный перенос газа роторами в отсечных объёмах. Поэтому в [1] предлагается находить $U_{\text{ПР}}$ и $U_{\text{ОБР}}$, используя проводимость каналов при неподвижных роторах U_0 и эмпирические коэффициенты, полученные при испытаниях насосов серии ДВН-50 Казанского ОАО “Вакууммаш”. Это является основным недостатком [1], поскольку проблематичен перенос результатов на насосы с другими типоразмерами и профилем роторов. Строгое решение задачи требует нахождения $U_{\text{ПР}}$ и $U_{\text{ОБР}}$, как суммы параллельно работающих каналов ДВН (один межроторный, два радиальных и два торцевых).

С использованием подходов [2,3] проведен расчет прямой и обратной проводимостей каналов с движущимися стенками для насосов ДВН 50/120 (50 – быстрота действия насоса, л/с; 120 – длина роторов, мм), ДВН 50/150, ДВН 150/350 при варьировании частоты вращения роторов n и угла поворота роторов α .

На рис.1. представлены зависимости обратных проводимостей отдельно взятых каналов и суммарной проводимости для $n=3000$ об/мин. На основании аналогичных зависимостей для различных частот вращения рассчитаны значения $(P_{ВЫХ} / P_V)_{\max}$ по уравнению (2). Результаты в сопоставлении с экспериментальными данными представлены на рис.2. Расхождение нашего расчета с экспериментом не превышает 10%.

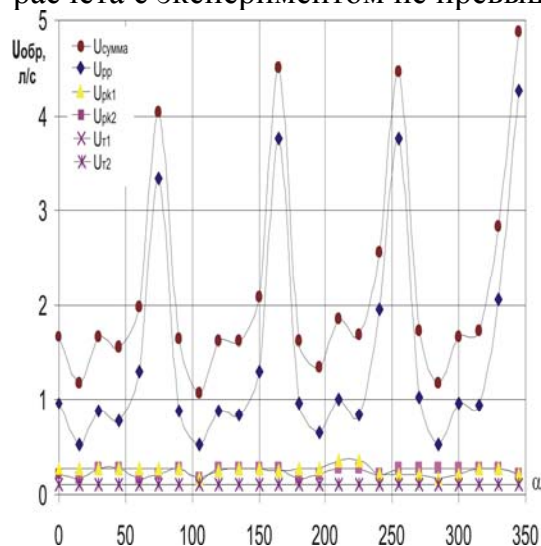


Рис.1. Обратная проводимость каналов роторного механизма ДВН-50/150

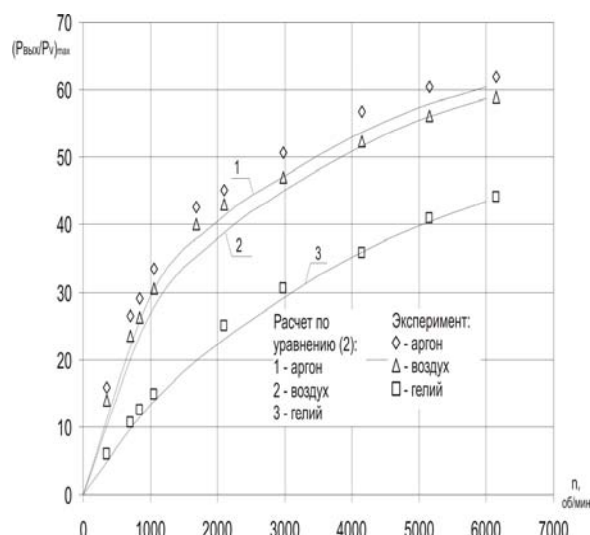


Рис.2. Максимальное отношение давлений механизма ДВН-50/150, ДВН-50/150

Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет рассчитать откачные характеристики ДВН при молекулярном режиме течения газа в зазорах роторного механизма без использования эмпирических коэффициентов.

Литература

1. Бурмистров А.В., Беляев Л.А. Концепция объемно-скоростной откачки. Метод расчета двухроторных вакуумных насосов // Вакуумная техника и технология, т. 12, № 2, 2002, С.85-90.
2. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г. Влияние скорости роторов на перетекание в межроторном канале двухроторного вакуумного насоса // Материалы X научно – техническая конференция «Вакуумная наука и техника». М.: МИЭМ. 2003 – С. 97-100.
3. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Моделирование течения разреженного газа в каналах с движущейся стенкой // Сборник трудов Международной науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ -17»: В 10 т., Т.5. Секция 5.- Кострома, 2004. – С.105 - 108.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОСТРУЙНОГО ЭЖЕКТОРА В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ «PHOENICS»

А.Р. Бикмуллин, Е.В. Антипова, Д.И. Сагдеев
КГТУ, Казань, К. Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

Для повышения эффективности научно-исследовательских работ широко используются методы физического и математического моделирования[1]. Физические эксперименты требуют больших материальных затрат. Поэтому представляется целесообразным широкое привлечение методов компьютерного моделирования при разработке новых конструкций вакуумного оборудования.

К наиболее распространенным программным продуктам данного класса можно отнести следующие: FLUENT, Star-CD, Flow-3D, PHOENICS, CFX и некоторые другие

Более 20 лет программный продукт «PHOENICS» успешно развивается, постоянно обновляется и современные версии его имеют удобный пользовательский интерфейс. В данной работе для моделирования использована версия 2002 года «PHOENICS-3.5».

Программный продукт «PHOENICS» решает балансовые уравнения для различных видов субстанций и использует метод конечных объемов. Вся расчетная область разбивается на достаточно мелкие контрольные объемы, и записывается дискретный аналог указанных выше дифференциальных уравнений. Дискретный аналог выражает баланс потоков субстанции, то есть: (вход в ячейку) - (выход из ячейки) = (источник внутри ячейки).

Запись подобных соотношений для всех ячеек и их сопряжение вместе с краевыми условиями на границах расчетной области позволяет замкнуть задачу.

В данной работе рассмотрена возможность моделирования поля давления и скоростей при истечении газового потока через проточные элементы газоструйного эжектора для удаления загрязненного воздуха [2]. В качестве эжектирующей среды используется наружный воздух, который подается вентилятором. Расчетная сетка построена с учетом геометрии объекта.

Результаты моделирования для всей расчетной области с использованием программного продукта «PHOENICS» представлены в виде полей давления рис.1. и скоростей на рис.2.

Нами использована модель ламинарного режима течения газа. В программном продукте использованы встроенные граничные условия для стенки с заданием пристеночных функций вблизи стенки.

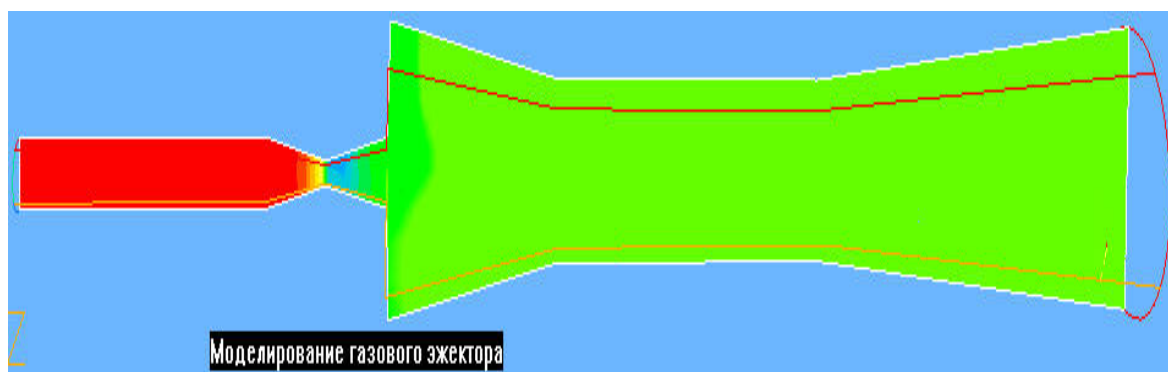


Рис.1. Поле давлений

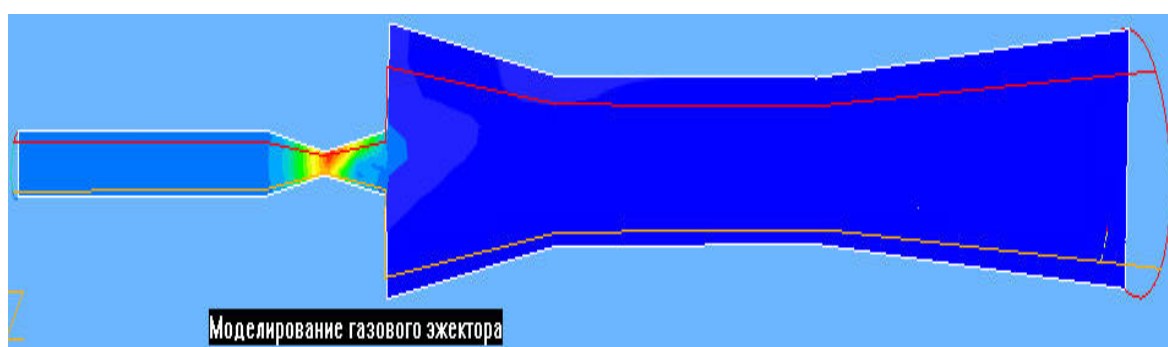


Рис.2. Поле скоростей

Результаты компьютерного моделирования, с использованием программного продукта “PHOENICS”, показали, что область низкого давления располагается после сопла Лавалья, а это позволяет использовать данную область для откачки газов. Повышение давления на выходе из камеры смешения обеспечивает возможность выхода газового потока при более высоких давлениях, чем атмосферное.

Литература

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Матвеев П.С., Стабников В.Н. Струйные аппараты в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1980. 224 с. (стр.100-104).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ МЕЖДУ ГАЗОМ И СТЕНКАМИ В ДВУХРОТОРНОЙ МАШИНЕ

А.Г. Сайфетдинов, И.И. Шарапов, А.Г. Сайфетдинов
КГТУ, Казань, ул. К.Маркса, 68
e-mail: irek_kstu@rambler.ru

Описание теплообмена между газом и стенками в роторной машине (вакуум-насосе, компрессоре) при математическом моделировании рабочего процесса представляет значительные трудности в связи с отсутствием зависимостей коэффициента теплоотдачи от режимных и геометрических параметров.

В данной работе для определения коэффициента теплоотдачи между газом и стенкой в двухроторной машине типа ДВН-50 спланированы и проведены экспериментальные исследования, в ходе которых фиксировались мгновенные температуры газа и стенки. Для этого на расточке корпуса, от патрубка всасывания до патрубка нагнетания установлены термопарные датчики (рис. 1). Диаметр проволоки хромель-копелевых термопар составляет 0,02 мм, постоянная времени составляет 8-10 мкс. Термопары, фиксирующие мгновенную температуру газа, выведены в рабочую полость и лежат в одной плоскости вращения. На роторе в месте расположения датчиков сделан пропилен, позволяющий ротору вращаться. Термопары, фиксирующие мгновенную температуру внутренней и наружной стенки приварены непосредственно к соответствующим поверхностям.

Температурное поле внутри стенки при известных температурах на ее границах (внутренняя и наружная поверхность) вычисляется по одному из численных методов решения задачи нестационарной теплопроводности – методу элементарных балансов (метод Ваничева). Коэффициент теплоотдачи определяется из совместного решения уравнений Фурье и Ньютона-Рихмана по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda_{cm}(t_{вн} - t_1)}{\delta(t_2 - t_{вн})},$$

где λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала стенки; δ – толщина элементарного объема; t_2 , $t_{вн}$ – мгновенные температуры газа и внутренней стенки, t_1 – температура первого элементарного объема в методе Ваничева.

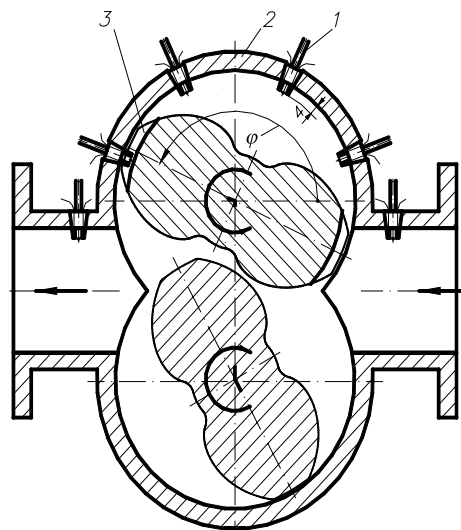


Рис. 1 Расположение датчиков на корпусе

Для съема сигнала с термопарных датчиков использовался специализированный измерительный комплекс, предназначенный для исследования быстропротекающих процессов созданный на базе персонального компьютера.

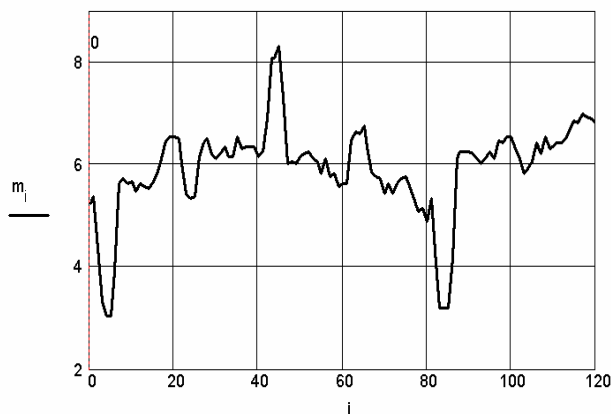


Рис. 2. Исходный сигнал, снимаемый с термопарного датчика

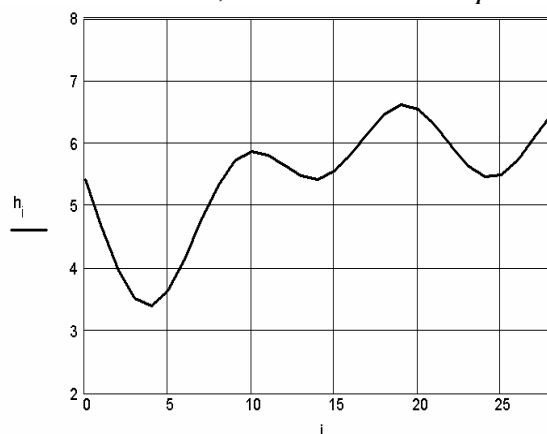


Рис. 3. Отфильтрованный сигнал

Полученный сигнал кроме полезной составляющей содержал большое количество разного рода помех, шумов (рис. 2). Для выделения полезной составляющей сигнала использовался Фурье анализ с применением математического пакета MathCAD. Метод основывался на быстром преобразовании Фурье, посредством которого исходный сигнал из системы амплитуда-время переводился в частотную область, гармоники, содержащие помехи отсеивались, после чего путем обратного преобразования сигнал переводился назад во временную область. При этом выделялся полезный сигнал на частоте протекающего процесса (рис. 3). Рисунок 2 построен в координатах исходный сигнал m_j , мВ – число измерений, пропорциональное углу поворота ротора. На рисунке 3 по оси ординат отложен полезный сигнал h_j , мВ.

Примененный метод фильтрации позволил получить адекватную зависимость изменения температуры стенки и газа от угла поворота ротора, необходимую для определения мгновенных коэффициентов теплоотдачи.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЖЕКТОРОВ, ПРЕДВКЛЮЧЕННЫХ К ВВН-1,5

Д. А. Андреева, С.А. Бурцев, А.В. Гаврилов
КГТУ, Казань, К. Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

Вакуум является необходимым условием работы многих технологических линий и физических установок. Для каждого технологического процесса существуют свои определенные условия проведения. К этим условиям, в частности, относится требуемая чистота и величина вакуума.

Одним из источников загрязнений является миграция углеводородов в откачиваемые объемы из форвакуумных маслозаполненных насосов типа НВЗ и НВР. Кроме того, механические вакуумные насосы с масляным уплотнением непригодны для откачки паров воды, растворителей и т.д.

Вышеперечисленных недостатков лишены водокольцевые вакуумные насосы, которые позволяют получать безмасляный вакуум в широком диапазоне давлений всасывания, но у такого типа насосов довольно высокое предельное остаточное давление ($2660 \div 9130$ Па для одноступенчатых насосов и $133 \div 665$ Па для двухступенчатых), которое помимо чисто конструктивных факторов, обусловлено давлением насыщенных паров рабочей жидкости (воды).

Для снижения рабочего давления и получения приемлемой производительности в зоне абсолютных давлений $400 \div 4000$ Па применяются газовые, чаще всего воздушные эжекторы [1].

