

# Вакуумная техника

Издание третье, переработанное и дополненное

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Электронное машиностроение» направления подготовки «Электроника и микроэлектроника»

Москва «Высшая школа» 2007

УДК 621.51/.54 ББК 31.77 Р 64

Рецензенты:

д.т.н., проф. А.Т. Александрова (Московский государственный институт электроники и математики);

д.т.н., проф. А.Д. Сушков (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

## Розанов Л.Н.

Вакуумная техника: учебник для вузов / Л.Н. Розанов. 3-е издание, перераб. и доп. – М.: Высшая шк., 2007. – 391 с.

ISBN 978-5-06-005521-4

Рассмотрены свойства газов при низких давлениях и физико-химические процессы на поверхности твердого тела, течение газов при низких давлениях; методы объемной, ионной и сорбционной откачки, принципы действия различных типов вакуумных насосов, измерение общих и парциальных давлений, течеискание, типовые вакуумные схемы, расчет и проектирование вакуумных систем, конструкции элементов.

## Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
В.1. Понятие о вакууме	5
В.2. История развития вакуумной техники	7
В.3. Применение вакуумной техники	9
Глава 1. Свойства газов при низких давлениях	13
1.1. Давление газа	13
1.2. Распределение молекул газов по скоростям	18
1.3. Средняя длина свободного пути	21
1.4. Взаимодействие молекул газа с поверхностью	25
1.5. Время адсорбции	26
1.6. Давление насыщенных паров	32
1.7. Степень покрытия поверхности молекулами газа	35
1.8. Растворение газов в твердых телах	42
1.9. Электрические явления в вакууме	45
1.10. Контрольные вопросы	51
1.11. Задачи	52
Глава 2 Теоретические основы	54
2.1. Степени вакуума	54
2.2. Явления переноса	56
2.3. Температурное равновесие давлений	63
2.4. Моделирование течения газа методами механики сплошной среды	65
2.5. Моделирование течения газа методом интегральных	
угловых коэффициентов	75
2.6. Моделирование течения газа методом статистических испытаний	80

2.7. Газовыделение	86
2.8. Основное уравнение	92
2.9. Контрольые вопросы	95
2.10. Задачи	96
Глава 3 Измерение вакуума	99
3.1. Классификация методов измерения	99
3.2. Механические методы	103
3.3. Тепловые методы	109
3.4. Электрические методы измерения общих давлений	113
3.5. Электрические методы измерения парциальных давлени	ій 123
3.6. Сорбционные методы	133
3.7. Градуировка преобразователей для измерения общих и г	тарциальных
давлений	136
3.8. Измерение газовых потоков	141
3.9. Методы течеискания	146
3.10. Контрольные вопросы	154
Глава 4 Механические методы получения вакуума	156
4.1. Общая характеристика вакуумных насосов	156
4.2. Объемная откачка	158
4.3. Конструкции объемных насосов	163
4.4. Молекулярная откачка	172
4.5. Конструкции молекулярных насосов	177
4.6. Пароструйная откачка	179
4.7. Рабочие жидкости	186
4.8. Конструкции пароструйных насосов	188
4.9.Ловушки	190
4.10. Контрольные вопросы	196

197
197
198
200
203
205
208
214
217
219
223
224
234
237
240
244
250
256
260
266
268
269
271
271
273

7.3.Структурный синтез по типовым образам	278
7.4. Параметрический синтез вакуумной системы по коэффициенту	использования
вакуумног насоса	280
7.5. Многопараметрический синтез вакуумной системы	284
7.6. Схемы соединений и компоновки	287
7.7.Проектировчный расчет вакуумной системы	289
7.8. Пример проектировочного расчета вакуумной системы в	
стационарном режиме	294
7.9. Контрольные вопросы	304
Глава 8 Конструирование вакуумных систем	305
8.1. Конструкционные вакуумные материалы	305
8.2. Неразборные соединения	311
8.3. Разборные соединения	319
8.4. Вакуумные трубопроводы	326
8.5. Устройства для передачи движения в вакуум	329
8.6. Электрические вводы	336
8.7. Вакуумные затворы	338
8.8. Контрольные вопросы	345
Заключение	346
Приложения	348
1.Справочные данные	348
2.Выводы формул	360
3.Таблицы	368
Предметный указатель	391
Литература	395
Обозначения физических величин	396
Оглавление	397

## Предисловие

Вакуумная техника - это техническая наука, изучающая способы создания устройств для получения и измерения вакуума. Она опирается на фундаментальные науки: математику, молекулярную физику, химию и физику поверхностных процессов, газодинамику, термодинамику, а также использует разработки других технических наук.

Вакуум является средой для проведения научных исследований и технологических процессов, которые не могут выполняться в воздухе при атмосферном давлении. Разработка прогрессивных технологических процессов в электронике, металлургии, машиностроении, легкой и пищевой промышленности часто осуществляется с применением вакуумной техники.

В данной книге рассмотрены основные разделы вакуумной техники: свойства газов при низких давлениях, способы получения и измерения вакуума, расчет и проектирование вакуумных агрегатов. Автор старался избегать описательного материала, а обращать внимание читателя на принципы работы элементов вакуумных систем, создавая возможность их сознательного использования или дальнейшего совершенствования. В связи с этим книга может быть полезна как практикам, эксплуатирующим вакуумную аппаратуру, так и научным работникам, занятым разработкой новых элементов вакуумных систем или проектированием вакуумных агрегатов, а также студентам и аспирантам вузов соответствующих специальностей.

Предыдущие издания этой книги вышли в 1971г. в издательстве ЛПИ им. М.И.Калинина, в 1982 и 1990 годах в издательстве "Высшая школа", г. Москва, а в 2002 году в издательстве "Taylor and Francis" (London and New York). При подготовке настоящего издания книга была существенно переработана. Были сделаны дополнения в разделы поверхностных явлений, расчет вакуумных систем, переработаны разделы физики вакуума, физико-химических методов получения вакуума, измерения парциальных давлений, автоматизации проектирования вакуумных систем.

Курс «Вакуумная техника» изучается в качестве общетехнической дисциплины соответствующих технологических и конструкторских специальностей. Для облегчения использования книги в качестве учебника в последнем разделе каждой главы имеются контрольные вопросы и задачи. Книга написана на основе курса лекций, который читался автором в Санкт-Петербургском техническом университете. Все пожелания и замечания по содержанию книги будут встречены автором с большой благодарностью.

Автор

## Введение

#### В.1. Понятие « вакуум»

Понятие "вакуум" в настоящее время используется в нескольких значениях. В переводе с латинского слово "вакуум" означает пустота, и в этом смысле оно уже давно используется в философии. Древнегреческий философ Демокрит одним из "начал мира" выбрал пустоту. Позднее Аристотель вводит понятие эфира — неощутимой среды, способной передавать давление. Материальность вакуума до сих пор является предметом обсуждения философов. Способность передать электромагнитные волны, аннигиляция и случайное появление микрочастиц и античастиц являются свойствами вакуума, нуждающимися в дальнейшем изучении современной теоретической и экспериментальной физикой.

В технике вакуумом называют состояние газа, при котором его давление ниже атмосферного. При давлениях близких к атмосферному количественно вакуум можно определять как разность атмосферного давления и абсолютного давления в вакуумной системе. Существуют дифференциальные манометры, которые непосредственно измеряют эту разность давлений и называются вакуумметрами. Количественное определение вакуума появилось в начале развития вакуумной техники, когда возможности получения низких давлений были еще сравнительно невелики.

При абсолютном давлении, отличающимся от атмосферного более, чем на два порядка, эта разность давлений остается практически постоянной и не может служить характеристикой разреженного газа. В таких условиях состояние газа количественно определяют его абсолютным давлением, а слово "вакуум" используют как характеристику состояния разреженного газа, давление которого меньше атмосферного. Различают низкий, средний, высокий вакуум в зависимости от критерия Кнудсена, который зависит не только от давления, но и от размеров вакуумной камеры.

При низких давлениях, которые уже не могут быть непосредственно измерены существующими приборами, состояние газа можно характеризовать количеством молекул в единице объема, т.е. молекулярной концентрацией газа. Однако для унификации единиц измерения и в этом случае приборы градуируются в единицах абсолютного давления, используя возможность их пересчета по уравнению газового состояния.

При еще более низких давлениях количественная характеристика состояния разреженного газа средним абсолютным давлением или молекулярной концентрацией становится недостаточной т.к. эти величины сильно зависят от координаты и направления в вакуумной камере. В этом случае для описания состояния разреженного газа можно использовать векторные характеристики молекулярных потоков.

Под сверхвысоким вакуумом в литературе обычно понимают состояние газа, удовлетворяющее условиям существования высокого вакуума и малой степени покрытия поверхности молекулами адсорбированных газов. Только в сверхвысоком вакууме можно изучать поверхностные свойства чистых материалов. Поверхностные загрязнения даже в пределах мономолекулярного слоя оказывают сильное влияние на эмиссию электронов, газовыделение, газопроницаемость, адгезию и т.д.

Современная вакуумная техника обеспечивает возможность надежного получения и измерения абсолютных давлений до  $10^{-6}$  Па в серийных промышленных установках и  $10^{-10}$  Па в уникальных установках для научных исследований. Это соответствует при комнатной температуре концентрациям  $10^8$  и  $10^4$  молекул в см<sup>3</sup>. В уникальных исследованиях получены давления порядка  $10^{-12}$  Па, при которых в 1 см<sup>3</sup>, остаются сотни молекул газа. Таким образом, хотя вакуумная техника достигла больших успехов, снизив абсолютное давление в  $10^{15}$  раз, ей еще не удается получить пустое пространство, свободное от газовых молекул.

Космические исследования, проведенные при помощи спутников, показывают, что на больших расстояниях от Земли основным остаточным газом является ионизированный водород, наименьшая измеренная концентрация которого соответствует давлению 10<sup>-10</sup> Па. В межзвездном пространстве концентрация остаточных газов, видимо, существенно неоднородна и ее измерение - дело будущего.

#### В.2. История развития вакуумной техники

Развитие вакуумной техники как науки начинается с опытов Г.Галилея /1564-1642/ в Италии по измерению атмосферного давления. Эти опыты проводились в связи с невозможностью подъема воды из глубоких колодцев. Его ученик Э.Торричелли /1608-1647/ в 1643 году изобрел ртутный манометр, а Б.Паскаль /1623-1662/ определил зависимость атмосферного давления от высоты и предложил конструкцию мембранного барометра.

В 1654г. в Магдебурге О.Герике /1602-1686/ провел опыты с разреженными газами и разработал конструкцию поршневого вакуумного насоса с водяным уплотнением. В дальнейшем в вакууме были проведены исследования закономерностей различных физикохимических процессов. Изучается влияние вакуума на живые организмы. Опыты с электрическим разрядом в вакууме привели к открытию рентгеновского излучения /1895/, а затем и электрона /1897/. Теплоизолирующие свойства вакуума помогли создать правильное представление о способах передачи теплоты, что способствовало развитию криогенной техники.

Успешное изучение свойств разреженного газа обеспечило возможность его широкого технологического применения. Оно началось с изобретения в 1872 г. первого электровакуумного прибора - лампы накаливания с угольным электродом русским ученым А.Н.Лодыгиным /1847-1923/ и открытием в 1883г. американским ученым и изобретателем Т.Эдисоном /1847-1931/ термоэлектронной эмиссии. С этого момента вакуумная техника становится технологической основой электровакуумной, а затем и ряда других отраслей промышленности.

Расширение практического применения вакуумной техники сопровождалось развитием методов получения вакуума. За небольшой период времени в начале XXв. были изобретены широко применяемые в настоящее время вакуумные насосы: вращательный /Геде, 1905/, адсорбционный /Д.Дьюар, 1906/. молекулярный /Геде, 1912/, диффузионный /Геде, 1913/. Аналогичные успехи были достигнуты в развитии способов измерения вакуума: ртутный компрессионный манометр /Г.Мак-Леод, 1874/, тепловой /М.Пирани,1909/, ионизационный /О.Бакли, 1916/. Одновременно совершенствуются научные основы вакуумной техники. В России П.Н.Лебедев /1901/ использует в своих опытах идею удаления остаточных газов с помощью ртутного пара. В этот период исследуются фундаментальные свойства газов при низких давлениях /М.Кнудсен, М. Смолуховский, И.Ленгмюр, С.Дешман/.

В России вакуумная техника начала развиваться в Санкт-Петербурге. В 1909 году начал работать первый радиозавод. Профессор М.М. Богословский в политехническом институте руководил группой сотрудников, занимавшихся разработкой радиоламп, средств измерения и получения вакуума. Будущий академик С.А.Векшинский /1896-1974/ начал работать в этой группе, а 1922 году стал главным инженером электровакуумного завода. В 1947 для участия в атомном проекте ему было поручено организовать сначала вакуумную лабораторию, а затем научно-исследовательский институт вакуумной техники в Москве.

До 50-х годов считалось, что давление ниже 10<sup>-5</sup> Па получить невозможно. Работа американских ученых Ноттингена/1948/ и Альперта/1952/ по измерению фоновых токов ионизационных манометров позволили расширить диапазон измеряемых давлений на три-четыре порядка в область сверхвысокого вакуума.

Для получения сверхвысокого вакуума изобретаются новые насосы: криосорбционный /Лазарев и Федорова, 1957/, турбомолекулярный /Беккер,1958/, магниторазрядный /Джепсен и Холланд, 1959/, совершенствуются диффузионные паромасляные насосы. Разработка откачных средств, не загрязняющих откачиваемый объект, открыла новые перспективы для применения вакуумной техники.

Для измерения низких давлений начинают применятся анализаторы парциальных давлений: статический масс-спектрометр, омегатрон, хронотрон, фарвитрон, топатрон, электрические масс-фильтры.

Надежная сборка и эксплуатация вакуумных систем обеспечивается появлением новых приборов - течеискателей. В 60-х годах были разработаны чувствительные методы определения натеканий в вакуумных системах: масс-спектрометрический, галоидный, катарометрический, радиоизотопный и др.