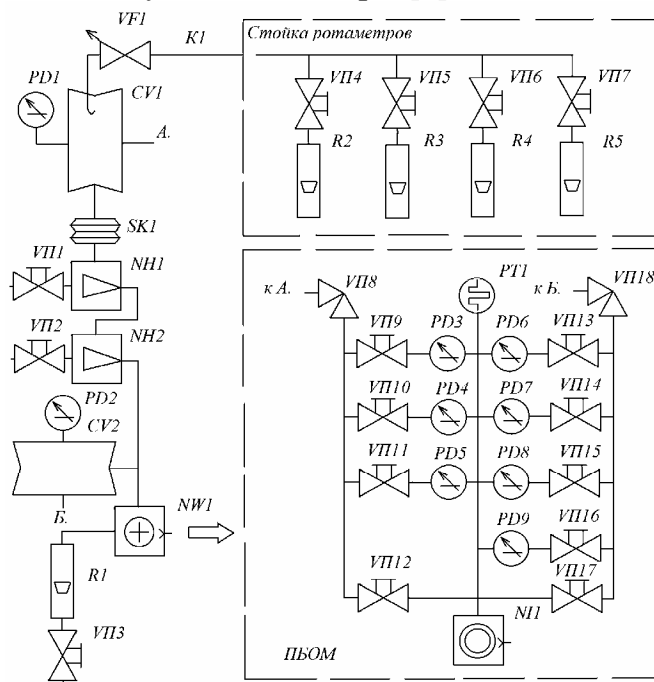


Рис.1 Вакуумная схема стенда испытаний.

С целью исследования агрегатов подобного типа был разработан и создан экспериментальный форвакуумный агрегат на базе водокольцевого насоса ВВН-1,5 с двумя ступенями воздухо-воздушного эжектора, вакуумная схема которого приведена на рис.1.

Стенд испытаний состоит из вакуумных камер *CV1* и *CV2*, водокольцевого насоса *NW1*, эжектора первой *NH1* и эжектора второй *NH2* ступеней, а также средств измерения давления в камерах (передвижной блок оптических манометров ПБОМ) и расхода (стойка ротаметров).

Схема подключения эжекторов представлена на рис.2. Каждая ступень имеет свой набор сопел с различными диаметрами критического сечения и среза сопла. Конструкция эжекторов позволяет изменять площадь камеры смешения.

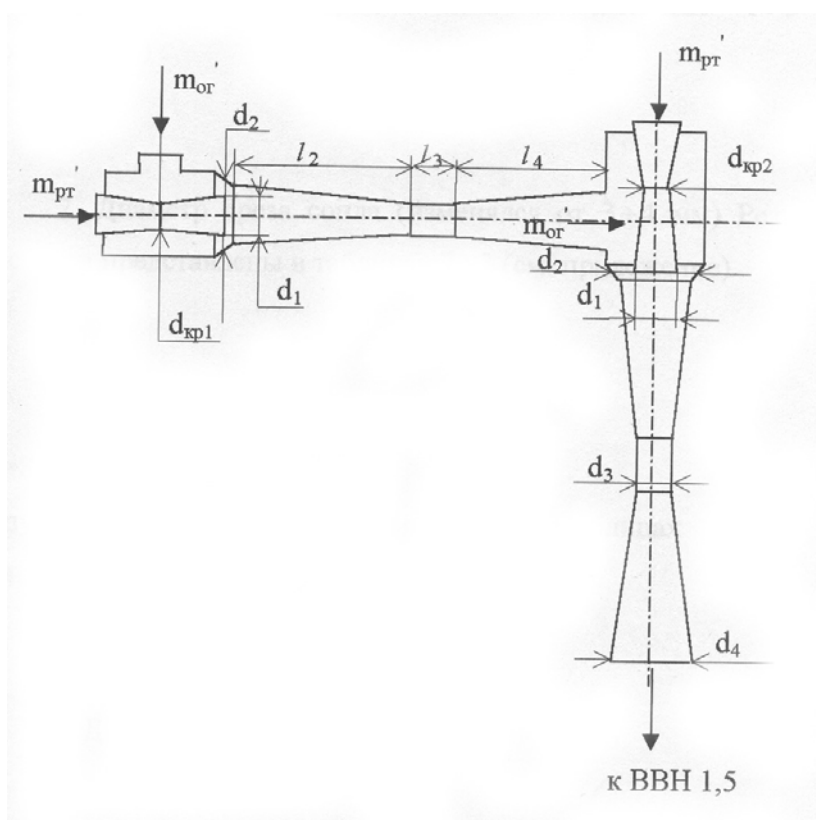


Рис.2. Схема подключения эжекторов

Предусмотрена возможность проведения экспериментов по следующим схемам: ВВН-1,5 + эжектор второй ступени; ВВН-1,5 + эжектор второй ступени + эжектор первой ступени.

Литература

1. Райзман И.А. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы и компрессоры. – Казань: КГТУ, 1995, - 285с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВУХРОТОРНОГО ВАКУУМ-НАСОСА И КОМПРЕССОРА ЗА СЧЕТ ВПРЫСКА ВОДЫ НА ВСАСЫВАНИЕ

Т.Н. Мустафин, С.В. Визгалов, А.М. Ибраев
КГТУ, Казань, К. Маркса, 68
e-mail: sv_kstu@rambler.ru

Конструкции двухроторного вакуум-насоса и шестеренчатого компрессора практически идентичны, различия между ними лежат в диапазоне давлений на входе и выходе. Рабочие процессы в таком компрессоре и вакуум-насосе в области низкого вакуума также имеют много общего. Поэтому для вакуум-насосов при работе на этих режимах применимы методы расчета, разработанные для компрессоров. Достаточно давно известно применение впрыска жидкости – воды на всасывание, как двухроторного вакуум-насоса, так и компрессора, для повышения их характеристик, снижения температуры на выходе. Рабочим телом таких машин является двухфазная газожидкостная смесь, что вносит определенные сложности в расчет.

Разработана математическая модель рабочих процессов двухроторного (шестеренчатого) компрессора при сжатии двухфазных газожидкостных смесей. Основные допущения и рабочие уравнения модели изложены ранее в работах [1, 2]. Сравнение расчетных характеристик компрессора с экспериментальными и идентификация некоторых уравнений позволила добиться достаточно высокой сходимости результатов математической модели и эксперимента (по коэффициенту подачи и изотермному КПД наибольшая относительная ошибка составила 1,5%).

На основе параметрического численного анализа на математической модели изучено влияние относительного количества впрыскиваемой жидкости $d_{впр}$ – воды на всасывание компрессора, ее начальной дисперсности; режимных параметров, таких как отношение давлений Π и окружная скорость ротора u ; величин рабочих зазоров, которые определяются, во-первых монтажными значениями и во-вторых коэффициентами линейного расширения материалов, образующих стенки зазоров на характеристики шестеренчатого компрессора.

В результате анализа сделаны следующие выводы:

- Впрыск сравнительно небольшого количества воды $d_{впр}=5...20\%$ позволяет повысить коэффициент подачи компрессора λ на 4...10% (в зависимости от Π и u), изотермный индикаторный КПД η_{ind} – на 2...8,5%, снизить перепад температуры нагнетание-всасывание на 60...68%. Все цифры приведены по сравнению с «сухими» режимами. Наибольший эффект от впрыска достигается при меньших скоростях ротора и больших отношениях давлений, т.к. в этих случаях на «сухих» режимах особенно велики протечки через щели.

- Существует взаимосвязь между значениями окружной скорости ротора, отношением давлений и параметром $d_{впр}$ в точке максимального эффективного КПД η_t или коэффициента подачи компрессора (оптимальный режим). При $u < u_{опт}$ при данном Π для достижения максимума КПД необходимо увеличивать $d_{впр}$ в 3...4 раза, а при $u > u_{опт}$ увеличение $d_{впр}$ сверх определенных значений приводит к снижению η_t и λ из-за роста гидравлических потерь. Путем регулирования $d_{впр}$ и u возможно поддержание КПД компрессора на максимальном уровне при изменении Π .

- Дисперсность впрыскиваемой на всасывание жидкости при рассмотренных величинах $d_{впр}$ не оказывает существенного влияния на характеристики компрессора. Основным положительный эффект от впрыска жидкости в компрессор достигается, во-первых за счет уплотнения щелевых зазоров, причем наибольшее уплотнение достигается для радиального зазора, во-вторых за счет теплообмена с пленкой жидкости и вторичными каплями на нагнетании, образующимися при дроблении участков пленки интенсивно натекающим обратным газовым потоком (так как шестеренчатый компрессор – машина внешнего сжатия).

- Из зазоров (радиальный, профильный, торцевой) наибольшее влияние на КПД и производительность компрессора оказывает профильный зазор из-за худшей его уплотненности жидкостью по сравнению с другими зазорами. Снижение его монтажной величины на 60% от номинала, возможное за счет снижения тепловых деформаций при впрыске, позволяет повысить КПД компрессора на 6...8%.

- При выполнении расточки корпуса и роторов из различных материалов, сочетание которых приводит к увеличению рабочих зазоров, например стальные ротора и корпус из сплава на основе алюминия, впрыск жидкости приводит к большему росту η_t и λ по сравнению с «сухими» режимами, что объясняется не только уплотнением зазоров жидкостью, но и уменьшением рабочих величин зазоров из-за снижения температуры стенок. В целом неблагоприятное влияние сочетания материалов за счет впрыска жидкости значительно снижается.

Результаты работы могут быть использованы при исследовании аналогичных машин в вакуумном режиме.

Литература

1. Визгалов С.В., Ибраев А.М., Мифтахов А.А. Математическое моделирование рабочих процессов шестеренчатых компрессоров при сжатии газожидкостных смесей // Тезисы докладов одиннадцатой международной научно-технической конференции по компрессорной технике. – СПб. – 1998. – С. 73-75.
2. Визгалов С.В., Ибраев А.М., Мифтахов А.А. Математическое моделирование рабочего процесса шестеренчатого компрессора с двухфазным рабочим веществом // Вестник МАХ. – 2001, №4. – С. 8-13.

Секция 3

Вакуумные установки

и технологии

МНОГОПОЗИЦИОННАЯ УСТАНОВКА НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

К.М. Моисеев, А.Н. Залесов, Ю.В. Панфилов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская, 5
e-mail: panfilov@mx.bmstu.ru

Современные требования к наноструктурным покрытиям заставляют искать новые технологические возможности их создания и совершенствовать уже имеющиеся, и, следовательно, создавать новое технологическое оборудование для реализации этих процессов. Для этих целей была создана установка, имеющая широкие возможности по нанесению тонкоплёночных покрытий.

Многопозиционная установка для нанесения многослойных тонкоплёночных покрытий относится к установкам периодического действия. Отличительной особенностью установки является возможность формирования многослойных и многокомпонентных покрытий в одной камере за один технологический цикл без замены катодов.

Установка имеет технологическую (рабочую) камеру большого объема, что позволяет обрабатывать образцы больших размеров или несколько образцов одновременно.

Вакуумная система установки состоит из высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса Н-250 с азотной ловушкой и механического насоса НВР-16Д. На форвакуумной магистрали установлен электромагнитный клапан КВУМ-40, на байпасной – КВУМ-25. Диффузионный насос отделён от камеры высоковакуумным затвором типа 23В9 250. Измерение давления в камере осуществляется при помощи двух манометрических преобразователей: термпарного ПМТ-2 и ионизационного ПМИ-2, данные которых обрабатываются вакуумметром ВИТ-2П. Остаточное давление механического насоса $\approx 0,5$ Па, диффузионного насоса $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ Па.

Установка оборудована газовой системой, позволяющей подавать в камеру несколько рабочих газов одновременно (Ar , N_2 , C_6H_{12}). При необходимости можно работать как со смесью газов, так и в среде одного газа, а также заменять рабочие газы.

Установка оснащена системой охлаждения, позволяющая охлаждать каждый элемент в отдельности.

Наличие магнетрона на постоянном токе позволяет распылять любые проводящие материалы и наносить оксиды, нитриды или др. керамические материалы при соответствующей подаче реактивных газов. Рабочее давление магнетрона не менее $5 \cdot 10^{-1}$ Па.

При помощи автономного источника ионов с поверхности подложки удаляется тонкий оксидный слой и другие примеси, которые снижают коэффициент сцепления покрытия с основой. При высоких энергиях бомбардирующих частиц ($>500\text{эВ}$) и высоких плотностях тока ($>100\text{ мкА/см}^2$)

АИИ позволяет сформировать на поверхности подложки специальный микрорельеф (при наличии соответствующей маски). В процессе обработки ионным пучком поверхность разогревается до 150...250°C. В процессе нанесения при помощи пучка ионов аргона производится стимулирование растущей плёнки, что позволяет влиять на ее структуру. При подаче в АИИ в качестве рабочего газа смесь аргона и циклогексана, происходит нанесение углеродной алмазоподобной плёнки. Рабочее давление АИИ не более 10^{-1} Па.

Наличие дугового источника позволяет распылять любые проводящие тугоплавкие материалы и наносить оксиды, нитриды или другие керамические материалы при соответствующей подаче реактивных газов. Рабочее давление дугового источника не менее 1 Па.

Изменяя угол наклона подложки и режимы напыления, можно управлять структурой выращиваемых тонких пленок.

На установке реализуются следующие операции технологического маршрута изготовления тонкопленочных покрытий:

1. активация поверхности подложки перед нанесением пленки
2. нанесение тонкопленочного покрытия с ионным стимулированием
3. осаждение пленки под углом к поверхности подложки
4. нанесение многослойного (при поочередной работе источников)
5. или многокомпонентного (при одновременной работе источников) тонкопленочного покрытия.

Операции (1), (2) и (3) предназначены для управления структурой и свойствами покрытия.

На установке наносятся плёнки на образцы различных материалов, в том числе и на синтетические опалы. Нанесен ряд многослойных (5 слоев) пленок следующей структуры: $Ti/C-\alpha-C:H/Ti/C-\alpha-C:H/Ti$, исследована структура этих пленок при помощи атомного силового микроскопа (АСМ) (рис.1), измерены электрические и оптические характеристики.

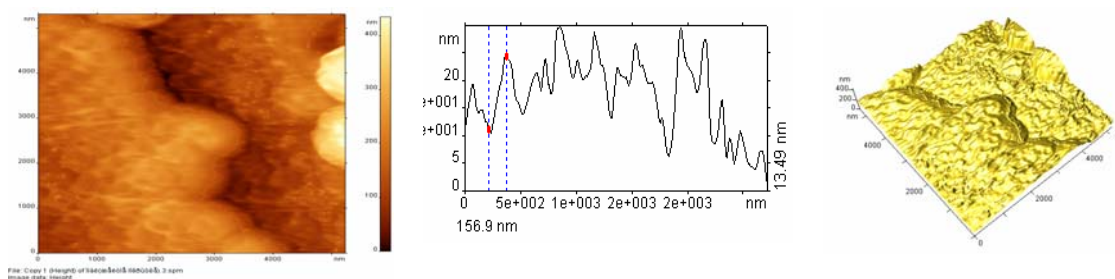


Рис.1. АСМ-изображение поверхности образца опала с пленкой $Ti/\alpha-C:H/Ti/\alpha-C:H/Ti$

ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

М.Н. Кондрашкина, Н.А. Смоланов
МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Большевистская, 68
e-mail: smolanovna@freemail.mrsu.ru

Процесс волочения является одним из главных в производстве жил кабеля. В условиях одновременного действия нормального и касательного давлений происходит износ протягивающих валиков и образование канавки. Это приводит к обрыву жилы и остановки линии в целом.

В работе проведен анализ, получение и испытание материалов триботехнического назначения, обеспечивающих максимальную долговечность изделий. С учетом известных механизмов деформации и разрушение поверхности при трении, особо рассмотрена роль поверхностных, тонких слоев в триботехнике. Проведен анализ методов модификации поверхности с целью повышения износостойкости и снижения коэффициента трения.

Методом конденсации с ионной бомбардировкой (метод КИБ [1,2]) на установке ННВ-6.6И4 были получены покрытия, в том числе и многочисленные, из карбонитрида титана. В качестве подложки были использована лента из стали 12Х18Н10Т, которая после нанесения покрытия устанавливалась на диске, имитирующей вал для волочения проволоки. Толщина ионного покрытия контролировалась оптическими и рентгеновскими методами и составляла от 0.5 до 12 мкм.