Для снижения газовыделения конструкционных материалов начинает применяться высокотемпературный прогрев всей вакуумной установки. Вакуумные системы изготавливают цельнометаллическими, разрабатывают конструкцию сверхвысоковакуумных уплотнений,

вводов движения, электрических вводов в вакуум. Совершенствуются технологические методы получения неразъемных соединений металла со стеклом, электроннолучевая и газовая сварка.

Начиная с 60-х годов совершенствуются и разрабатываются новые методы расчета вакуумных систем. Получили распространение численные методы с использованием ЭВМ. Метод статических испытаний при расчете вакуумных систем впервые был использован Девисом /1960/ для расчета проводимости сложных элементов вакуумных систем. В связи с исследованием космоса много работ было выполнено по динамике разреженных газов в свободном и ограниченном пространствах.

Развитие вакуумной техники продолжается путем повышения эффективности уже существующих устройств и разработки новых способов получения и измерения все более низких давлений.

## В.З. Применение вакуумной техники

Применение вакуума началось задолго до понимания всех его свойств. Несколько тысяч лет тому назад вакуум уже использовался в водоподъемных и пневматических устройствах. Первое применение вакуума использовало его силовое воздействие для подъема воды из колодцев. В настоящее время оно используется в вакуумных захватных устройствах, пневматических механизмах и медицинских приборах. Отсутствие кислорода губительно влияет на все живые организмы, за исключением некоторых вирусов. Однако возможность создания управляемой газовой среды используется в барокамерах для лечения людей и сохранения продуктов. При отсутствии кислорода появляется возможность получения активных металлов и других веществ, создаются благоприятные условия для работы нагревателей и катодов при высоких температурах.

Скорость испарения различных веществ в вакууме значительно повышается. На этом основана сушка при комнатной температуре продуктов, древесины и других предметов. Вода начинает кипеть при комнатной температуре при давлении в 40 раз меньше атмосферного. Испарение материалов в вакууме используется для нанесения тонкопленочных покрытий. Изоляционные свойства вакуума при передаче тепла и звука используются в строительных блоках, сосудах для хранения нагретых и охлажденных предметов. Возмож-

ность прохождения через вакуум электромагнитного излучения используется для нагрева, спектральной диагностики состава газов, измерения температуры в вакуумной камере.

Применение вакуумной техники непрерывно расширяется. Она используется во многих наукоемких технологиях, которые позволяют развиваться современной промышленности. Наиболее важным ее применением остается электронная техника. В электровакуумных приборах вакуум является конструктивным элементом, обязательным для их функционирования в течение всего срока службы. Низкий и средний вакуум используются в осветительных приборах и газоразрядных устройствах. Высокий вакуум в приемноусилительных и генераторных лампах. Наиболее высокие требования к вакууму предъявляются при производстве электронно-лучевых трубок и сверхвысокочастотных приборов. Для работы полупроводникового прибора вакуум не требуется, но в процессе его изготовления широко используется вакуумная технология. Особенно широко вакуумная техника применяется в производстве микросхем, где процессы нанесения тонких пленок, ионного травления, имплантации, электронолитографии обеспечивают получение элементов электронных схем субмикронных размеров.

В металлургии плавка и переплав металлов в вакууме освобождает их от растворенных газов, благодаря чему они приобретают высокую механическую прочность, пластичность и вязкость. Плавкой в вакууме получают безуглеродистые сорта железа для электродвигателей, высокоэлектропроводную медь, магний, кальций, тантал, платину, титан, цирконий, бериллий, редкие металлы и сплавы. В производстве высококачественных сталей широко применяется вакуумирование. Спекание в вакууме порошков тугоплавких металлов, таких как вольфрам и молибден, является одним из основных технологических процессов порошковой металлургии. Сверхчистые вещества, полупроводники, диэлектрики изготавливаются в вакуумных кристаллизационных установках . Диффузионная сварка в вакууме позволяет получать неразъемные герметичные соединения материалов с сильно различающимися температурами плавления. Таким способом соединяют керамику с металлом, сталь с алюминием и т.д. Высококачественное соединение материалов с однородными свойствами обеспечивает электронно-лучевая сварка в вакууме. Сплавы с любым соотношением компонентов могут быть получены методами вакуумной молекулярной эпитаксии. Ионная имплантация позволяет разрабатывать новые методы улучшения поверх-

ностных свойств материалов. Искусственные кристаллы алмаза, рубина, сапфира получают в вакуумных установках.

В машиностроении вакуум применяется при исследованиях процессов схватывания материалов и сухого трения, для нанесения упрочняющих покрытий на режущий инструмент и износостойких покрытий на детали машин, захвата и транспортирования деталей в автоматах и автоматических линиях.

Химическая промышленность применяет вакуумные сушильные аппараты при выпуске синтетических волокон, полиамидов, аминопластов, полиэтилена, органических растворителей. Вакуум-фильтры используются при производстве целлюлозы, бумаги и смазочных масел. В производстве красителей и удобрений применяются кристаллизационные вакуумные аппараты.

В электротехнической промышленности вакуумная пропитка как самый экономичный метод широко распространена в производстве трансформаторов, электродвигателей, конденсаторов и кабелей. Повышаются срок службы и надежность при работе в вакууме переключающих электрических аппаратов.

Оптическая промышленность при производстве зеркал перешла с химического серебрения на вакуумное алюминирование. Просветляющие и защитные слои, интерференционные фильтры получают напылением тонких слоев в вакууме.

В пищевой промышленности для длительного хранения и консервирования пищевых продуктов используют вакуумную сушку вымораживанием. Расфасовка скоропортящихся продуктов, осуществляемая в вакууме, удлиняет сроки хранения фруктов и овощей. Вакуумное выпаривание применяется при производстве сахара, опреснении морской воды, солеварении. В сельском хозяйстве широко распространены вакуумные доильные аппараты. В быту пылесос стал нашим незаменимым помощником.

На транспорте вакуум используется для подачи топлива в карбюраторах, в вакуумных усилителях тормозных систем автомобилей. Имитация космического пространства в условиях земной атмосферы необходима для испытания искусственных спутников и ракет. Успехи космических исследований во многом связаны с имитацией космоса в земных условиях. Испытания механизмов и приборов могут осуществляться в крупных вакуумных

установках объемом сотни кубических метров. В них имитируется очень низкое давление и солнечное излучение.

В медицине вакуум применяется для облегчения некоторых операций, ускорения заживления ран, сохранения гормонов, лечебных сывороток, витаминов при получении антибиотиков, биоматериалов, анатомических и бактериологических препаратов.

Научные исследования физических процессов, испарения и конденсации, поверхностных явлений, теплопередачи, получения низких температур, ядерных и термоядерных реакций осуществляется в вакуумных установках. Основной инструмент современной ядерной физики - ускоритель заряженных частиц представляет собой крупную вакуумную электрофизическую установку. Вакуумные системы применяются для изучения свойств чистых веществ, изучения состава и разделения компонентов смесей, скоростей химических реакций. Многие современные приборы: электронные и ионные микроскопы, массспектрометры используют вакуумные системы.

## Глава 1 Свойства газов при низких давлениях

#### 1.1. Давление газа

Свойства газов при низких давлениях изучаются в физике вакуума, являющейся разделом молекулярно-кинетической теории газов. Основой физики вакуума являются следующие постулаты:

I) газ состоит из отдельных движущихся молекул; 2) существует постоянное распределение молекул газа по скоростям, т. е. одной и той же скоростью обладает всегда одинаковое число молекул; 3) при движении молекул газа нет преимущественных направлений, т. е. пространство газовых молекул изотропно; 4) температура газа - величина, пропорциональная средней кинетической энергии его молекул; 5) при взаимодействии с поверхностью твердого тела газ адсорбируется.

При взаимодействии молекул газа с поверхностью твердого тела нормальная составляющая изменения количества движения молекулы равна *mv*cos(θ) ; где θ - угол между нормалью к поверхности и вектором скорости; *m* и *v* - масса и скорость молекулы.

Рассмотрим случай, когда между поверхностью и газовой средой существует энергетическое и адсорбционное равновесие. Каждой адсорбированной молекуле при этом соответствует одна десорбированная молекула с противоположным направлением вектора скорости. Таким образом, суммарное изменение количества движения адсорбированной и десорбированной молекул  $dK = 2mv\cos(\theta)$ .

Согласно второму закону Ньютона, давление молекулы на поверхность твердого тела

$$p = \frac{dK}{dAdt} = \frac{2mv\cos(\theta)}{dAdt},$$
(1.1)

где *dA*-площадь поверхности; *dt*-время взаимодействия молекулы с поверхностью.

Число молекул в элементарном объеме dV, движущихся в направлении dA, с учетом постулата об отсутствии преимущественных направлений пропорционально телесному углу  $d\omega$ , под которым из центра dV видна площадка dA:

$$dN = n \frac{d\omega}{4\pi} dV . ag{1.2}$$



Рис.1.1 Схема для расчета давления газа

Телесный угол

$$d\omega = \cos(\theta) dA / r^2, \qquad (1.3)$$

где *r*-расстояние между поверхностью и выделенным объемом (рис. І.І). Для объема *dV* в полярной системе координат справедливо выражение

$$dV = r\sin(\theta)d\varphi r d\theta dr \qquad (1.4)$$

Давление газа на поверхность твердого тела найдем интегрированием по объему полусферы, из которой молекулы достигают поверхности за время dt, с радиусом  $R=v \cdot dt$ . С учетом выражения (I.I)

$$p = \int_{V} \frac{2mv\cos(\theta)}{dAdt}.$$
 (1.5)

Подставляя (I.2), (I.3), (I.4) в (I.5), получим

$$p = \frac{nmv}{2\pi \cdot dt} \int_{0}^{2\pi} d\varphi \int_{0}^{\pi/2} \cos^{2}(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \int_{0}^{R} dr = \frac{nmv^{2}}{3} \cdot$$
(1.6)

Согласно принятым постулатам существует распределение молекул по скоростям. Поэтому в (1.6) вместо постоянной скорости введем среднеквадратичную скорость молекул  $v_{\hat{e}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2$ . Тогда уравнение для расчета давления газа примет вид

$$p = nmv_{\kappa}^{2}/3. \tag{1.7}$$

Учитывая, что плотность газа  $\rho = nm$ , выражение (1.7) можно переписать как  $p = \rho v_{\kappa}^{2}/3..$ 

Условия равновесия, использованные при выводе уравнения (1.7), могут не выполняться. Примером является конденсирующая поверхность, с которой из-за очень большого времени адсорбции не происходит десорбции молекул газа. Тело, вылетевшее в космическое пространство из земной атмосферы, десорбирует с поверхности молекулы газа. Количеством молекул, ударяющихся о поверхность этого тела, можно пренебречь. В этом случае давление газа на поверхность при неизменных концентрации, массе и температуре уменьшится вдвое и может быть рассчитано по формуле

$$p = nmv_{\hat{e}}^2/6. \tag{1.8}$$

Реальные поверхности могут находиться в условиях, когда выражения (1.7) и (1.8) являются крайними возможными случаями. Для точного расчета давления газа, особенно при очень низких давлениях, нужно знать соотношение потоков падающих и вылетающих молекул газа с поверхности твердого тела.

Если в объеме находится смесь из *К* химически не взаимодействующих газов, то для определения давления смеси *p*<sub>см</sub> необходимо подсчитать сумму:

$$p_{\tilde{n}\tilde{i}} = \sum_{i=1}^{K} \frac{1}{3} m_i n_i v_{\hat{e}i}^2 = \sum_{i=1}^{K} p_i$$
(1.9)

Последнее выражение известно под названием закона Дальтона и формулируется следующим образом: общее давление химически не взаимодействующих газов равно сумме парциальных давлений компонентов смеси.

Воспользовавшись определением температуры как величины, пропорциональной средней кинетической энергии молекул газа, можно записать  $mv_{\kappa}^2/2=cT$ , где *с*-постоянная. Тогда уравнение (I.7) для расчета давления газа можно представить в виде  $p=\frac{2}{3}$  *ncT*. Если обозначить k=2c/3, то

$$p = nkT, \tag{1.10}$$

а средняя кинетическая энергия молекул

$$\frac{mv_{\hat{e}}^2}{2} = \frac{3}{2}kT.$$
 (1.11)

Уравнение (1.10) известно под названием уравнения газового состояния. Оно связывает между собой три основных параметра состояния газа: давление, молекулярную концентрацию и температуру. Постоянная k называется постоянной Больцмана, и ее экспериментальное значение равно 1,38 $\cdot$ 10<sup>-23</sup> Дж/К.

Уравнение (I.10) можно представить также в другой записи:

$$p = \frac{Nm}{VM}RT, \qquad (1.I2)$$

где М-молекулярная масса газа; V-объем газа;

*R*-универсальная газовая постоянная,

$$R = k N_{A} = 8,31 \cdot 10^{3} \, \text{Дж/(К.кмоль)}$$

*N*<sub>*A*</sub>-число Авогадро,

$$N_{\dot{A}} = \frac{M}{m} = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}.$$

Следствием (1.10) или (I.12) является то, что при постоянной массе и неизменном давлении объем газа пропорционален его абсолютной температуре (закон Гей-Люсака). Если же постоянны масса газа и его объем, то давление газа пропорционально его абсолютной температуре (закон Шарля). При постоянных массе и температуре газа произведение его давления на объем остается неизменным (закон Бойля-Мариотта). При постоянном давлении и температуре газа молекулярная концентрация не зависит от рода газа (закон Авогадро).

Единицей давления в системе СИ является Па(Паскаль), численно равный I H/м<sup>2</sup>. В литературе по вакуумной технике можно встретить ряд других единиц давления. Наиболее распространенной внесистемной единицей давления является миллиметр ртутного столба (торр). Давление газа I мм рт.ст. равно давлению, которое создает столбик ртути высотой I мм при условии, что плотность ртути равна 13595,1 кг/м<sup>3</sup> (при 0<sup>°</sup>C), а земное ускорение соответствует нормальному 9,80665 м/с<sup>2</sup> на широте 45<sup>°</sup>. Давление столба жидкости  $p = \rho \cdot gh$ , тогда

I мм рт.ст.=13595,1.9,80665.10<sup>-3</sup> =133,32239 H/м<sup>2</sup>.