Фазовый состав пленки исследовался на рентгеновском дифрактометре, твердость – прибором ПМТ-3М. Процесс исследования изнашивания модифицированной поверхности в условиях сухого трения по схеме «проволока-диск» приводилась на специально разработанной установке, позволяющей осуществлять непрерывное измерение сил трения при нескольких нагрузках.

Скорость вращения диска рассчитывалась с учетом реальной относительной скорости жилы диаметром 0.4-0.2 мм. Полученные результаты обсуждаются с точки зрения образования новой фазы в месте контакта жила-покрытие.

Литература

1. Белый А.В. и др. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоёв. М.: Машиностроение, 1991 – 208 с.
2. И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. Г. Брень и др. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме //УФЖ. 1979, т. 24, № 4, с. 515 – 525.

РАВНОМЕРНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НАНОМЕТРИЧЕСКИХ ТОЛЩИН, ПОЛУЧАЕМЫХ ИСПАРЕНИЕМ ТИТАНА В СРЕДЕ АЗОТА

А.А. Евланов, В.В. Любимов
ТГУ, Тула, пр. Ленина, 92
e-mail: caslix@mail.ru

Введение. В последнее время было обнаружено, что сверхтонкие пленки, нанесенные на металлы, имеют повышенную износостойкость. Формирование в поверхностных слоях конструкционных материалов наноструктур блокирует развитие поверхностных нанопотоков дефектов. Это обеспечивает существенное повышение усталостной и статической прочности, износостойкости материалов. Создание наноструктуры на поверхности сварных соединений повышает их усталостную прочность в 2-3 раза. Важным параметром, определяющим эксплуатационные свойства нанослоев, является их толщина и равномерность.

Целью работы является оценка равномерности формирования ионно-плазменных покрытий (ИПП) нанометрических толщин в системе “Ti - N” на поверхностях стали 12X18H9T, ситалла и поликора на базе экспериментальных исследований.

Подробности экспериментов. Перед формированием ИПП проводилась очистка стальных образцов в среде тлеющего разряда. Исходная шероховатость составляла: стальных образцов - $R_a = 35$ нм (см. рис.1), образцов из поликора - $R_a = 6,4$ нм, образцов из ситалла - $R_a = 2,0$ нм.

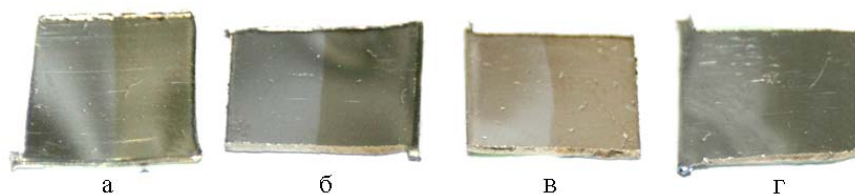


Рис. 1. Образцы с осажденным ИПП: а – №1, б – №2, в – №3, г – №4

Условия проведения экспериментов:

- для получения покрытий использовалось электродуговое испарение катодов из титана в среде азота (см. табл.1);
- стальные образцы №1, №2 подвергались ионной бомбардировке (время травления 3 мин, ток дуги 70 А, отрицательный смещающий потенциал -700 В);
- образцы №1 и №3 располагались на расстоянии 200 мм от поверхности катода, образцы №2 и №4 на расстоянии 300 мм от поверхности катода-испарителя;
- оборудование: установки моделей ВУ-1Б и ВУ-2МБС;
- часть поверхности образцов при формировании покрытия закрывалась

маской из медной фольги с целью получения границы «основа-покрытие».

Таблица 1

Параметры осаждения при проведении экспериментов

Номер образца	Оборудование	Ток дуги I_d , А	Смещающий потенциал U_c , В	Давление в камере P , Па	Время осаждения t ,
1, 2	ВУ-1Б	70	-140	0,02	10
3, 4	ВУ-1Б	70	-140	0,02	20
5	ВУ-2МБС	90	-	0,02	4
6	ВУ-2МБС	90	-	0,02	15

Результаты и обсуждение. Оценка рельефа образцов с покрытиями проводилась с помощью атомно-силового микроскопа. Полученные данные были обработаны при помощи программы Metro Pro (рис. 2). Проведенные исследования показали, что:

1. На поверхности поликора четкой границы раздела «покрытие – основа» из-за недостаточного времени осаждения слоя (4 с) не наблюдалось; в этом случае имела место островковость покрытия. На стальных образцах, подвергшихся ионной бомбардировке перед осаждением покрытия (образцы №1, №2) толщина покрытия составила более 50 нм. Изменение расстояния от поверхности катода-испарителя за принятое время осаждения существенным образом не отразилось на толщине и равномерности формирования покрытия. На образцах №3 и №4 вследствие отсутствия ионной бомбардировки и дополнительной активации поверхности часть покрытия отслоилась, средние высоты неровностей профилей поверхностей частей образцов с покрытием и без него примерно равны. На поверхности ситалла при низкой исходной шероховатости получилась четкая граница «основа-покрытие» и сформировано равномерное покрытие толщиной около 6,5 нм.

Таким образом, при изменении технологических параметров осаждения, в первую очередь времени процесса, с учетом типа подложки можно формировать покрытия заданной толщины при обеспечении высокой равномерности.

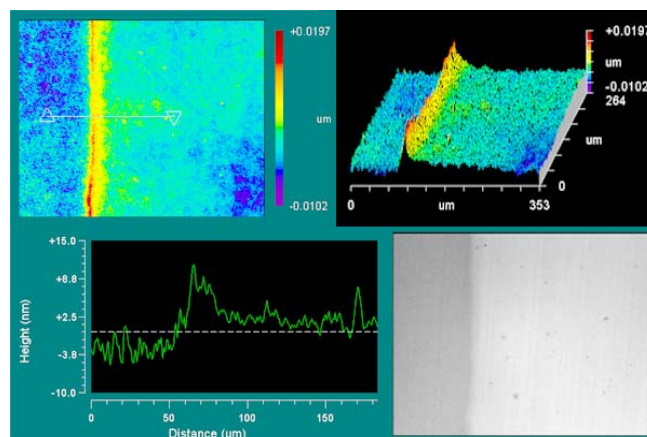


Рис.2. Результаты сканирования образца № 6 с помощью АСМ

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТОДА ГЕРМЕТИЗАЦИИ СВЧ ЭВП ПРИ ГНЕЗДОВОЙ ОТКАЧКИ

А.В. Петров, М.Ю. Кобзев, В.П. Шумарин, А.Н. Балакин
СГТУ, Саратов, Политехническая, 77
e-mail: sstu2005@mail.ru

Заключительным этапом при откачки любого сверхвысокочастотного (СВЧ) электровакуумного прибора (ЭВП) является герметизация. Существующие методы откачки и герметизации имеют ряд недостатков, основными из которых являются: охлаждение приборов перед герметизацией, газовыделение из штенгеля в момент герметизации, ухудшающие остаточное давление в приборе.

В связи с этим был предложен гнездовой способ откачки. Применение данного способа откачки позволяет устранить недостатки раннее существующих способов. Однако его применение потребовало новых методов герметизации приборов, таких как пайка, сварка электронным лучом, диффузионная сварка. Но данные методы имеют также ряд недостатков. Герметизация посредством сварки электронным лучом имеет высокую производительность, но требует создания сложного технологического оборудования. Герметизация ЭВП пайкой твердыми припоями осуществляется при температуре 873 К и выше. В этом случае материалы припоя испаряются в вакуумную полость и там осаждаются на внутренние поверхности, что приводит к резкому ухудшению остаточного вакуума и к изменениям заданных характеристик прибора. Применение диффузионной сварки для герметизации ЭВП позволяет исключить напыление и газовыделение по сравнению с другими методами. Однако известные классические режимы диффузионной сварки различных материалов, не удовлетворяют необходимым температурным и вакуумным условиям герметизации ЭВП. Высокая температура и длительное время изотермической выдержки приводит к ухудшению вакуума.

Исходя из вышесказанного нами предлагается метод диффузионной сварки по клино прессовому способу. Из предложенного и реализованного ряда схем конструкций сварочных швов при герметизации ЭВП диффузионной сваркой: цилиндрическая, плоская, конусная, клиновая, позволяющие использовать сочетание различных пар материалов корпусов приборов, таких как медь, никель, ковар, нержавеющей сталь и т.д., наилучший результат был получен при применении клиновой схемы.

Суть предложенного метода герметизации СВЧ ЭВП заключается в том что клиновая кромка оболочки прибора из твердого металла – стали Х18Н10Т внедряется в заглушку из более мягкого металла – меди МВ. Одним из решающих условий обеспечивающих получение качественного герметизирующего соединения является отсутствие на свариваемых поверхностях загрязнений, окисных пленок и адсорбированных газов достигаемых при $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па. Данное условие достигается в начальный

момент контактирования герметизирующих поверхностей, на вершине клина возникают большие касательные и нормальные напряжения, обеспечивающие дробление окисных пленок и образования очагов схватывания с последующим разрастанием по конусу.

При герметизации малогабаритных СВЧ ЭВП диффузионной сваркой по клиновой схеме была исследована геометрия сварного клина.

Изменение углов α , β , γ и сочетание сварных клиньев позволило определить оптимальные режимы сварки и уменьшить деформацию оболочки приборов до 1...2 мкм не ухудшая параметров сварного шва.

С теоретической и практической точек зрения важно было установить нижнюю границу температур, обеспечивающих высокое качество соединений, герметизируемых путем внедрения стальной кромки прибора в медную заглушку. Для определения технологических режимов герметизации были произведены исследования, по итогам которых было установлено, что для получения качественных соединений медной заглушки и стальной оболочки с герметизирующей кромкой в виде клина с углом при вершине 35° достаточно приложить усилие сварки порядка 20 кН в течении 4-5 с.

Анализ различных конструктивных вариантов герметизируемых кромок и исследование термовакуумных характеристик макетов показали, что метод герметизации диффузионной сваркой по клинопрессовому способу путем внедрения стального клина в медь, позволяет получить вакуумно-плотные термостойкие узлы за 10-30с.

В результате металлографического исследования зоны соединения сталь-медь на оптимальном режиме было установлено, что ширина зоны взаимной диффузии меди стали порядка 5-8 мкм.

Испытания макетов и приборов на термоциклирование, термоудары, герметичность и механическую прочность показали прецизионность и стабильность данного метода герметизации. Сварной шов гарантирует термическую стойкость, механическую прочность и герметичность оболочки СВЧ ЭВП при испытаниях по 2-ой степени жесткости.

Для внедрения данного метода герметизации мощных генераторных ламп (МГЛ) было разработано устройство обеспечивающее механизацию процессов соединения и разъединения приборов с откачным гнездом и автоматизацию процесса герметизации их заглушкой.

ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДЕРЕVOOБРАБОТКЕ

И.Н. Аксанов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин

КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68

e-mail: olambis@rambler.ru

Процесс сушки является одной из самых энергоемких операций в деревообрабатывающей промышленности, значительно увеличивающей себестоимость продукции, поэтому с каждым годом к сушке пиломатериалов предъявляются все более жесткие требования по сокращению энергетических затрат и длительности процесса сушки без ущерба качеству высушиваемого материала. Недостаточное внимание к технике и технологии сушки приводит к значительным убыткам, которые несет производство. Применение вакуумных технологий позволяет сократить продолжительность и использовать пониженные температуры при сушке.

Однако при реализации вакуумных способов возникают существенные трудности подвода тепла в условиях понижения давления. Известные способы подвода тепла в вакууме, такие как ТВЧ- и СВЧ-энергия, являются дорогостоящими и не позволяют достичь равномерной влажности пиломатериала по сечению штабеля. Контактные методы известны своей трудоемкостью процесса и неудовлетворительным качеством, вследствие развития в процессе сушки трех различных зон влагосодержания по сечению пиломатериала. Поэтому наиболее перспективными в области вакуумной сушки древесины являются способы при конвективном теплоподводе. В связи с этим можно выделить метод конвективной сушки древесины при стационарном пониженном давлении, использование которого возможно для широкого спектра пиломатериалов.

Основное конструктивное отличие конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении состоит в том, что сушка происходит в разряженной среде с постоянным теплоподводом конвекцией, из-за чего температура точки кипения воды ниже, чем при атмосферном давлении (например, температура кипения воды при давлении 0,1 атм составляет всего 45,5°C). Это позволяет вести высокоинтенсивный процесс сушки при относительно невысокой температуре среды и при сохранении всех природных свойств материала.

Так, с целью рекомендации рациональных режимов ведения процесса и получения лучшего качества пилопродукции при максимальном сокращении продолжительности процесса сушки и снижении энергозатрат на кафедре "Переработка древесных материалов" была разработана и создана экспериментальная установка конвективной сушки древесины при стационарном пониженном давлении. На рис.1 представлен экспериментальный аппарат с комплексом по его обслуживанию.

Данная сушильная камера представляет собой герметичную цилиндрическую обечайку с крышкой, и предназначена для размещения и сушки древесины различного сортамента.

Внутри камеры расположены: калориферы, вентилятор, экраны, формирующие аэродинамический тракт циркуляции агента сушки. Экраны образуют внутри камеры сегментные зазоры, внутри которых расположены нагревательные элементы.

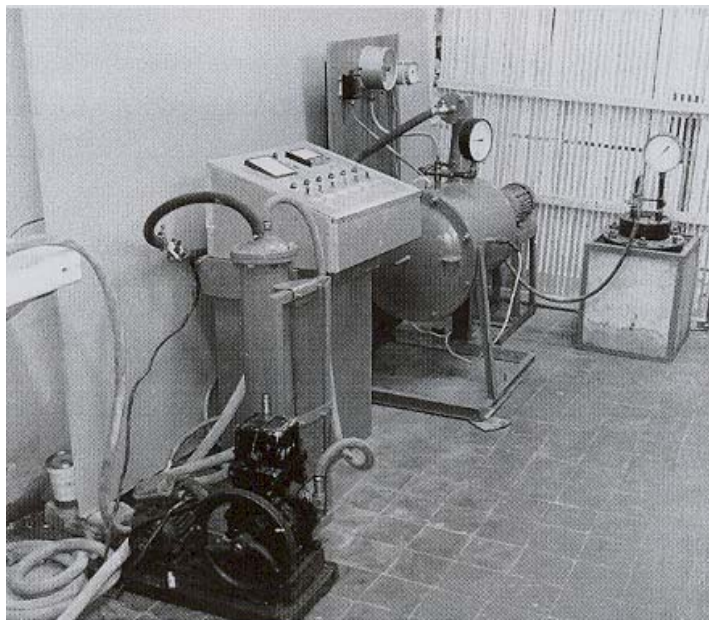


Рис.1. Экспериментальная вакуумная установка для сушки древесины.

В качестве материалов для экспериментальных исследований конвективной сушки при стационарном пониженном давлении были взяты образцы различных пород древесины (сосна, береза, дуб) размерами $25 \times 200 \times 1000$ мм. Сушильный процесс проводился при различных остаточных давлениях: 0,5; 0,7 и 1 атм. В ходе эксперимента параметры процесса (влажность влажного материала, температура сухого и мокрого термометра, давление среды) регистрировались приборами, расположенными на щитке управления.

По полученным результатам экспериментальных исследований предложенного конвективного способа сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении были построены зависимости скорости от различных режимных параметров, из которых следует, что с падением влагосодержания ниже 20% происходит снижение скорости сушки. Поэтому целесообразно к концу процесса сушки постепенно повышать давление среды. Также было выявлено, что нижняя граница диапазона изменения давления 0,5 атм обусловлено резким падением коэффициента теплоотдачи. Верхняя граница диапазона 0,7 атм вызывает увеличение продолжительности процесса сушки из-за падения скорости процесса удаления влаги.

Предложенный метод позволяет снизить температуру среды и, как следствие, повысить качество готовой пилопродукции, и сократить продолжительность процесса сушки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАДИИ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВАКУУМНО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

И.Н. Аксанов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: olambis@rambler.ru

Известным методом удаления влаги из древесины является конвективная сушка пиломатериалов при пониженном давлении. Этот метод позволяет вести процесс сушки с наименьшими энергозатратами и для широкого спектра пиломатериалов. Однако используемые технологические режимы, полученные опытным путем, не позволяют оптимизировать процесс.

После проведения теоретических исследований была предложена математическая модель конвективной сушки древесины при стационарном пониженном давлении.

Процесс сушки начинается с подогрева пиломатериалов включением калориферов и вентилятора и проходит при атмосферном давлении. В период прогрева пиломатериала не должна происходить ее сушка.

При достижении определенного значения температуры внутри пиломатериала начинается стадия вакуумирования. Сушка при постоянно возрастающем вакууме протекает при непрерывной циркуляции сушильного агента через материал. На этой стадии происходит удаление свободной влаги, движение которой внутри материала осуществляется под действием градиентов давления, влажности и температуры.

При нахождении всех пиломатериалов в штабеле в одинаковых условиях уравнение материального баланса по пару для процесса понижения давления записывается в следующем виде

$$\dot{j}_{нов} F_{mat} d\tau - Q_{cn} \rho_n d\tau = V_{св} d\rho_n. \quad (1)$$

В этом уравнении первый член левой части выражает приток пара в парогазовую смесь за счет его испарения с поверхности влажного материала; второй член – отвод пара из аппарата в вакуумную линию; правая часть – изменение парциальной плотности пара в парогазовой смеси в аппарате.

Для газа уравнение материального баланса запишется аналогично выражению (1) с тем отличием, что будет отсутствовать приток газа в парогазовую смесь, то есть

$$-Q_{cn} \rho_g d\tau = V_{св} d\rho_g. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) фигурируют объемные производительности системы удаления пара Q_{cn} и системы удаления газа Q_{cg} . Обычно при сушке понижением давления сушильная камера подключается к вакуумному насосу через конденсатор, который работает как своеобразный насос по пару.

Очевидно, что в этом случае объемная производительность системы удаления пара будет складываться из объемных производительностей

вакуумного насоса и конденсатора

$$Q_{cn} = Q_n + Q_k, \quad (3)$$

а объемная производительность системы удаления газа равна объемной производительности вакуумного насоса

$$Q_{cz} = Q_n. \quad (4)$$

Объемные производительности конденсатора и вакуумного насоса определяются соответственно из выражений [1,2]:

$$Q_k = \frac{S_k K \cdot \Delta}{r \rho_{cp}}, \quad (5)$$

$$Q_n = \frac{V_{cv}}{\tau_1} \cdot \ln \frac{P_{atm}}{P_{oct}}. \quad (6)$$

Дифференциальные уравнения изменения давлений по пару и по газу над пиломатериалами записываются в виде:

$$\frac{dp_n}{d\tau} = \frac{2(s+b)\lambda RT_{cp}}{V_{cv}\mu_n} j_{нов} - p_n \left(\frac{Q_{cn}}{V_{cv}} - \frac{1}{T_{cp}} \frac{dT_{cp}}{d\tau} \right), \quad (7)$$

$$\frac{dp_z}{d\tau} = p_z \left(\frac{1}{T_{cp}} \frac{dT_{cp}}{d\tau} - \frac{Q_{cz}}{V_{cv}} \right). \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение изменения температуры паровой среды представляется как

$$\frac{dT_{cp}}{d\tau} = \left[\frac{\alpha F_{mat} R (T_{mat} - T_{cp})}{c_{cp} V_{cv} (p_n \mu_n + p_z \mu_z)} - \frac{Q_{cn}}{V_{cv}} + \frac{F_{mat} R T_{cp} j_{нов}}{V_{cv} (p_n \mu_n + p_z \mu_z)} + \frac{Q_k}{V_{cv}} \right] T_{cp}.$$

Тепломассоперенос внутри материала описывается уравнениями А.В.Лыкова [3] при соответствующих краевых условиях.

Далее следует стадия сушки пиломатериалов при фиксированном остаточном давлении в аппарате.

Разработанная математическая модель позволяет определять оптимальные технологические параметры для ведения данного процесса с целью получения конечного продукта требуемого качества.

Литература

1. Шумский К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
2. Исаев С.М., Кожин И.А., Кофанов В.И. Теория тепломассообмена. – М.: Высш. шк., 1979. – 495 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

АЭРОДИНАМИКА ВАКУУМНО-КОНВЕКТИВНЫХ КАМЕР ДЛЯ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

А.Р. Савельев, Р.Р. Сафин, С.А. Хайдаров
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: haider1@rambler.ru

Сушка древесины – процесс удаления влаги из древесины путем испарения. Сушка предохраняет древесину от поражения деревоокрашивающими и дереворазрушающими грибами в период ее хранения и транспортировки, предупреждает изменение размеров и формы древесины в процессе изготовления и эксплуатации изделий из нее. Чем более качественно высушены пиломатериалы, тем больше прочность и долговечность готового изделия.

Для деревообрабатывающей промышленности все большее применение находит вакуумная сушка. Такие камеры позволяют сушить пиломатериалы значительно быстрее, так как сушка древесины происходит при более низких температурах и давлении, что обеспечивает равномерное изменение тепло-влажностных характеристик пиломатериала и равномерную его сушку, исключая трещины и порывы древесины. Избежать значительных затрат возможно используя вакуумно-конвективный способ сушки. Большая часть сушильных камер не обеспечивает равномерную циркуляцию агента сушки по объему штабеля пиломатериалов, поэтому древесина просыхает неравномерно, что снижает ее качество. Одним из способов повышения качества конечной продукции является оптимизация аэродинамики сушильной установки. Вопросами выравнивания потока по сечению штабеля занимаются давно, но эти задачи решались чисто эмпирически, не было рациональных методов подбора выравнивающих устройств. Следует отметить, что решение этого вопроса в сушильных аппаратах полностью совпадает с гидравлической задачей о течении газа (жидкости) по каналам с путевым расходом.

Для определения оптимального диаметра отверстий такой решетки, при заданном расходе агента сушки используют известную формулу Сен-Венана-Венцеля [1]

$$d = \sqrt{\frac{4G_{отв}}{\pi\mu} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k-1} \sqrt{\frac{k+1}{2k\rho P_{cm}}}}, \quad (1)$$

где $G_{отв}$ – массовый расход газа в отверстии определяется как

$$G_{отв} = G_{вент} / n, \quad (2)$$

где n – количество отверстий, k – показатель адиабаты.

Общий случай перетекания потока через отверстие в стенке представлен формулой (4)

$$\Delta P = \frac{\rho\omega^2}{2} \left(\xi + \tau + 1 + \lambda \frac{l}{D_e} \right), \quad (3)$$

где ξ - коэффициент смягчения входа в отверстие, зависящий от формы его входной кромки; τ - коэффициент, учитывающий влияние толщины стенки от формы входной кромки отверстия; λ - линейный коэффициент сопротивления трения; определяются по диаграммам [2].

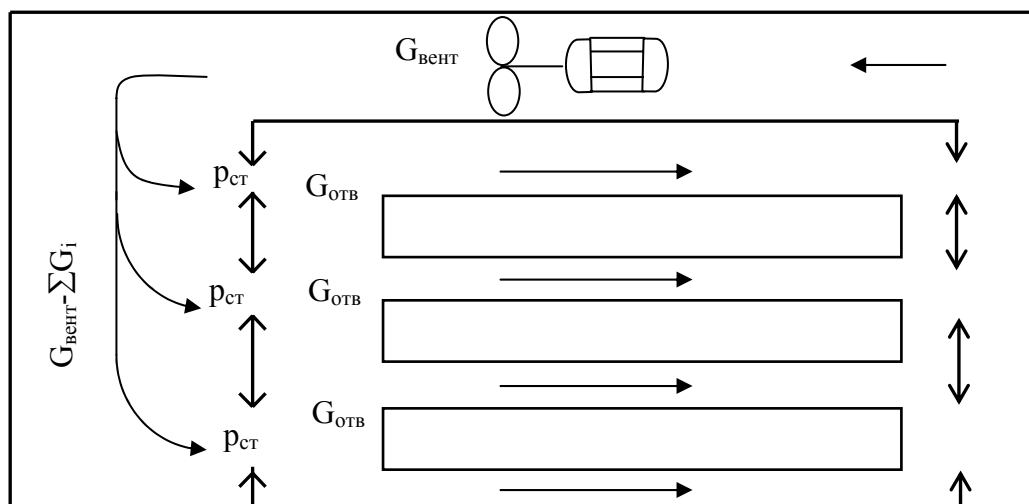


Рис.1. Схема входа потока в камеру сушки (вид сверху)

При рассмотрении движения потока только по длине воздухораспределителя статическое давление понижается из-за потерь на отверстие и потерь по его длине ($\Delta P_{пот} = \Delta P_{отв} + \Delta P_{дл}$). При движении потока вдоль перфорированной решетки уменьшается не только давление (напор), но и скорость потока. Для определения скорости агента сушки на каждом участке перед любым отверстием используют ниже приведенную формулу

$$\omega_{ni} = (G_{вент} - \sum_{i=1}^n G_i) / S, \quad (4)$$

где S – площадь сечения воздухораспределителя.

Полученная математическая модель позволяет оптимизировать расход сушильного агента во всех точках штабеля пиломатериалов, благодаря чему интенсифицируется процесс теплоотдачи и массоотдачи, повысится качество конечной продукции, сократится продолжительность сушки, и, как следствие снизятся теплоэнергозатраты.

Литература

1. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов - М.:Машиностроение, 1983.
2. Луканин В.Н. Теплотехника: Учеб. для втузов – М.:Высш. шк., 2002.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ДАВЛЕНИЯ СРЕДЫ

А.А. Тимергалеев, Р.Р. Сафин, И.А. Валеев
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: sieera@rambler.ru

За последние годы появились исследования, в которых делаются попытки разработать общие принципы построения моделей пиролиза древесины. Эти модели базируются на более детальном представлении о строении органической массы древесины и процессах, происходящих при её термическом разложении. Ввиду своей сложности и громоздкости их трудно использовать для расчёта длительности процесса пиролиза и выхода летучих компонентов.

На основе проведённых исследований предложена математическая модель процесса пиролиза. Для определения времени сушки куска древесного материала, воспользуемся приближённой формулой, предложенной Б. И. Китаевым [1],

$$\tau_c = \frac{Q_w \rho_m \left(\frac{R_m^2}{6\lambda_m} + \frac{R_m}{3\alpha_m} \right)}{T - T_\omega}, \quad (1)$$

После завершения стадии сушки начинается разложение древесины. При этом уравнение, описывающее долю летучих веществ, выделившихся при пиролизе древесины к данному моменту времени τ можно представить в виде [1]

$$\nu_{лет} = 1 - \exp \left(- \int_0^\tau K_0 e^{-\frac{E}{RT}} d\tau \right). \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что второе слагаемое правой части уравнения характеризует изменение массовой доли остатка. Отсюда, массовая доля пиролизуемого материала определяется из выражения

$$\nu_{ост} = \exp \left(- \int_0^\tau K_0 e^{-\frac{E}{RT}} d\tau \right). \quad (3)$$

Изменение массы летучих можно найти из выражения

$$\Delta m_{лет} = \Delta \nu_{лет} \cdot m_{нач}. \quad (4)$$

Значение константы скорости потери массы при пиролизе древесины в зависимости от давления в камере подчиняется по уравнению [2]

$$K_0 = e^{-\frac{E}{RT}} \left(\frac{P}{P_{атм}} \right)^n. \quad (5)$$

Поток парогазовой смеси с поверхности сырья при испарении определяется из выражения

$$j = \frac{\Delta m_{лет}}{\Delta \tau \cdot F} = \frac{\Delta V_{лет} \cdot m_{нач}}{\Delta \tau \cdot F} \quad (6)$$

При нахождении всех частиц древесины в одинаковых условиях уравнение материального баланса для процесса удаления летучих записывается в следующем виде

$$j \cdot F \cdot d\tau - \Pi_{cn} \cdot \rho_{cm} \cdot d\tau + \Pi_m \cdot \rho_{m2} \cdot d\tau = V_{cv} d\rho_{cm} \quad (7)$$

Плотность парогазовой смеси в выражении можно определить по правилу аддитивности, используя уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$\rho_{cm} = \frac{P \cdot M}{RT}, \quad (8)$$

после некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение изменения давления парогазовой смеси над пиролизуемым материалом

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{j \cdot 2(\pi R_M^2 + \pi R_M L) + \Pi_m \cdot \rho_{m2} \cdot R \cdot T - P \cdot \left(\frac{\Pi_{cn}}{V_{cv}} - \frac{dT}{T \cdot d\tau} \right)}{V_{cv} \cdot M} \quad (9)$$

Изменение температуры среды определим из теплового баланса парогазовой фазы

$$\rho_{cm} \cdot c_{cm} \cdot V_{cv} \cdot dT = \alpha \cdot (T_{млов} - T) \cdot F \cdot d\tau - \Pi_{cn} \cdot \rho_{cm} \cdot c_{cm} \cdot T \cdot d\tau + c_{cm} \cdot F \cdot j \cdot T_{млов} \cdot d\tau + (c_{m2} \cdot \rho_{m2} \cdot T_m \cdot \Pi_m) \cdot d\tau \quad (10)$$

Поделив уравнение (10) на $d\tau$ и подставив в него выражение (8) после некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение изменения температуры парогазовой среды

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{\alpha \cdot (T_{млов} - T) \cdot R \cdot F + (c_{m2} \cdot \rho_{m2} \cdot T_m \cdot \Pi_m)}{P \cdot M \cdot c_{cm} \cdot V_{cv}} - \frac{\Pi_{cn}}{V_{cv}} + \frac{R \cdot F \cdot j \cdot T_{млов}}{V_{cv} \cdot P \cdot M} \right] \cdot T \quad (11)$$

После завершения процесса пиролиза древесный уголь необходимо охладить до 50°C .

Таким образом, разработана математическая модель, позволяющая определять количество сухого остатка, выделившихся летучих и продолжительность всего процесса получения угля с учётом времени охлаждения готового продукта в зависимости от давления в аппарате.

Литература

1. Яныгин Ю.Я. Влияние повышенного давления на газификацию древесных отходов в условиях их комплексного энергохимического использования: Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – М.: МЛТИ, 1969.
2. Кислицин А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. – М.: Лесная промышленность, 1990.

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

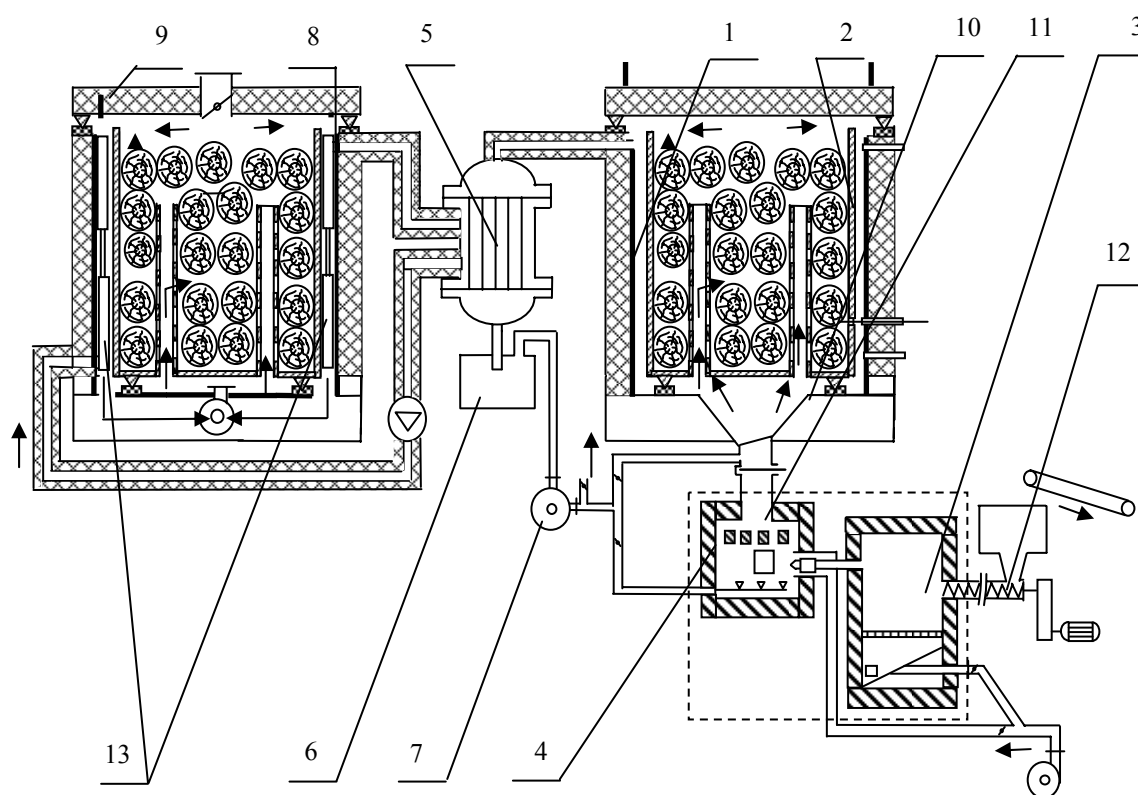
А.Е. Алексеев, Р.Р. Сафин, И.А. Валеев
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: sieera@rambler.ru

При современном уровне техники и технологии более четверти всей заготовленной древесины идёт в отходы. Квалифицированное использование отходов древесного сырья от лесозаготовок, лесопиления и деревообработки является одной из наиболее серьёзных и пока не решённых проблем лесного комплекса. Одним из наиболее рациональных видов переработки древесных отходов является пиролиз. Простота аппаратного оформления, разнообразие получаемых продуктов, лёгкость регулирования системных параметров делают этот метод наиболее перспективным при утилизации древесных отходов на предприятиях и лесосеках. Однако существующие технологии по проведению процесса пиролиза не отвечают техническим требованиям, таким как качество получаемого угля, продолжительность процесса, улов газообразных продуктов и рассчитаны в основном на эксплуатацию на крупных деревообрабатывающих предприятиях.