В метеорологии в качестве единицы давления часто используется 1бар=10<sup>5</sup> Па. В иностранной литературе получила распространение единица давления 1 мбар= 100 Па. Соотношения между различными единицами давления даны в табл.С1.

Атмосферный воздух - это основная газовая смесь, с которой приходится иметь дело в вакуумной технике (табл. С2). Он состоит в основном из азота, кислорода и паров воды. При 25°C и 50% влажности парциальное давление паров воды составляет 1,2.10<sup>3</sup>Па. В качестве нормальных условий приняты давление 10<sup>5</sup>Па и температура 273 К. При этом,



Рис.1.2. Атмосферное давление на различных высотах от поверхности Земли

согласно уравнению (1.12), объем, занимаемый 1 кмолем газа, равен 22,4 м<sup>3</sup>. При нормальных условиях молекулярная концентрация воздуха  $n = 2,7.10^{25}$  м<sup>-3</sup>.

Давление атмосферного воздуха зависит от высоты над уровнем моря. При изменении высоты на dz давление изменяется на  $dp=-\rho g dz$ , где  $\rho$ -плотность газа;  $\rho = nm = pm/(kT)$ ; *g*-ускорение силы тяжести. Разделяя переменные, получим

$$\frac{dp}{p} = -\frac{mg}{kT}dz.$$
(1.13)

После интегрирования имеем

$$\ln p = -\frac{mg}{kT}z + C \quad \text{или} \qquad p = C\exp(-\frac{mg}{kT}z). \tag{1.14}$$

Постоянная интегрирования C при z=0 равна давлению газа  $p_0$  у поверхности Земли, поэтому

$$p = p_0 \exp(-\frac{mg}{kT}z). \qquad (1.15)$$

Полученное выражение называется формулой Больцмана, из которой следует, что при подъеме на каждые 15 км давление воздуха уменьшается примерно на один порядок. На Рис.I.2 показано изменение атмосферного давления на различной высоте от поверхности Земли.

## § 1.2 Распределение молекул газа по скоростям

При соударениях друг с другом или со стенками вакуумной камеры молекулы газа изменяют свои скорости как по величине, так и по направлению. Пользуясь гипотезами о существовании стационарного распределения молекул по скоростям и об изотропности пространства газовых молекул, а также учитывая, что согласно (1.11), среднеквадратичная скорость  $v_{e} = \sqrt{3kT/m}$ , Максвелл получил функцию распределении молекул по скоростям

$$dn_{v} = 4n\pi v^{2} \left(\frac{m}{2\pi \cdot kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{(mv)^{2}}{2kT}\right) dv, \qquad (1.16)$$

где  $dn_v$ -число молекул, скорости которых заключены в пределах от v до v + dv. Вывод уравнения (1.16) дан в приложении П2.1.

Скорость, при которой наблюдается максимум функции распределения, называется наиболее вероятной скоростью. Приравнивая нулю производную от функции (1.16), получим

$$\mathcal{V}_{\hat{a}} = \sqrt{2kT/m} \tag{1.17}$$

Если ввести обозначение  $c = v / v_{\hat{a}}$ , то формулу (1.16) можно переписать так:

$$dn_v = \frac{4n}{\sqrt{\pi}}c^2 \exp(-c^2)dc.$$

Безразмерные

функции



гис. 1.5. Дифференциальная f(c) и интегральная F(c) функции распределения молекул по скоростям: 1-f(c), 2-F(C).

 $f(c) = dn_v / (ndc)$  и  $F(c) = \int_{0}^{c} f(c) dc$  представлены на рис. I.3. Функция F(c) численно

равна доле общего числа молекул, скорости которых не превышают с. В вакуумных расчетах часто используют средние характеристики: среднеарифметическую скорость

$$v_{a} = \frac{1}{n} \int_{0}^{\infty} v dn_{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}};$$
 (1.18)

Вывод (1.18) дан в приложении П2.2.

Среднеквадратичная скорость

$$v_{\hat{e}} = \sqrt{\frac{1}{n} \int_{0}^{\infty} v^{2} dn_{v}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$
(1.19)

Соотношение между скоростями  $v_{a}, v_{a}, v_{e}$  равно I : I,128 : I,225. Так, указанные скорости для молекул азота при 0°С составляют 402; 453; 492 м/с. Среднеарифметические скорости молекул некоторых газов при различных температурах приведены в табл. С3.

#### Таблица 1.1

С	f(c)	F(c)	x	f(x)	F(x)
0,1	0,0223	0,0008	0,1	0,2401	0,0082
0,2	0,0867	0,0059	0,2	0,3229	0,0224
0,3	0,1856	0,0193	0,4	0,4131	0,0598
0,4	0,3077	0,0438	0,6	0,4578	0,1036
0,5	0,4393	0,0812	0,8	0,4785	0,1505
0,6	0,5668	0,1316	1,0	0,4839	0,1987
0,7	0,6775	0,1939	1,2	0,4797	0,2470
0,8	0,7613	0,2663	1,4	0,4688	0,2945
0,9	0,8129	0,3453	1,6	0,4535	0,3406
1,0	0,8302	0,4276	1,8	0,4352	0,3851
1,2	0,7697	0,5896	2,0	0,4152	0,4276
1,4	0,6232	0,7286	2,8	0,3294	0,5765
1,6	0,4464	0,8369	3,6	0,2502	0,6920
1,8	0,2862	0,9096	4,0	0,2160	0,7385
2,0	0,1652	0,9540	6,0	0,0973	0,8884
2,5	0,0272	0,9941	10,0	0,0170	0,9814

## Значения безразмерных функций законов распределения

Преобразуя (1.16), получим функцию распределения молекул по энергиям:

$$dn_E = \frac{2n}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \exp(-E/(kT)) \sqrt{E} dE.$$

0.6

Здесь  $E = m v_{\hat{e}}^2 / 2$  - энергия поступательного **f**(**x**) движения молекулы;  $dn_E$  - число молекул, **0.8** энергия которых лежит в интервале от Е до E+dE.

Наиболее вероятная энергия молекул 0,4  $E_{\hat{a}} = 0,5kT.$  Вводя переменную  $x = E / E_{\hat{a}}, 0,2$ получим

$$f(x) = \frac{d(n_E / n)}{dx} = 4\sqrt{\frac{2x}{\pi}} \exp(-x/2) \qquad (1.20)$$

0.4 0.2 0.8 1.6 2,4 3,2 Х ) Рис.1.4. Дифференциальная f(x) и интегральная F(x) функции распределения молекул по

2

энергиям: 1-f(x), 2-F(x).

F(x)

0.8

0,6

Интегральная кривая, представляющая собой долю молекул газа, энергия которых меньше E, определяется функцией

$$F(x) = \int_{0}^{x} f(x) dx.$$
 (1.21)

На рис. 1.4 в безразмерной форме представлены графики функции (1.20) и (1.21). дифференциальной кривой соответствует наиболее вероятной энергии Максимум среднеарифметического значения  $E_{a} = 0,5kT.$ Расчет энергии молекул дает  $E_{a} = 1,5kT$ . Наиболее важные значения безразмерных функций даны в табл. 1.1.