Установка рис. 1 для пирогаетической переработки древесных отходов предназначена для комплексного использования древесных отходов, обеспечивающая переработку длинномерных, короткомерных, а также неликвидных отходов лесопиления и лесозаготовок в древесный уголь. Установка представляет собой последовательно соединённые модули: углевыжигательную печь, состоящую из камеры пиролиза и контейнера, топку, выполненную в виде последовательно соединённых газогенератора и камеры сгорания, систему конденсации и охлаждения парогазовой смеси, состоящей из конденсатора, сборника конденсата, и газодувки, а также камеру сушки, используемой для подсушки пиролизного сырья. Высокая производительность, малая трудоемкость, малые затраты на эксплуатацию установки, высокое качество продукта, разнообразие перерабатываемых древесных отходов, грамотная организация циклов получения угля обеспечивают низкую себестоимость угля и быструю окупаемость установки. Топочный газ, получаемый из генераторного газа, вырабатываемого в газогенераторе, содержит минимальное количество вредных веществ, и значительно уменьшает выбросы в атмосферу. Использование газогенератора позволяет перерабатывать неликвидное сырьё от деревообработки и лесопиления, а также древесно-угольную мелочь. Использование тепла пиролиза в сушильной камере позволяет сократить время технологического процесса в целом.

Использование тепла пиролиза в смежной сушильной камере способствует уменьшению времени затраченного на сушку, обеспечивается непрерывность процесса (пиролиз-сушка); интенсификация процесса охлаждения с использованием конденсатора позволяет значительно сократить

время затраченное на охлаждение угля, что в значительной степени позволяет продолжительность технологического процесса в целом.



*Рис.1. Установка для пирогазетической переработки древесных отходов.
1-камера пиролиза; 2-контейнер; 3-газогенератор; 4-камера сгорания; 5-конденсатор; 6-сборник конденсата; 7-воздушодувка; 8-камера сушки; 9-теплоизоляция; 10-перфорированные коллекторы; 11-газоход топки; 12-шнековый питатель.*

Топочный газ, получаемый из генераторного газа, вырабатываемого в газогенераторе, содержит минимальное количество вредных веществ, и значительно уменьшает выбросы в атмосферу. Использование газогенератора позволяет перерабатывать неликвидное сырьё от деревообработки и лесопиления, а также древесно-угольную мелочь, неизбежно образующуюся в процессе получения древесного угля.

Все блоки являются передвижными и могут перевозиться железнодорожным и автомобильным транспортом к месту эксплуатации. Таким образом, в данной установке достигается больший процент выхода угля и лучшее качество по сравнению с аналогичными устройствами за счет обеспечения идентичных условий процесса во всех частях камеры и сокращения времени процесса сушки.

МОДИФИКАЦИЯ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТРИЧНЫХ АВТОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДОВ

Э.Ф. Миргалеева, Е.К. Ратникова
БГПУ, Уфа, Октябрьской революции, 3а
e-mail: ratnikova@bspu.ru, zhdanov@bspu.ru

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к вакуумной микроэлектронике, связанный с интенсивным развитием и применением новых технологических процессов, позволивших на их основе создать твердотельные структуры микронных и субмикронных размеров, и тем самым, реализовать многие потенциальные преимущества автоэлектронных катодов как эффективных источников электронов. При этом для создания различных электронных приборов практический интерес представляют катоды, выполненные в виде матрицы достаточно большой площади с высокой плотностью расположения эмиттеров – многоэмиттерные катоды. Потенциальные преимущества многоэмиттерных катодов были очевидны еще задолго до первых попыток их внедрения в технику. Однако применение многоэмиттерных катодов связано с решением ряда серьезных проблем (стабильность тока эмиссии при длительной эксплуатации катода, однородность эмиссии по поверхности катода).

В работах [1-3] ранее была предложена процедура оптимизации фотолитографического способа с применением ионно-плазменной обработки, что позволило создавать матрицы полупроводниковых эмиттеров заданной высоты и конфигурации с большой плотностью расположения эмиттеров. По этому способу изготовлены катоды из Ge и GaAs. В работе проводился сравнительный анализ эмиссионных и эксплуатационных свойств многоэмиттерных катодов, с различной обработкой с целью выявления закономерностей между содержанием примесей на поверхности и появлением неконтролируемых эмиссионных центров, однородности распределения эмиссионных центров. Эмиссионные свойства изучались в статическом режиме в металлических вакуумных установках с непрерывной откачкой и в стеклянных отпаянных приборах. Предварительная обработка поверхности катодов приводила к более равномерному включению в работу эмиттеров. Вольт - амперные характеристики (ВАХ) эмиссионного тока снимались при охлаждении жидким азотом, а также при комнатной температуре. Измерение энергетического распределения автоэлектронов производилось в рабочей камере универсальной сверхвысоковакуумной установки УСУ-4, для эмитирующей области, при двух режимах работы катода: начала участка насыщения и переходного к области размножения носителей тока участка ВАХ. Оже-анализ показал пятнистый характер распределения примеси [3]. Изменение напряженности электрического поля должно приводить к изменению скорости диффузии атомов щелочного металла к поверхности эмиттера из его объема. С этим обстоятельством может быть связана повторяемость картин появления неконтролируемых центров при разных

анодных напряжениях. Если раньше стремились, с целью снижения влияния указанных факторов создавать идеальные вакуумные условия и применять низкие рабочие напряжения то сейчас наблюдается комплексный подход к решению основных проблем, влияющих на стабильность. Повышение стабильности [4-6] полевых электронных катодов становится возможным, например, путем нанесения на их поверхность пленок (алмазоподобных, органического диэлектрика и др.)

Литература

1. Бахтизин Р.З., Ратникова Е.К. Полевая электронная эмиссия из полупроводниковых многоострижных катодов.//Известия АН СССР Сер. физическая.-1988.-т52.-№8-С.1518-1525.
2. Bakhtizin R.Z., Ghots S.S. and Ratnikova E.K. GaAs Field Emitter Arrays.// IEEE Transactions on Electron Devices.- v.38.- №019.USA 10 - 1991.- S. 2398-2400.
3. Ратникова Е.К. Изменение эмиссионных характеристик в процессе тренировки, эксплуатации и хранении автоэлектронных катодов./Сб. научных статей физико-математического факультета. Выпуск 5.-Уфа: Изд-во БГПУ,- 2003 г.- С.72-78.
4. Гиваргизов Е.И. //Автоэмиттеры на основе кремниевых острий, покрытых алмазом// Микроэлектроника, 1997, т.26, N2, с.102-106.
5. Ратникова Е.К., Лачинов А.Н. Модификация эмиссионных характеристик матричных автоэлектронных катодов// Сб.тез.докл.III Международной научно-технической конференции Фундаментальные и прикладные проблемы физики, июнь, 2001.-С.30.
6. Lachinov A.N. et al. Electron emission from polymer films under electric-field influence. / Journal of the SID 12/2, 2004, S3.

РАЗРАБОТКА УСТАНОВОК ЛАБОРАТОРНОГО ТИПА ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ И НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

И.И. Мусабиров, Е.К. Ратникова
БГПУ, Уфа, Октябрьской революции, 3а
e-mail: ratnikova@bspu.ru, zhdanov@bspu.ru

Метод магнетронного распыления материалов широко используется в технологическом оборудовании ионно-плазменной обработки в отраслях, применяющих процессы нанесения, очистки и травления [1]. Разработанные ранее [2,3] приставки для магнетронного распыления тугоплавких материалов лабораторного типа к вакуумному универсальному прибору усовершенствованы, прошли лабораторные испытания и в настоящее время используются в лабораториях электронной микроскопии и микроанализа, а также при проведении лабораторных практикумов по физике твердого тела. В работе описаны магнетронные распылительные приставки, позволяющие в лабораторных условиях осуществлять распыление тугоплавких металлов и сплавов в вакууме для получения высококачественных тонкоплёночных слоёв, а также проводить ионно-плазменное травление на постоянном токе и ВЧ-обработку различных материалов. В данной работе описана магнетронная распылительная установка, позволяющая в лабораторных условиях осуществлять распыление тугоплавких металлов и сплавов в вакууме, для получения высококачественных тонкоплёночных слоёв. Схема магнетронной распылительной установки с одним магнетронным блоком и основные технические характеристики приведены в [3].

Магнетронная распылительная установка из двух магнетронов [4] позволяет производить двухслойное (при необходимости, многослойное) напыление металла на любые типы подложек в едином вакуумном цикле. После откачки вакуумной камеры до давления 10^{-3} Па напускается рабочий газ (аргон) до давления 0.1 Па и возбуждается высокочастотный разряд в верхней части рабочей камеры. Нагрузка генератора контролируется по миллиамперметру, измеряющему анодный ток лампы, и регулируется давлением рабочего газа; разность давлений рабочего газа в рабочем объёме и вакуумной камере обеспечивает локализацию высокочастотного разряда и быстроту очистки подложек. После завершения очистки подложки включается питание магнетрона, и проводятся очистка мишени и обезгаживание внутренней полости рабочей камеры. Поток аргона из рабочей камеры препятствует проникновению остаточных газов. Затем подложкодержатель поворачивается на угол 180° , и происходит напыление плёнки на подложку. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени локализует плазму разряда у поверхности мишени.

Толщина напыляемой плёнки зависит от времени распыления при установленной мощности разряда. Измерение толщины плёнки осуществлялось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47[3]. Скорость роста плёнки меди равна 10нм/мин. Поверхности полученных плёнок исследовались с помощью АСМ и растрового электронного микроскопа (РЭМ). Исследования показали, что напыление происходит практически равномерно по всей поверхности образца. Разница в толщине напыляемого слоя по поверхности площадью 1см² не превышает 20нм. Преимущества данной установки, в сравнение с известными установками, заключаются в простоте и удобстве напыления тонких плёнок тугоплавких материалов. Нанесение тонких плёнок может осуществляться на подложку из материалов с низкой термостойкостью (пластики, полимеры, бумага). В частности, приставка обеспечивает качественное приготовление объектов для исследования в РЭМ высокого разрешения и микроанализаторах. Так как установка для магнетронного напыления имеет съёмную конструкцию, возможно менять положение магнитов и электродов и, тем самым, подбирать необходимые режимы напыления и травления, а так же модифицировать установку под нужные цели, добавляя или убирая элементы установки. Серийное производство данной установки является рентабельным предложением для вакуумной промышленности.

Литература

1. Сырчин В.К.// Электронная промышленность. Вып. 6.- 1995.- С.21.
2. Бахтизин Р.З., Ратникова Е.К., Петраков В.П.// Приборы и техника эксперимента, 1985. -№ 5.-С. 194-196.
3. Ратникова Е.К., Шерстнёв П.В., Шешин Е.П.// Материалы IX научно – технической конференции. Вакуумная наука и техника-М. МИЭМ,-2002- С.370-372.
4. Ратникова Е.К., Шепелев А.В., Смыков А.А.//Материалы 1 Всероссийской студенческой научно—практической конференции. Вакуумная наука и техника — Казань: Издательство КГТУ, —2003г.-С.30

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДА НА ИХ ОСНОВЕ

В.Н. Пашков, В.П. Михайлов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5
e-mail: demi-rus@mail.ru, mikhailov@bmstu.ru

Во многих технологических процессах требуется обеспечение высокой точности позиционирования технологического оборудования и высокого быстродействия привода с постоянной времени порядка 1мс и менее. Так, например, при изготовлении сверхбольших интегральных схем с использованием рентгенолитографии погрешность совмещения пластины и шаблона не должна превышать 0,02 мкм. Механизмами, обеспечивающими сверхточное позиционирование, являются устройства реологического типа: магнитореологические (МР) и электрореологические (ЭР). В отличие от МР-привода, ЭР-привод обеспечивает постоянную времени привода менее 1 мс при сохранении высокой точности позиционирования.

ЭР-жидкость (фирмы Bayer AG Rheobay® VP AI 3565 [1]) представляет собой физико-механическую систему, состоящую из трех фаз. Одна из них (дисперсная) с размером частиц менее 1 мкм распределена в непрерывной фазе (дисперсионной). В качестве дисперсной фазы используются диэлектрические частицы SiO_2 . Третья фаза представляет собой поверхностно-активное вещество (ПАВ), обеспечивающее стабильность всей ЭР-жидкости. Для усиления ЭР-эффекта иногда используют активатор - полярные молекулы, сорбированные на поверхности частиц дисперсной фазы. Точность ЭР-привода в значительной степени зависит от процессов трения реологической жидкости в его элементах. Параметры трения определяются эквивалентной динамической вязкостью $\mu_{\text{экв}}$, пластичностью τ_0 и упругостью E рабочей среды. Для исследования этих параметров разработан стенд, состоящий из бюретки с ЭР-жидкостью, в которой установлены электроды, вакуумного насоса и датчика давления. На электроды подается постоянное напряжение $U=0...2$ кВ, в результате чего частицы ЭРЖ структурируются, и создается так называемая “кластерная мембрана”. Под действием разрежения от вакуумного насоса в ЭРЖ возникают сдвиговые напряжения. При увеличении разрежения наступает момент, при котором происходит разрыв кластерной мембраны и, как следствие, возникает течение жидкости. При этом фиксируются величины разрежения и деформации мембраны. По величине деформации определяется модуль упругости жидкости для каждой величины напряжения на электродах. На этом же стенде исследуются пластичность и вязкость жидкости.

Исследования основного элемента привода – ЭР-дресселя проводились на стенде[2], основными элементами которого являются пневмо- и гидроцилиндры, соединенные между собой. Обе полости гидроцилиндра соединены между собой через ЭР-дрессель. При создании разности давлений в

пневмоцилиндре в гидроцилиндре происходит перетекание ЭРЖ через дроссель из одной полости в другую. При подаче напряжения на дроссель происходит структурирование жидкости в его зазоре, и как следствие, управление движением штока. Измеряются скорость перемещения штока V и разность давлений Δp на рабочем плоском зазоре для каждого устанавливаемого значения управляющего напряжения U . Управляющее напряжение изменяется в диапазоне от 0 до 2 кВ. Затем, по уравнению

$$\mu_{\text{экв}} = \frac{bh^3 \Delta p}{12VF_{\text{пл}}}, \text{ где } F_{\text{пл}} - \text{площадь поршня гидроцилиндра; } h - \text{величина зазора;}$$

b - ширина зазора в направлении, перпендикулярном течению жидкости определяется эквивалентная динамическая вязкость ЭРЖ, график которой представлен на рис. 1.

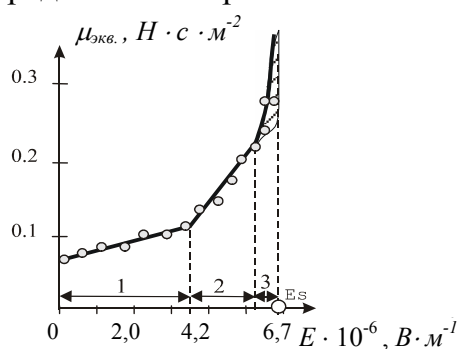


Рис. 1. Зависимость динамической эквивалентной вязкости рабочей среды от напряжённости электрического поля при $\phi_V = 0,20$

На построенной кривой можно выделить два участка, каждый из которых может быть аппроксимирован линейной зависимостью по методу наименьших квадратов. Первый участок расположен в диапазоне изменения управляющего напряжения от 0 до 1,25 кВ, второй от 1,25 до 1,84 кВ. Третий участок зависимости $\mu_{\text{экв.}}(U)$ соответствует неопределённым значениям $\mu_{\text{экв.}}$, которые изменяются во времени от некоторого конечного значения до бесконечности.

Выводы

1. Для управления приводом целесообразно выбрать 2 диапазон изменения управляющего напряжения 1,25 до 1,84 кВ, при котором динамическая вязкость изменяется в пределах $\mu_{\text{экв.}} = 0,1 \dots 0,2 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$. В этом диапазоне наблюдается максимальный ЭР-эффект и однозначная зависимость вязкости от управляющего напряжения.

2. Показано, что использование ЭРЖ позволяет создать привод, обеспечивающий высокую точность позиционирования при одновременном быстродействии с постоянной времени менее 1мс.

Литература

1. <http://www.tu-dresden.de/mw/ilr/lampe/DATENBAN/ERF-UEB/ERF>
2. Механика и физика точных вакуумных механизмов: Моног. : В 2 т. / А. Т. Александрова, Н. С. Вагин, Н. В. Василенко и др. – Под ред. Е. А. Деулина; Моск. гос. техн. ун – т. им. Н. Э. Баумана. М. : НПК «Интелвак»; Вакуумаш, 2002. Т.2. – 152с.

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ В ВАКУУМЕ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОДА ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

В.С. Шерстнев, В.А.Токарев, С.И. Трегубов, Т.Т. Ереско
СибГАУ, Красноярск, пр. им. газ. Красноярский рабочий, 31
e-mail: eresko@wave.krs.ru; nirs@sibsau.ru

Освоение высокочастотных радиодиапазонов систем спутниковой связи обусловлено созданием волноводных трактов миллиметрового диапазона. Они должны обеспечивать малые потери энергии в интервале рабочих температур (210- 370° К), иметь небольшой вес и габариты. В качестве конструкционного материала для трубы волновода выбран углепластик, имеющий высокие удельные характеристики прочности и жесткости, термостойкость до 570 К, низкий температурный коэффициент линейного расширения, эрозионную стойкость и стойкость к агрессивным средам.

К токопроводящему покрытию волновода также предъявляется ряд требования: применение металлов с высокой проводимостью, обеспечивающие минимальные потери, такие как медь, серебро, латунь; отсутствие на токонесущих поверхностях окислов и загрязнений, приводящих к росту диэлектрических потерь; высокое качество обработки токонесущей поверхностей, связанное с получением минимальных активных потерь - наличие шероховатости может привести к удлинению пути СВЧ – токов на поверхности соответственно росту потерь; высокая точность изготовления, обусловленная зависимостью электрических параметров устройств от их геометрических размеров.

Для обеспечения малых потерь внутренние размеры волноводов мм-диапазона должны быть весьма точными. Поэтому в проблеме создания волноводных линий связи исключительное значение имеет разработка соответствующей технологии изготовления волноводов. Данным требованиям соответствуют покрытия, полученные в вакууме.

В настоящее время основным методом получения токопроводящего покрытия на внутренней поверхности волновода является гальванический метод. Данный метод из-за присущих ему недостатков, основной из которых - невозможность получения равномерного покрытия с заданной толщиной, для волноводов малого сечения является неприемлемым.

Произведенный нами обзор патентных и литературных источников выявил технические решения, в которых получение токопроводящего покрытия осуществляется в вакууме /1-3/ и ряд аналогичных. Данные технические решения, не позволяют получить токопроводящее покрытие на внутренней поверхности волновода малого сечения (мене 10 мм), ввиду необходимости расположения внутри элементов технологической оснастки.

Техническое решение, приведенное в /4/, позволяет получить токопроводящее покрытие на внутренней поверхности волновода любого по размерам прямоугольного сечения, но сборка волновода производится

методом диффузионной сварки, что отрицательно влияет на точность геометрических размеров сечения по длине волновода.

На основании проведенного анализа, предлагаем способ изготовления волноводов, заключающийся в нанесении в вакууме токопроводящего слоя на выплавляемую оправку, последующим нанесением углепластика и удалением выплавляемой оправки. Способ позволяет получать токопроводящие покрытия, соответствующие практически всем вышеперечисленным требованиям.

Технологический процесс содержит следующие основные этапы:

1. Обработка поверхности выплавляемой модели.
2. Внутрикамерная обработка поверхности.
3. Нанесение токопроводящего покрытия.
4. Нанесение углепластика.
5. Выплавление модели
6. Окончательный контроль волноводной секции.

Для нанесения токопроводящего покрытия выбираем метод катодного напыления токопроводящего материала (серебро, медь) ввиду низкой температуры процесса и возможности получения равномерного по толщине покрытия. Процесс производим в вакуумной установке «Мир – 3 А».

На настоящий момент времени произведен предварительный эксперимент, который дал удовлетворительные результаты. Технология проведения процесса требует отработки.

На способ получения токопроводящего покрытия в вакууме на внутренней поверхности волновода из углепластика подана заявка на изобретение.

Литература

1. А. с. 457353 СССР, МКИ С 23 С 13/10. Устройство для нанесения покрытий в вакууме. В.С. Макеев, В.И. Титов, Ю.В. Чуриков.
2. А. с. 1839494 СССР, МКИ С 23 С 14/34. Устройство для нанесения покрытий в вакууме на внутренние поверхности цилиндров/ Д.А. Носков.
3. А. с. 1757229 СССР, МКИ С 23 С 14/34. Устройство для нанесения покрытий в вакууме на внутреннюю поверхность цилиндрических подложек/ Институт механики металлополимерных систем АН БССР.
4. А. с. 1424081 СССР, Н 01Р 11/00. Способ изготовления волноводов / Б.Б. Козейкин, Б.Г. Грибов, Л.В. Катраев, А.И. Фролов, А.С. Чеботарев, Г.П. Гузнов, С.Л. Бугров - №4200863/24-09; Заявлено 26.02.87; Оpubл. 15.09.88, Бюл. №34.

МОДИФИКАЦИЯ НЕТКАНЫХ КЛЕЕНЫХ МАТЕРИАЛОВ ШВЕЙНОЙ И ОБУВНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМОЙ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Г.И. Балешева, Р.Р. Галимова, Р.Г. Ибрагимов
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: kashnail@mail.ru

В обувной и швейной промышленности применяются нетканые клееные материалы различной структуры, в том числе с применением химических волокон. Структура нетканых полотен в значительной степени определяются способом производства. Часть нетканых клееных материалов не обладает достаточной жесткостью, упругостью, прочностью, что приводит к снижению эксплуатационных свойств изделия. При их использовании усложняется процесс дублирования, обнаруживаются дефекты, после химчистки пакет теряет свои физико – механические свойства, это отрицательно сказывается на внешнем виде изделия. Одним из наиболее эффективных методов достижения заданных свойств нетканых клееных материалов являются различные способы их модификации.

В настоящее время для модификации материалов различной физической природы все шире применяется плазма высокочастотных разрядов пониженного давления. Эффект воздействия низкотемпературной плазмы определяется химической природой, строением обрабатываемого материала и параметрами плазмы.

В качестве объектов исследования для изготовления обуви выбраны нетканые клееные материалы – картоны марки СЦМ, С, 3М–1, в качестве нетканых клееных материалов для швейных изделий – прокламелин и группа костюмных тканей типа «Сютинг», «Ревьера», «Твил».

Изучение характеристик модифицированных материалов включало исследование их структуры, а также физико – механических свойств. С целью установления влияния высокочастотной плазмы пониженного давления на структуру нетканых клееных материалов использовалась сканирующая электронная микроскопия (SEM) с применением микрозондового рентгеноспектрального анализа (X – ray electron probe analysis) на электронном микроскопе XL –30 ESEM TMP, совмещенном со спектрометром энергетической дисперсии фирмы EDAX.

Для установления закономерностей изменения характеристик свойств материалов применялись лабораторные методы исследования структуры, состава физико - механических свойств материалов и гостированные методы испытаний. Определяли истираемость обувного картона во влажном состоянии, жесткость при статическом изгибе, предел прочности и относительного удлинения обувного картона, устойчивость задников из обувного картона к оседанию. Проводились исследования плотности, намокаемости, изменение линейных размеров, гигроскопичности, влагоотдачи, впитываемости нетканых клееных материалов, применяемых в

обувной промышленности, стандартными методами. Также исследовали жесткость клееных материалов, ориентированное смятие материалов, разрывную нагрузку, изменение линейных размеров после стирки, замочки и влажно – тепловой обработки.

В работе установлено, что в результате комплексного воздействия ВЧ – плазмы пониженного давления в объеме материалов происходит перераспределение связанных электрических зарядов, что приводит на микроскопическом уровне к конформационным изменениям в полимере, в том числе увеличением кристаллической фазы, релаксации механических напряжений, а на макроскопическом уровне – к изменению пористости, выравнивания механических свойств по различным направлениям, изменению физических свойств материалов.

Экспериментально доказано, что результат плазменной обработки зависит как от физического воздействия плазмы, так и от химических процессов, протекающих на межфазной поверхности волокна и клеевой составляющей, что подтверждается тем, что чем больше функциональных групп в клеевой композиции, тем более существенные изменения происходят в созданном новом композиционном материале.

После воздействия потока плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления на рассматриваемые марки картонов СЦМ, С, ЗМ-1 происходит улучшение физико -механических свойств, уменьшение анизотропии механических свойств. Оптимальными параметрами обработки при $P = 26,6 \text{ Па}$ и $G = 0,04 \text{ г/с}$ являются для картона марки СЦМ – $P_p = 1,6 \text{ кВт}$ при $t = 3 \text{ мин}$; С - $P_p = 2,01 \text{ кВт}$ $t = 3 \text{ мин}$; ЗМ-1- - $P_p = 2,01 \text{ кВт}$ $t = 10 \text{ мин}$. При обработке нетканых клееных материалов, применяемых в швейной промышленности в плазме ВЧЕ разряда пониженного давления улучшились такие показатели как разрывная нагрузка на 10–16%, удлинение при разрыве на 10%. Прочность склеивания прокламелина с тканями «Сютинг», «Ревьера», «Твил» повышается от 20% до 40% в зависимости от вида материала.

МАГНЕТРОННОЕ НАНЕСЕНИЕ ОКСИДОВ ТИТАНА В ВАКУУМЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ЭПР

А.Р. Галяутдинов, *Н.Ф. Кашапов
КГУ, Казань, Кремлевская, 18
*КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: toureech@mail.ru

Современная вакуумная техника и технология применяется при нанесении покрытий. В магнетронных распылительных системах, изменяя параметры технологического процесса, такие как: давление и состав рабочего газа, напряжение на катоде, индукцию магнитного поля, можно наносить покрытия с различной плотностью, адгезией, микроструктурой. Эти преимущества позволяют получать оптические покрытия с требуемыми комплексными показателями преломления, что актуально при синтезе интерференционных систем [1].

Тонкие пленки оксида титана TiO_x ($1 < x < 2$) наносились методом магнетронного распыления на подложки из оптического стекла К-8. Мишенью магнетрона служил титан. Подложки очищались обезвоженным этиловым спиртом, помещались в вакуумную камеру. Давление в камере доводилось до 10^{-1} мм рт. ст.. Поверхность, на которую в последствии наносился требуемый слой, обрабатывалась тлеющим разрядом при токе 150 мА и напряжении на электроде 2 кВ в течение 10 мин. Затем вакуумная камера откачивалась до 10^{-5} мм рт. ст.. Подложки нагревались до температуры 200 – 220⁰ С. Для получения оксидов титана TiO_x , в вакуумную камеру вместе с плазмообразующим газом аргоном подавался кислород, в соотношение $Ar:O_2$ как 9:1. При напуске газа давление в камере увеличивалось до $(1-2) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., зажигался аномально тлеющий разряд, и на подложку осаждался слой из оксида титана геометрической толщиной 40-50 нм. Толщина слоя контролировалась системой фотометрического контроля по изменению прозрачности наносимого слоя.

Отсутствие информации о составе и структуре конденсата усложняет процесс моделирования физических свойств тонких пленок. Поэтому был применен метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), как информативный и точный метод исследования состава и структуры вещества.

Таким образом, на подложках из оптического стекла К-8 методом магнетронного распыления получены пленки оксидов титана TiO_x ($1 < x < 2$) толщиной 40-50 нм. Методом ЭПР исследованы полученные пленки TiO_x и обнаружены парамагнитные центры в покрытии и подложке. Для уточнения структуры и состава конденсата необходимо провести систематические исследования парамагнитных центров пленок при низких температурах.

1. Галяутдинов А.Р., Кашапов Н.Ф. Первая российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология» Казань, апрель 8-10, 2003г., с. 29.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА В ПРОЦЕССЕ ВАКУУМНОГО ОСАЖДЕНИЯ ВТСП ПЛЕНОК

М.С. Афанасьев, А.Н. Базлов, В.А. Шахунов, Н.П. Есаулов
МИРЭА, Москва, Проспект Вернадского, 78
e-mail: esaulov@mirea.ru

Получение двухсторонних пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) необходимо для снижения собственных шумов и диссипативных потерь в ряде устройств сверхпроводниковой электроники. Такие устройства представляют интерес для приема, передачи и обработки высокочастотных электромагнитных сигналов.

Поскольку содержание кислорода в ВТСП определяет сверхпроводящие свойства материала, в связи с этим целью настоящих исследований является определение остаточного давления кислорода при выращивании пленок ВТСП состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}(1:2:3)$ и измерение их электрофизических свойств. При этом представляет интерес выращивание пленок ВТСП толщиной более 1 мкм на две стороны плоской подложки.

Известны структурные модификации иттриевой керамики [1], различающиеся концентрацией кислорода: тетрагональная модификация, фаза $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_5(1:2:3)$, не являющаяся сверхпроводящей, при дефиците кислорода, с параметрами решетки $a=b=3.852\text{Å}$, $c=11.804\text{Å}$, и сверхпроводящая орторомбическая модификация фазы 1:2:3 с параметрами решетки $a=3.823\text{Å}$, $b=3.88\text{Å}$, $c=11.68\text{Å}$.

Осаждение ВТСП пленок из мишеней стехиометрического состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, плотностью 97-98% от теоретической, проводилось на бикристаллические подложки галлата неодима методом лазерного испарения по методике представленной в работе [2]. В ходе проводимых экспериментов изменялось остаточное давление кислорода в реакционной камере при осаждении ВТСП пленок от 10^{-2} до 10^2 mBar.

Для осаждения пленок ВТСП использовался твердотельный лазер с длиной волны излучения 0.35 мкм, длительностью импульса 10 нс и плотностью энергии в импульсе порядка порядка 1 Дж/см². При формировании пленок толщиной 1 мкм длительность процесса напыления составляла 40-60 мин. Для реализации требуемой плотности энергии на поверхности мишени проводилась фокусировка лазерного пучка. Оптическая система фокусировки состояла из длиннофокусной кварцевой линзы. Фокусировка пучка регистрировалась с помощью фотобумаги.

Для получения двухсторонних пленок подложка крепилась на вращающемся подложкодержателе. Последний был удален от мишени на расстоянии 3 см. Температура подложки в процессе напыления составляла 800⁰С. По окончании процесса напыления камеру наполняли кислородом и проводили термообработку выращенных пленок при 400⁰С в течение 30 мин. Управление нагревом и поддержание температуры проводилось

автоматически. Откачка системы осуществлялась турбомолекулярным насосом «TURBOVAC 1500».

В выращенных пленках измеряли температурную зависимость ширины перехода и критический ток четырехзондовым методом по стандартной методике.

Фазовый состав и химическая однородность пленок исследовалась методами РФА и ЛРСМА на установках ДРОН-2 и «САМЕВАХ». Толщина и шероховатость пленок измерялась профилометром.

Зависимость параметров выращенных пленок от остаточного давления кислорода приведена в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ВТСП пленок

параметры пленок	h , мкм	ρ , А/см ²	T_c , К	ΔT	примечание
Остаточное давление O_2 , mBar					
10^{-2}	1.4	$2 \cdot 10^4$	78	3	1:2:3 и фаза 2:2:6 15-20% вес, $\Delta h < 10$ нм
10^{-1}	1.2	$3 \cdot 10^5$	80	1.5	фаза 2:2:6 7-10% вес
10^0	0.9	10^6	90	0.8	фаза 1:2:3, $\Delta h \leq 10$ нм
10^1	0.75	10^5	85	1.3	1:2:3 и фаза 1:2:4 5-7% вес, $\Delta h \geq 40$ нм
10^2	0.6	$5 \cdot 10^4$	83	2	1:2:4 10-15% вес

Установлено, что при давлениях кислорода менее 10^{-1} mBar в выращенных пленках содержалась фаза $YBa_2Cu_3O_5$. Присутствуют фаза 2:2:6 и фаза 1:2:3 обедненная кислородом.