## 1.3 Средняя длина свободного пути

Направленный молекулярный поток, содержащий в начальный момент  $N_0$  молекул газа за счет столкновений с хаотически движущимися молекулами с частотой *K* за время *dt* уменьшается на величину dN = -KNdt. Проинтегрировав это выражение, получим

$$N = N_0 \exp(-Kt) = N_0 \exp(-l/L).$$
(1.22)

Здесь L = v/K - средняя длина свободного пути молекул газа, определяемая отношением скорости молекул к числу столкновений в единицу времени; l = vt - длина пути молекулы за время *t*.



Рис.1.5. Столкновение двух одинаковых молекул

Столкновение молекул произойдет, если расстояние между центрами молекул станет равным диаметру молекулы  $d_{M}$  (рис. 1.5). Будем считать, что одна молекула имеет радиус  $d_{M}$ все остальные молекулы а математические точки с нулевым радиусом. При движении со скоростью *v* в газе с молекулярной концентрацией *n* за 1 с такая воображаемая молекула опишет  $V = \pi d_M^2 v$  и испытает  $K = n \pi d_M^2 v$ объем соударений. Средняя длина свободного пути в этом случае

$$L = \frac{v}{K} = \frac{1}{\pi d_i^2 n}.$$
(1.23)

С учетом относительных скоростей движения молекул газа, которые не учитывались при выводе выражения (1.23), для длины свободного пути можно получить более точное выражение

$$L = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_i^2 n}.$$
(1.24)

Из формулы (1.24) видно, что при постоянной молекулярной концентрации длина свободного пути не должна зависеть от температуры. Однако из опытных данных следует, что при постоянной молекулярной концентрации с увеличением температуры длина свободного пути также увеличивается. Зависимость от температуры в (1.24) может быть учтена введением, полученного экспериментально, дополнительного множителя в знаменателе

$$L = \frac{1}{\sqrt{2\pi d_i^2 n (1 + \tilde{N}/T)}}.$$
 (1.25)

Здесь C - постоянная Сезерленда, равная температуре, при которой в случае постоянной молекулярной концентрации газа средняя длина свободного пути молекул уменьшается вдвое по сравнению со значением, соответствующим бесконечно большой температуре. Значения постоянной C для различных газов представлены в табл.С4. Для учета взаимодействия молекул газа между собой (взаимного притяжения) вводят понятие эффективного диаметра молекулы  $d_T$ :

$$d_T^2 = d_i^2 (1 + C/T)$$
(1.26)

Эффективный диаметр молекулы уменьшается с увеличением температуры газа. Формулу (1.25) можно представить с учетом (1.26) в виде

$$L = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_T^2 n}.$$
(1.27)

Используя уравнение газового состояния (1.10) и выражение (1.26), можно преобразовать (1.27) к виду:

$$L = \frac{kT^{2}}{\sqrt{2} p \pi d_{i}^{2} (T + \tilde{N})}.$$
(1.28)

Для воздуха при T=293 К и давлении 1 Па из (1.28) следует, что  $L_1 = 6,7.10^{-3}$  м.Па. При любом другом давлении, когда p - в Па, L - в м,

$$L = \frac{L_1}{p} = \frac{6,7.10^{-3}}{p},$$
(1.29)

При расчетах длины свободного пути молекул газа при различных температурах и постоянном давлении на основании (1.28) можно получить следующее выражение:

$$L_{T} = L_{0} \frac{T^{2}(T_{0} + C)}{T_{0}^{2}(T + C)} = bL_{0}, \text{ где} \qquad b = \frac{T^{2}(T_{0} + C)}{T_{0}^{2}(T + C)}.$$
(1.30)

Таблица 1.2

T, K T, K Газ Газ 600 293 77 4.2 600 293 77 4.2 0.0108  $N_2$ 20.8 8.67 1.26 0,006  $H_2$ 28.2 12.2 0.197 7,02 1,00 0,0047 Xe 0,0017 16,9 10,5 3,93 0,448  $\mathbf{O}_2$ 16.7 6.79 0,933 0,0042  $H_2O$ 13.9 4.38 0.391 0,0013 Ar  $CO_2$ 11.6 4.32 0,492 0.0019 16.0 6,72 0.995 0,0048 Воздух Ne 30,7 13,9 2,50 0,0165 He 43,6 19,1 3,13 0,0174 14,1 0,0029 Kr 5,52 0,691

 $L_1 \times 10^3$  (м.Па) при давлении 1 Па

Средняя длина свободного пути молекул различных газов

В табл.1.2 приведены значения средних длин свободного пути молекул различных газов при единичном давлении.

В случае смеси двух газов, молекулы которых имеют массы  $m_1$ и  $m_2$ , среднюю длину свободного пути частицы с массой  $m_1$  рассчитывают по формуле

$$L_{1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi n_{1}d_{T1}^{2} + \pi n_{2}d_{12}^{2}\sqrt{1 + m_{1}/m_{2}}}}.$$
 (1.31)

Здесь  $d_{T1}$  -- эффективный диаметр молекул с массой  $m_1$ , и концентрацией  $n_1$ ;

 $d_{12} = \frac{1}{2}(d_{T1} + d_{T2});$   $d_{T2}$ -эффективный диаметр молекулы с массой  $m_2$  и концентрацией  $n_2$ . Первое слагаемое в знаменателе (1.31) зависит от столкновения одинаковых частиц с массой  $m_1$ , а второе - от столкновения частиц с массами  $m_1$  и  $m_2$ . Если  $n_1 \prec n_2$ , то получим более простое выражение:

$$L_{1} = \frac{1}{\pi n_{2} d_{12}^{2} \sqrt{1 + m_{1} / m_{2}}}.$$
 (1.32)

## 1.4 Взаимодействие молекул газа с поверхностью

Число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, или частота соударений,

$$N_{q} = \int_{V} \frac{dN}{dA \, dt} = \frac{n}{4\pi} \int_{0}^{2\pi} d\phi \int_{0}^{\pi/2} \sin(\theta) \cos(\theta) \, d\theta \int_{0}^{R} \frac{dr}{dt} = \frac{nv}{4}, \qquad (1.33)$$

где *dN* определяется согласно (1.2). С учетом функции распределения молекул по скоростям имеем

$$N_{q} = n_{Va}/4,$$
 (1.34)

где *v*<sub>*a*</sub>—среднеарифметическая скорость молекул газа.

Объем газа, ударяющийся о единицу поверхности в единицу времени, можно выразить через частоту соударений и молекулярную концентрацию:

$$V_q = N_q / n = v_a / 4.$$
 (1.35)

Полученное выражение не зависит от давления и определяет максимальную быстроту действия идеального вакуумного насоса, откачивающего все молекулы газа, которые попадают в него через входное отверстие. Для воздуха при атмосферном давлении и T=300K, M=29 кг/кмоль частота соударения молекул с поверхностью  $N_q = 2.9 \times 10^{23} c^{-1} \tilde{n} i^{-2}$ , а объем молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени  $V_q = 11.6 \times 10^{-3} i^{-3} / (\tilde{n}.\tilde{n} i^{-2})$ .