При давлениях более 10^1 mBar в пленках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ присутствовала фаза $YBa_2Cu_4O_8$. Наличие которой, по-видимому, связано с ликвацией компонентов в мишени, из-за снижения плотности излучения на 10%.

Разброс толщины пленок с одной и другой стороны подложки составлял менее 2 %.

На основании проведенных исследований показано, что наиболее оптимальной является остаточное давление кислорода на уровне 10^0 mBar, позволяющее выращивать однофазные, зеркально гладкие пленки, состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с плотностью критического тока не ниже 10^6 А/см² и температурой перехода в сверхпроводящее состояние ≤ 90 К.

Литература

1. Н.Б. Брант и др. Свойства высокотемпературных сверхпроводящих керамик. Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости, Свердловск 1978г., стр. 6-7.
2. П.Б. Можаяев Изготовление и свойства эпитаксиальных пленочных гетероструктур на основе высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_x$. Диссертация на соискание ученой степени кф-мн., Москва 1998г., стр.39-45.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ГАЗОВЫДЕЛЕНИИ

П.И. Коновалов, И.П. Меньшиков, Р.А. Невшупа
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, 5
e-mail: p_konov@mail.ru, nevshupa@mail.ru

Производство современных изделий электронной техники состоит из десятков технологических операций, каждая из которых выполняется в высоком или сверхвысоком вакууме и предъявляет жесткие требования к надежности всех механических узлов установки. Отказ оборудования приводит к потере образцов, времени, материальным затратам на ремонтные работы. Одним из современных методов предсказания отказов и снижения ущерба от отказов является диагностика. На сегодняшний день существует много различных систем диагностики различного оборудования, но большинство из них основаны на измерении вибрации или на анализе количества частиц износа в жидкой смазке, а, следовательно, не могут использоваться в вакуумной технике.

На основе последних исследований трибодесорбции МГТУ им. Н.Э. Баумана был предложен принципиально новый метод диагностики вакуумных механизмов.

Реальный контакт двух шероховатых тел происходит по вершинам микронеровностей. Возникающая пластическая деформация вызывает пик газовыделения, описываемый экспоненциальными функциями. Поскольку для точного анализа этого процесса необходимо по изменению давления судить о динамическом газовом потоке, выделяющемся из материала, была разработана аналитическая модель, формально описывающая поток газовыделения при механическом взаимодействии твердых тел. Для этой модели получено решение дифференциального уравнения вакуумной системы в безразмерном виде, что позволяет использовать его для любой вакуумной установки. Было получено уравнение, описывающее давление в вакуумной системе как функцию времени и зависящее от параметров вакуумной системы и параметров потока механически стимулированного газовыделения (МСГ). Впервые был разработан критерий формы пика потока газовыделения, позволяющий изначально задавать требуемую форму потока. Анализ результатов показал, что форма и амплитуда пиков МСГ и давления существенно и нелинейно зависят от постоянной времени вакуумной системы и параметров времени процесса газовыделения. С уменьшением длительности пика амплитуда давления убывает быстрее, чем амплитуда МСГ. Постоянная времени вакуумной системы и время увеличения потока газовыделения достаточно сильно влияют на значение амплитуды давления, в то время как постоянная времени процесса газовыделения – незначительно.

Была получена передаточная функция вакуумной системы. Она позволяет определить область значений параметров процесса газовыделения и вакуумной системы, при которых пик газовыделения будет зафиксирован имеющейся системой измерения как импульс на сигнале давления. Зная область значений длительности пиков газовыделения, можно оценить размеры микронеровностей, по которым проходил контакт двух шероховатых тел.

В ходе экспериментальных исследований показано, что разработанная модель с достаточной точностью описывает поведение давления (погрешность не превышает 30%).

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИРТ-ЭФИРНОЙ СМЕСИ В АЗОТНОКИСЛОМ ЭФИРЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.Р. Даминов, А.А. Чумагин, Н.А. Зюзин, Р.А. Назипов
КГУ, Казань, Кремлевская, 18
e-mail: rusnazipov@hitv.ru

Определение количества адсорбированных летучих компонентов пористых материалов, является одной из важных проблем химической технологии.

Для решения данной проблемы применяются различные физико-химические методы и наиболее важный из них является масс-спектрометрический метод, вследствие того, что анализируется фундаментальная характеристика вещества – масса молекулы.

Использование масс-спектрометрического метода в химической технологии идет как по линии контроля и автоматического регулирования технологических процессов, так и по линии внедрения в практику промышленных лабораторий экспресс-метода с использованием вакуумной техники.

Этот метод был применен для качественного и количественного определения этилового спирта, диэтилового эфира и воды в азотнокислом эфире целлюлозы – нитроклетчатке. Для разработки методики определения был использован серийный масс-спектрометр МИ-1305 статического типа, предназначенный для анализа изотопного состава газов, жидкостей и твердых веществ в диапазоне массовых чисел от 1 до 400. Безмаслянная вакуумная система прибора выполнена на базе высоковакуумных ртутных насосов с азотным ловушками, обеспечивающих вакуум до 10^{-7} мм. рт. ст. в источнике ионов и камере анализатора масс-спектрометра.

Нами была разработана и изготовлена прогреваемая высоковакуумная установка и система напуска на базе высоковакуумного ртутного насоса для масс-спектрометрирования газообразных продуктов термо- и механодеструкции полимеров в условиях различного вакуума. Установка включает в себя термодеструктор и вакуумную вибромельницу (рис.1).

Получены и изучены масс-спектры воды, этилового спирта, спирт-эфирной смеси (в соотношении 1:1) (рис. 2), снятые при параметрах прибора: ускоряющее напряжение 4 кВ, ионизирующее 50 Вольт, ток эмиссии 1,5 мА, давление напуска 5×10^{-7} мм. рт. ст.

Масс-спектры воды характеризуются линиями с массовыми числами 18, 17, 16. Исследования показали, что количественное определение воды в образцах затруднено из-за большой сорбции ее на стенках системы напуска. Величины ионных токов в этом случае не пропорциональны содержанию воды в исследуемых образцах нитроклетчатки.

Из масс-спектрограмм, полученных при излучении градуировочных смесей, видно, что характеристическими пиками для этилового спирта

является 46, а для диэтилового эфира 60 и 74. Эти линии индивидуальны, (специфичны) и не перекрываются как пиками компонент смеси, так и фоновными линиями системы напуска и масс-спектрометра.

Литературные данные и наши исследования показали, что набор полученных газообразных продуктов при механической и термическом разложении совпадают. Градуировка в том и другом случае производится по образцам с различным содержанием спирт-эфирной смеси, которое определяется химическим анализом (с точностью до 0,02%). Количество градуировочных образцов берется из расчета диапазона измеряемых концентраций спирта и диэтилового эфира в образцах. По амплитудам массовых чисел 74, 60 и 46 строится градуировочный график зависимости амплитуды ионного тока от количественного содержания спирта и эфира в анализируемом продукте. Воспроизводимость результатов анализа в определении концентрации исследуемых компонентов соответствует классу прибора ($\pm 2,5$) от измеряемой величины. Время, затрачиваемое на масс-спектрометрический анализ, не превышает 30 минут.

Таким образом, разработанная высоковакуумная система напуска в комплексе с масс-спектрометром может быть использована для изучения структуры различных органических соединений, а так же для изучения термодеструкции полимеров (определение энергии активации, потенциала ионизации, набора продуктов при разложении и т.п.).

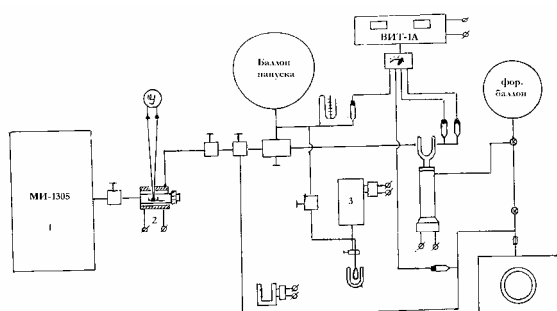


Рис.1 Схема системы напуска с термодеструктором и вибромельницей. 1 – масс-спектрометр, 2 – термодеструктор, 3 – вибромельница

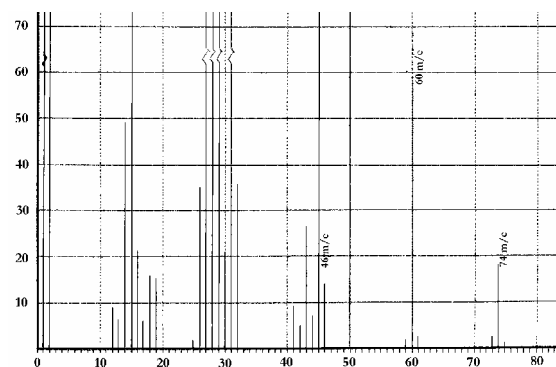


Рис.2 Масс-спектр смеси спирта и эфира (1:1)

Литература

1. Неницеску К.Д. Органическая химия. М.: Из-во И.Л. 1963. т11. 400с.
2. Успехи масс-спектрометрии. Под ред. Уолдрена. М.: Из-во И.Л.1963. 510с.

МОДЕЛИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА “СНЕМСАД” ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАТОРА

Л.А. Автономова, А.И. Шихобалова, Д.И. Сагдеев
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

Развитие и совершенствование методов и средств современной информатики позволило ей уверенно войти в среду образования и научных исследований. Диапазон использования компьютеров в учебно-воспитательном процессе весьма велик - от тестирования студентов [1], учёта их личностных особенностей до специализированных моделирующих программ.

Создание учебного курса “Вакуумные технологии” потребовало обеспечения соответствующего лабораторного практикума по проектированию вакуумного оборудования в области низких давлений. Область низких давлений, от атмосферного до 13,3 Па, позволяет экономически выгодно использовать дешевые теплоносители и хладагенты – водяной пар и воду.

Одним из наиболее актуальных направлений развития передовых технологий обучения в образовании является активное внедрение специализированных компьютерных моделирующих программ, одной из которых является моделирующая программа “СНЕМСАД”. Программа “СНЕМСАД” (версия 5.2) представляет собой инструментальные средства моделирования химико-технологических процессов для решения задач исследования и проектирования химико-технологических систем, в том числе отдельных аппаратов [2].

Лабораторная работа по моделированию и расчету вакуумного конденсатора позволяет получить полную картину происходящего в данном аппарате. Наличие в паре небольших количеств неконденсирующихся газов приводит к значительному снижению коэффициента теплоотдачи [3].

Для моделирования и проектирования используются модули (Heat Exchanger) и разделитель газового и жидкостного потоков (Flash). Газовый поток неконденсирующихся газов (воздух) откачивается вакуумным насосом.

Программа производит расчет конденсации в трубном пространстве для вертикальных и горизонтальных конденсаторов, конденсации в межтрубном пространстве для вертикальных и горизонтальных конденсаторов, а также расчет дефлегматоров в случае конденсации внутри вертикальных труб. Для трубного и межтрубного пространства порядок расчета одинаков, поскольку в обоих случаях выделяется 10 расчетных зон [4].

Для учета присутствия неконденсирующихся паров и газов и влияния значительного перепада температур между потоками на входе и выходе из аппарата используется метод, аналогичный предложенному Силвером (Silver) и Беллом и Хали (Bell&Khaly). Для каждого шага по кривой конденсации

рассчитывается фактор сопротивления, учитывающий суммарное воздействие значительной разности температур и присутствия неконденсирующихся паров и газов.

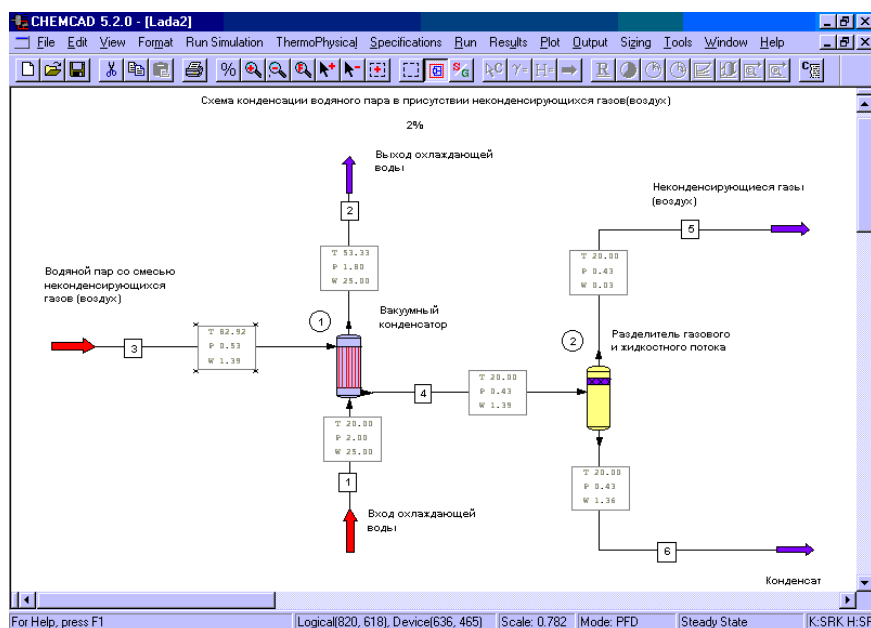


Рис.1. Технологическая схема вакуумного конденсатора

Весьма обычным случаем является конденсация паров в присутствии небольших количеств воздуха. Для аппаратов такого типа механизм воздействия факторов сопротивления может быть показан графически. Для нескольких начальных расчетных зон конденсация происходит практически при одной и той же температуре, поскольку в системе присутствует лишь небольшое количество воздуха.

Литература

1. Сагдеев Д.И., Фомина М.Г., Хубатхузин А.А., Лонцаков О.А., Бурмистров А.В., Поливанов М.А., Аляев В.А., Гумеров Ф.М. Организация компьютерного тестирования в Технологическом университете. Proc. IEEE International Conf. on Advanced Learning Technologies, 9-12 September, 2002, Kazan, Tatarstan, Russia, p.112-115.
2. Исследование и проектирование химико-технологических процессов с применением моделирующей программы ChemCad: Учебное пособие / Каз. гос. технол.ун-т; Сост.: Н.Н. Зиятдинов, В.М. Емельянов, Л.А. Смирнова, Т.В. Лаптева. Казань, 2001. – 84 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. ССТЕРМ (3.0). Руководство пользователя. М.: Компьютерный центр “Хем-Кад” РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1994.

УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ОТРАЖАТЕЛИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ФАР

А.П. Ляпин, В.А. Глинкин
КГТУ, Казань, ул. К.Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

Для нанесения покрытия на отражатели автомобильных фар используются как установки периодического действия с термическим испарением алюминия, так и установки непрерывного действия с использованием магнетронного распыления. Экономическая эффективность последних не велика в связи с их значительно более высокой стоимостью, а также применением в установках периодического действия компьютерного управления. Это одна из немногих сфер, сегодня, где термическое испарение не потеряло своей актуальности.

В отечественной автомобильной промышленности для нанесения покрытия на отражатели в основном используются старые зарубежные установки периодического действия. Имеется также несколько отечественных установок фирмы «Эватон» г. Москва.

В связи с этим, а также в связи с высокой стоимостью зарубежного оборудования, возникла потребность в изготовлении отечественного оборудования такого типа. Кроме того, имеющееся оборудование перестаёт удовлетворять современным Европейским требованиям к качеству автомобильных отражателей.

Проведён анализ технологии и оборудования, применяемых в мире для нанесения покрытия на автомобильные отражатели.

Для автомобильных фар используются зеркальные покрытия, наносимые на переднюю поверхность отражателей. Сегодня они обычно изготавливаются из пластмасс и отливаются под давлением, это термопласты (типа АБС и Поликарбоната) или термореактивные пластмассы (фенольные, алкидные и акриловые).

Строение наносимого на заготовку покрытия соответствует системе лак – металл – лак. Первый лаковый слой обеспечивает глянец поверхности. Второй слой лака является защитным, предотвращающим внешнее разрушающее воздействие на металлический отражающий слой. В качестве металла для отражающего слоя в автомобильных фарах, используется алюминий. В качестве защитного лакового слоя используются, в подавляющем большинстве случаев, кремний органические плёнки, осаждаемые методом плазменной полимеризации в едином цикле с нанесением отражающего слоя.

Метод плазменной полимеризации нашел широкое применение сегодня, благодаря возможности нанесения покрытий в изолированной вакуумной среде и, как следствие, отсутствию вредного воздействия на окружающую среду и людей.

Выбрана система покрытия с использованием грунтового и защитного слоёв, наносимых плазменной полимеризацией. Структура наносимого покрытия показана на рисунке 1.



Рис. 1

Разработанная установка периодического действия, с термическим методом распыления алюминия. Для нанесения кремнийорганических слоёв используется ВЧ тлеющий разряд с частотой 13,56 МГц. Работа установки управляется контроллером, изменение параметров и визуализация осуществляется с помощью компьютера и монитора.

Установка разработана на базе камеры Ду 1600. Вакуумная система состоит из четырёх вакуумных агрегатов АДМ-400, насоса ДВН-500 и двух форвакуумных насосов АВЗ-125.

Для крепления изделий используется барабан с планетарным вращением. На барабане размещается восемь планет.

Общее время цикла 40-50 минут. За один цикл происходит нанесения покрытия, в среднем, на 300 отражателей. Общая последовательность цикла:

- загрузка барабана с изделиями в камеру,
- откачка,
- обработка в тлеющем разряде,
- нанесение грунтового кремнийорганического слоя,
- нанесение отражающего слоя алюминия,
- нанесение защитного кремнийорганического слоя,
- выгрузка барабана с покрытыми изделиями.

Представлено обоснование выбранной технологии и конструкции установки. Материалы представлены в виде схем и фотографий.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫПАРИВАНИЯ ПОД ВАКУУМОМ

Р.Р. Шакиров, С.А. Бурцев, Р.Б. Ханнанов
КГТУ, Казань, К. Маркса, 68
e-mail: vacuum@kstu.ru

В настоящее время широкое распространение получили процессы выпаривания проводимые под вакуумом. Эти процессы находят широкое применение в пищевой промышленности: производство сахара, пищевых концентратов и т.д. С целью интенсификации производства необходимо детальное изучение закономерностей проводимых процессов (выпаривания, кристаллизации). Определение параметров процесса на промышленных установках требует значительных материальных затрат. Гораздо целесообразнее для таких целей использовать малогабаритные лабораторные установки.

В связи с вышеизложенным была разработана и создана учебно-экспериментальная установка, позволяющая проводить исследование процесса выпаривания различных водных растворов.

Установка состоит из вакуумной камеры, откачной системы, системы нагрева и приборов определения температуры и давления.

Вакуумная камера выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и представляет собой цилиндр диаметром 640 мм и высотой 370 мм, в верхней части имеется съемная крышка оснащенная механическим приводом. На боковых поверхностях камеры имеются два смотровых окна позволяющих вести визуальный контроль за процессом. Внутри камеры находится емкость для исследуемого раствора под которой расположен нагревательный элемент, внутри емкости установлены датчики температуры.

Откачная система состоит из двухроторного вакуумного насоса ДВН-50 и водокольцевого насоса ВВН-1,5. Применение этих безмасляных насосов позволяет исключить обратный поток паров масла в откачиваемой камере. На днище камеры установлен вакуумный клапан ВРП2-20, служащий для напуска атмосферного воздуха в камеру перед ее открытием. Для измерения давления в рабочей камере, используется передвижной блок оптических манометров ПБОМ. Расход измеряется с помощью передвижной стойки ротаметров. Для измерения температуры используются хромель-копелевые термопары совместно с универсальным милливольтметром В7-21А. Вакуумная схема разработанного стенда представлена на рис.1.

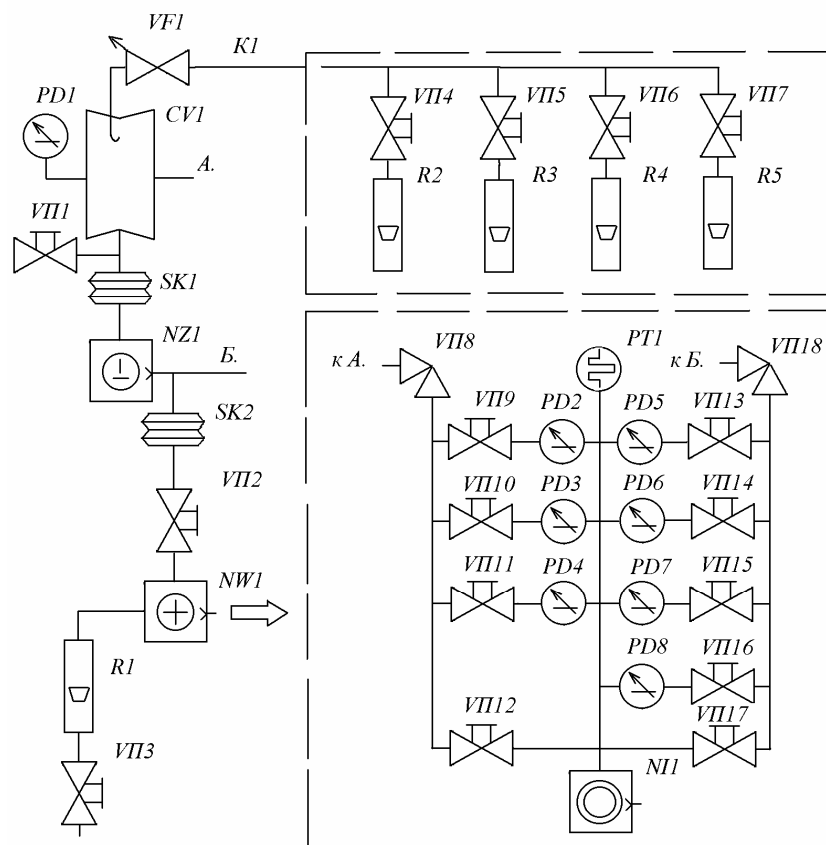


Рис.1. Вакуумная схема лабораторного стенда.

Для определения пригодности стенда для исследования параметров откачки паров было проведено экспериментальное исследование давления насыщения воды, его результаты были обработаны и сравнены со справочными данными. В работе, для определения давления насыщения паров воды использовался метод точек кипения, отличающийся наибольшей простотой, и не требующий наличия сложной техники. Метод точек кипения основан на закипании жидкости, когда давление насыщенного пара жидкости становится равным внешнему давлению. Существуют два варианта этого метода. В первом – непрерывно меняется внешнее давление при постоянной температуре, во втором- непрерывно меняется температура при постоянном давлении, в обоих случаях регистрируется момент закипания.

ТЕРМО-ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В.Ф. Мадякин, В.А. Алексеев, С.И. Поникаров
КГТУ, Казань, К.Маркса, 68
e-mail: mahp_kstu@mail.ru

В настоящее время для внедрения в промышленность предлагается принципиально новый способ интенсификации внешнего и внутреннего тепло- и массообмена в различных материалах для использования при переработке промышленных материалов, а также продуктов питания. Этот способ основан на термо-вакуум-импульсном (ТВИ) воздействии на материал и позволяет в неравновесных термодинамических условиях обеспечить интенсификацию разнообразных технологических процессов в 5 и более раз, значительно повышая их КПД. В отличие от других технологических процессов, только при ТВИ воздействии на материал в рабочей камере происходит одновременное изменение всех трех термодинамических параметров (давления, температуры, объема).

На рис.1 и 2 представлены принципиальная технологическая и модельная схемы исследуемого процесса. В рабочую камеру 1 загружается обрабатываемый продукт – 2. Перед этим в ресивере 5 создается и поддерживается с помощью вакуум-насоса 7 заданное разрежение – около 10 мм. рт. ст. Затем рабочая камера 1 с помощью электромагнитного клапана 4 импульсно соединяется с ресивером 5. В рабочей камере происходит резкое понижение давления, газообразная среда из рабочей камеры перетекает в ресивер и давление выравнивается. Содержащиеся в сырье вода и жидкие растворители переходят частично в газообразную форму в соответствии со своими свойствами и получившимся давлением. Происходящее явление, по сути, напоминает физический взрыв.

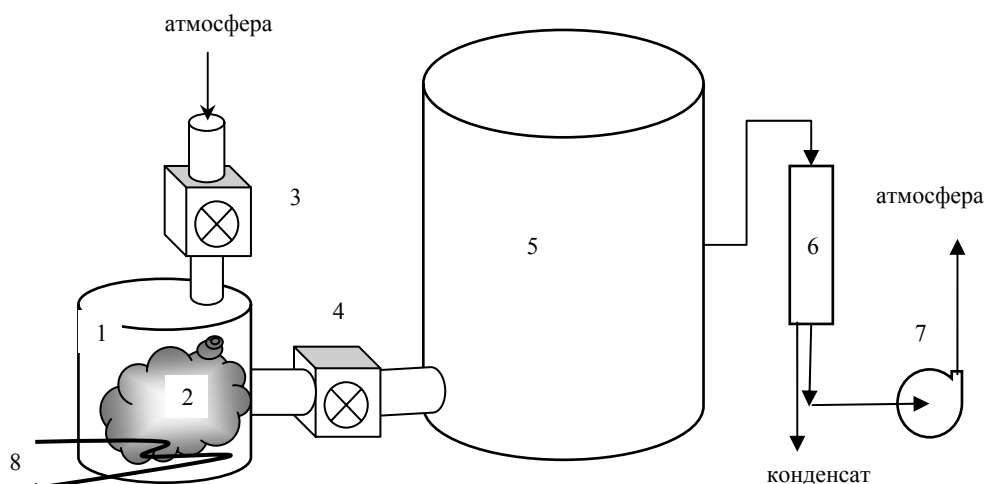


Рис.1 Принципиальная технологическая схема.

1 - рабочая камера; 2 - сырье; 3, 4 – клапаны; 5 - ресивер; 6 - холодильник-конденсатор; 7 - вакуум-насос; 8 – подогреватель

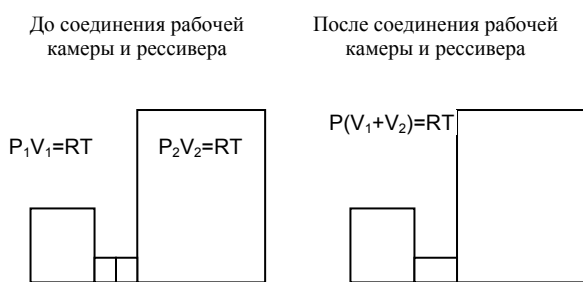


Рис. 2 Состояние системы ресивер – рабочая камера

Очевидно, процесс достижения равновесного давления и температуры не мгновенный, так как при импульсном изменении давления будут происходить следующие процессы:

- Истечение среды из рабочей камеры в ресивер.
- Испарение или вскипание растворителей в сырье.
- Дегазация продукта.

• При импульсном воздействии вакуума на сырье оно подвергается различного рода механическим воздействиям от расширяющихся газов и вскипающих или испаряющихся жидкостей находящихся в слое продукта.

Если процесс достижения равновесия длительный, то, возможно осуществлять цикловое вакуум-импульсное воздействие на продукт.

Проведенными научно-исследовательскими работами по термодинамике, кинетике и физике процесса ТВИ воздействия на различные материалы доказана принципиальная возможность интенсификации более 20 различных технологических операций и прежде всего: сушки, отжима, десорбции, сорбции, смачивания, пропитки, экстрагирования, фильтрации, кристаллизации, активации химических реагентов и др.

Перечисленные технологические операции являются базовой основой производственных процессов во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства, в том числе пищевой, фармацевтической, химической, деревообрабатывающей, электротехнической, стройматериалов и т.д. Установлено также, что по интенсификации технологических процессов, обеспечению высокого качества сухих продуктов питания и промышленных изделий, а в особенности высокими экономическими показателями ТВИ-технологии не имеют аналогов, как в отечественной промышленности, так и за рубежом.

ТВИ-технологии являются одним из прогрессивных направлений технологий XXI века и имеют надежные перспективы активного практического использования на ближайшие 15-20 лет. На их основе планируется создание для ведущих отраслей промышленности новых интенсивных, маломодульных технологий по переработке и получению различных материалов и продуктов питания с улучшенными характеристиками и за меньшее время. По критерию «стоимость - эффективность» ТВИ-технологии относятся к базовым энерго-сберегающим технологиям нового поколения, которые, прежде всего, должны использовать возрождаемый промышленный потенциал страны.

Следует отметить, что переработка сельхозпродуктов с использованием ТВИ-технологии имеет стратегическое значение, так как эти технологии позволяют при небольших финансовых затратах и за короткое время создать значительные запасы высококачественных продуктов питания с длительным сроком хранения, что надежно обеспечит продовольственную безопасность промышленных и научных центров, отдаленных регионов и страны в целом.

Авторский указатель

Аверченкова Т.А.	20	Есаулов Н.П.	109
Автономова Л.А.	115	Залесов А.Н.	58, 81
Акимов И.Ю.	17	Зюзин Н.А.	113
Аксанов И.Н.	88, 90	Ибрагимов Р.Г.	106
Алексеев А.Е.	96	Ибраев А.М.	78
Алексеев В.А.	121	Ивченко Е.А.	49
Андреева Д.А.	76	Караблинов Д.Г.	70
Антипова Е.В.	72	Кашапов Н.Ф.	108
Асташина М.А.	24	Кобзев М.Ю.	86
Афанасьев М.С.	109	Коледов С.Н.	41
Базлов А.Н.	109	Комкова А.А.	54
Балакин А.Н.	86	Кондрашкина М.Н.	83
Балешева Г.И.	106	Коновалов П.И.	22, 111
Барышников А.С.	43	Куликова Т.В.	26
Белокрылов И.В.	34	Львов Б.Г.	38
Бикмуллин А.Р.	72	Любимов В.В.	84
Бикулов Э.Р.	60	Ляпин А.П.	117
Ботин А.В.	19	Мадыкин В.Ф.	121
Бронштейн М.Д.	39, 52, 56, 60, 62, 64	Меньшиков И.П.	22, 111
Булатова Т.Г.	47	Миргалеева Э.Ф.	98
Бурмистров А.В.	28, 39, 45, 52, 56, 60, 62, 70	Михайлов В.П.	17, 102
Бурцев С.А.	76, 119	Моисеев К.М.	81
Валеев А.Р.	28	Мусабилов И.И.	100
Валеев И.А.	94, 96	Мустафин Т.Н.	78
Васильев Ю.К.	24, 32	Мутыгуллина А.Р.	47
Васильева Т.С.	32	Назипов Р.А.	113
Ветров В.А.	38	Невшупа Р.А.	22, 36, 111
Визгалов С.В.	78	Нестеров С.Б.	7, 24, 32, 43
Войтеховский А.А.	38	Никулин Н.К.	10, 26, 50
Воронкин Е.В.	30	Новикова Н.А.	47
Гаврилов А.В.	76	Пальцев А.В.	45
Гайдаев В.В.	19	Панфилов Ю.В.	58, 81
Галимова Р.Р.	106	Панфилович К.Б.	64
Галяутдинов А.Р.	108	Панькин Н.А.	19, 20
Гарифуллин А.Д.	66, 68	Пашков В.Н.	102
Глинкин В.А.	117	Переведенцев Н.М.	39, 60, 62
Горячева Е.А.	50	Петров А.В.	86
Даминов А.Р.	113	Петров В.С.	30, 54
Даутов Р.М.	45	Поникаров С.И.	121
Деулин Е.А.	49	Ратникова Е.К.	98, 100
Демихов К.Е.	11	Русанов А.В.	36
Добрынина М.В.	64	Сабилов И.А.	70
Евланов А.А.	84	Савельев А.Р.	92
Ереско Т.Т.	104	Сагдеев Д.И.	41, 66, 68, 72, 115
		Сайфетдинов А.Г.	74

Сайфетдинов А.Г.	74
Саликеев С.И.	28, 39, 45
Сафин Р.Р.	88, 90, 92, 94, 96
Смоланов Н.А.	19, 20, 83
Тахавутдинов Р.Г.	66
Тимергалеев А.А.	94
Ткаченко В.А.	34
Токарев В.А.	104
Трегубов С.И.	104
Тютина А.В.	41
Хайдаров С.А.	92
Ханнанов Р.Б.	119
Хасаншин Р.Р.	88, 90
Хубатхузин А.А.	68
Хуснутдинов И.Х.	52
Чумагин А.А.	113
Шагиева Н.А.	68
Шакиров Р.Р.	119
Шарапов И.И.	74
Шарафиев Л.З.	56
Шахунов В.А.	109
Шерстнев В.С.	104
Шихобалова А.И.	117
Шумарин В.П.	86

(Содержание и качество статей – прерогатива авторов)

Верстка С.И. Саликеев