Поток молекул, испаряющихся с поверхности твердого тела в высоком вакууме, когда отсутствуют соударения между молекулами в газовой фазе, зависит от направления испаряющихся молекул.

Испарение из точечного источника соответствует изотропному распределению, при котором вероятность вылета молекул внутри телесного угла *d*<sup>(1)</sup> постоянна.

$$dP = d\omega / (4\pi).$$
 (1.36)

Если воспользоваться определением телесного угла

$$d\omega = 2\pi \sin(\gamma) d\gamma$$
,

(см. рис. 1.6, а), то  $dP = \sin(\gamma) d\gamma/2$ , а полная вероятность вылета молекул внутри сферы

$$P = \int_{0}^{\pi} \sin \gamma d\gamma / 2 = 1.$$



а-точенного, б-плоского

Рис.1.6. Схема испарения из источников:

Вероятность вылета молекул с поверхности тела, как было доказано экспериментально, пропорциональна косинусу угла между нормалью К поверхности И направлением вылета (рис.1.6,б):

$$dP = A \frac{d\omega}{2\pi} \cos(\gamma), \qquad (1.37)$$

где А --коэффициент пропорциональности

(из условия нормировки  $\int_{0}^{\pi/2} dP = 1$  следует, что A=2). Таким образом, вероятность вылета

молекул с поверхности равна удвоенному произведению относительного телесного угла на косинус угла между нормалью к поверхности и направлением вылета (косинусный закон).

Интегрируя (1.37) в пределах от 0 до  $\gamma$ , при A=2 и  $d\omega = 2\pi \sin(\gamma) d\gamma$  найдем долю молекул, вылетающих внутри угла  $\gamma$ :

$$\varepsilon = \int_{0}^{\gamma} \sin(2\gamma) d\gamma = \sin^{2}(\gamma).$$
 (1.38)

Из (1.38) следует выражение для определения угла *γ*, соответствующего заданной доле молекулярного потока *ε*:

$$\gamma = \arcsin(\sqrt{\varepsilon}). \tag{1.39}$$

Эта формула широко применяется при математическом моделировании молекулярных потоков в высоковакуумных системах.

#### 1.5. Время адсорбции

Взаимодействие молекул газа с поверхностью происходит в течение времени адсорбции, зависящим от свойств поверхности и от рода газа. Поглощение газов твердыми телами используется в вакуумной технике для получения и измерения вакуума. По мере снижения давления роль поверхностных процессов возрастает.

Процесс поглощения газов или паров твердыми телами независимо от того, происходит он на поверхности или в объеме твердого тела, называется сорбцией, а процесс поглощения газов на поверхности твердых тел — адсорбцией. Различают физическую

адсорбцию и хемосорбцию. Абсорбция — это поглощение газов в объеме твердых тел. В процессе абсорбции происходит растворение газа. Вещество, поглощающее газ, называется сорбентом (адсорбентом, абсорбентом), а поглощаемое вещество — сорбатом(адсорбатом, абсорбатом). Выделение газов из твердого тела называется десорбцией.

Сорбция — процесс экзотермический. При поглощении молекул газа выделяется энергия сорбционного взаимодействия, имеющая физическую и химическую природу. Физическая составляющая энергии взаимодействия определяется несколькими эффектами, обеспечивающими притяжение и отталкивание молекул.

Индукционный эффект притяжения при взаимодействии постоянного и индуцированного диполей имеет место, когда хотя бы одна из взаимодействующих молекул обладает постоянным дипольным моментом. Ориентационный эффект притяжения наблюдается для двух вращающихся молекул с постоянными дипольными моментами. Дисперсионный эффект притяжения объясняется взаимодействием флуктуирующих диполей, которые создаются электронами, вращающимися вокруг ядра.

Энергию притяжения при физическом взаимодействии можно рассчитать по формуле

$$Q_{\hat{o}} = \frac{2\mu_0^2 \alpha_0}{r^6} + \frac{2}{3}\frac{\mu_0^4}{kTr^6} + \frac{3}{4}\frac{\alpha_0^2 J}{r^6}, \qquad (1.40)$$

где *r* - расстояние между молекулами; μ<sub>0</sub> — дипольный момент молекулы; α<sub>0</sub> - поляризуемость; *J* - потенциал ионизации.



Для полярных молекул H<sub>2</sub>O и NH<sub>3</sub> существенную часть всей энергии взаимодействия составляет ориентационный эффект. Неполярные молекулы





Рис.1.7.Потенциальная энергия взаимодействия молекул с поверхностью твердого тела: 1 - хемосорбция, 2 - физическая адсорбция атомного числа. Индукционный эффект мал для всех рассматриваемых молекул. Энергия притяжения при физическом взаимодействии обратно пропорциональна шестой степени расстояния между взаимодействующими молекулами.

При химическом взаимодействии притяжение  $Q_x$  объясняется возникновением ковалентной или ионной связи. Ковалентная связь образуется двумя электронами с противоположно направленными спинами, причем эта электронная пара принадлежит двум атомам. При ионной связи осуществляется взаимное электростатическое притяжение противоположно заряженных ионов. Химическая связь в ряде случаев может носить смешанный характер.

Отталкивание объясняется взаимодействием положительно заряженных ядер сближающихся молекул, Энергия отталкивания обратно пропорциональна двенадцатой степени расстояния между молекулами:

$$Q_{i} = B / r^{12}$$

С учетом всех эффектов энергию взаимодействия между двумя молекулами можно записать в виде  $\delta Q = Q_i - Q_o - Q_o$ . При  $\delta Q = 0$  наблюдается положение равновесия, при котором энергия отталкивания и притяжения одинаковы.

Для нахождения энергии взаимодействия молекулы с поверхностью твердого тела необходимо просуммировать энергии взаимодействия молекулы с каждым атомом кристаллической решетки твердого тела. Если расстояние между молекулой газа и поглощающей поверхностью велико по сравнению с расстоянием между атомами адсорбента, то можно применить интегрирование по объему. Энергия взаимодействия молекулы с твердым телом

$$\varphi = \int_{V} Q n_{\dot{a}} dV, \qquad (1.41)$$

где  $n_a$  и V — концентрация и объем атомов адсорбента. После интегрирования составляющая, обеспечивающая притяжение, будет пропорциональна третьей, а отталкивание - девятой степени расстояния между молекулой и поверхностью.

При физической адсорбции энергия взаимодействия обычно не превышает 100 МДж/кмоль. Теплоты адсорбции некоторых газов на углероде представлены в таб.С6. Энергия взаимодействия для хемосорбции лежат в пределах 100..400 МДж/кмоль. Теплоты адсорбции различных газов на некоторых материалах приведены в таб.С7.

Уравнение (1.41) можно представить в виде потенциальных кривых (рис.1.7). Приближаясь к поверхности, молекула оказывается в первой потенциальной яме. При этом выделяется энергия, соответствующая физической адсорбции. Тепловая энергия kT/2 молекулы является причиной ее колебаний внутри потенциальной ямы между  $r_{\phi 1}$  и  $r_{\phi 2}$ . Если энергия многоатомной молекулы превышает  $\phi_{\phi} + \phi_{akr}$ , то она диссоциирует на атомы, способные химически взаимодействовать с поверхностью. При этом атомы попадают во вторую потенциальную яму и колеблются в ней между  $r_{x1}$  и  $r_{x2}$ . На следующем этапе процесса поглощения происходит переход хемосорбированных молекул в кристаллическую решетку твердого тела. Этот этап называется абсорцией или растворением газа в твердом теле.



Рис.1.8. Изобара поглощения водорода на никелевом порошке при давлении 2,7.10<sup>4</sup> Па.

Десорбция газа происходит в обратном порядке. Молекулы из твердого тела переходят в хемосорбированное состояние, откуда при энергии молекул

 $kT/2 > \varphi_x + \varphi_{a\kappa\tau}$ 

они могут покинуть поверхность. Для удаления молекул, находящихся в первой потенциальной яме, должно соблюдаться условие  $kT/2 > \phi_{\phi}$ .

Для реальных поверхностей с дефектами кристаллической решетки теплота адсорбции не имеет постоянного значения

и существует ее функция распределения по энергии адсорбционных центров.

Равновесное поглощение водорода на никелевом порошке показано на рис. 1.8. При повышении температуры количество поглощенного газа сначала убывает. Этот этап соответствует физической адсорбции. Затем после прохождения минимума, наблюдается увеличение количества поглощенного газа, что соответствует хемосорбции.

Теплота адсорбции изменяется по поверхности тела. Для идеальных поверхностей эти изменения связаны с периодичностью кристаллической решетки. Величина потенциального барьера при движении молекул по поверхности называется теплотой миграции. Она меньше, чем теплота адсорбции и определяется соотношением  $Q_{\rm M} = z \cdot Q_{\rm a}$ , где z — коэффициент

пропорциональности. Для кубической решетки z = 1/2, а для гексагональной -z = 2/3. Реальные соотношения теплот адсорбции и миграции существенно отличаются от идеальных.

Минимальным временем адсорбции можно считать период колебания молекулы в потенциальной яме. Приближенно это время можно считать независящим от температуры и одинаковым для различных молекул газа  $\tau_0 = 10^{-13} c$ . Общее время адсорбции увеличивается при повышении теплоты адсорбции и снижается при повышении температуры. Оно может быть рассчитано по формуле Френкеля

$$\tau_{\dot{a}} = \tau_0 exp(Q_{\dot{a}} / (RT)), \qquad (1.42)$$



где  $Q_{\dot{a}}$  - теплота адсорбции.

Рис.1.9. Зависимость времени адсорбции от теплоты адсорбции: 1 - 77 K, 2 - 293 K

Время адсорбции основных составляющих воздуха, имеющих теплоту адсорбции 20 МДж/кмоль, при комнатной температуре составляет  $10^{-10}$  ñ, а при температуре жидкого азота - 1с (рис.1.9). Для паров воды и масел с теплотой адсорбции 80 МДж/кмоль время адсорбции составляет 100 с при 293 К и 10<sup>43</sup>с при 77 К. Гелий имеет теплоту адсорбции около 2

МДж/кмоль, а время его адсорбции при 77 К составляет 10<sup>-13</sup> п Поглощение Не становится заметным только при температурах менее 4 К.

Для хемосорбции при теплотах адсорбции более 100 МДж/кмоль время адсорбции настолько велико, что адсорбционные процессы при комнатной температуре становятся необратимыми при изменении давления газа над поверхностью адсорбента. Вернуть систему в первоначальное состояние можно лишь повышением температуры. При физической адсорбции время адсорбции мало и наблюдается обратимость зависимости количества поглощенного газа от давления в газовой фазе. Время перехода молекулы на поверхности из одной потенциальной ямы в другую называется временем миграции и определяется, как и время адсорбции, соотношением

$$\tau_{\dot{a}} = \tau_0 \exp(Q_i / (RT)),$$
 (1.43)

где  $Q_i$  — теплота миграции.

#### 1.6. Давление насыщенных паров

Вещества в зависимости от температуры и давления могут находиться в различных агрегатных состояниях. Для вакуумной техники наибольший интерес представляет область низких давлений, в которой возможны процессы перехода из жидкого состояния в парообразное (испарение) и обратный процесс (конденсация), из твердого состояния в парообразное (сублимация) и обратный процесс (десублимация). На рис.1.10 приведена диаграмма агрегатного состояния вещества, а параметры некоторых газов: критическая температура  $T_{\kappa p}$  и параметры тройной точки  $T_b$  и  $p_T$  даны в табл.С8.



Рис.1.10 Диаграмма агрегатного состояния вещества: І - жидкость, ІІ - твердое тело, ІІІ - пар, IV - газ.

Большинство составляющих воздуха при нормальных условиях В являются виде газами. пара присутствуют лишь H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Xe. При температуре 77 К, которую имеют поверхности вакуумных ловушек, охлаждаемых жидким азотом, большинство составляющих воздуха переходит в парообразное состояние, и лишь He,  $H_2$  è Ne остаются газами.

Давление *p<sub>T</sub>*, при котором происходит изменение агрегатного состояния вещества, называется давлением насыщенных паров при

заданной температуре. Кривую *abc* на рис. 1.10, определяющую давление насыщенного пара при давлениях меньших 100 Па, можно описать приближенным уравнением

$$\lg p_T = M - N / T, \tag{1.44}$$

где *М* и *N* - константы, зависящие от рода вещества (табл.1.3).Более точные значения давления насыщенных паров различных веществ, определенные экспериментально, показаны на рис.1.11. Давления насыщенных паров при комнатной температуре для
различных органических и полимерных материалов, часто применяемых в вакуумной технике в качестве уплотнителя, приведены в табл. С9.



Рис.1.11. Давление насыщенных паров различных веществ в зависимости от температуры

Давление насыщенных паров сплавов приближенно определяется законом Рауля

$$p_{AS}/p_A = n_A/(n_A + n_B) = X_A,$$
 (1.45)

где  $p_A$ - давление насыщенных паров вещества А;  $p_{AS}$  - давление насыщенных паров вещества А для раствора, в котором вещество А является растворителем вещества В;  $n_A \hat{e} n_B$  - количество молей веществ А и В в растворе.

Вещество	Cu	Al	Zn	Ni	Fe	Cr	$N_2$
М	11,08	10,91	10,00	11,87	11,56	12,06	24,1
$N \times 10^3$	16,98	15,94	14,87	20,96	19,97	20,00	8,9×10 <sup>5</sup>

Константы уравнения (1.57)

Содержание вещества А в растворе можно выразить в весовых процентах:

$$q_{A} = \frac{100 X_{A} M_{A}}{X_{A} M_{A} + (1 - X_{A}) M_{B}},$$

где *X*<sub>A</sub> – молярная доля вещества А; М<sub>А</sub> и М<sub>В</sub> – молярные массы веществ А и В.



Рис. 1.12. Давление насыщенных паров цинка в сплаве с медью

На рис. 1.12 показана в качестве примера температурная зависимость давления паров цинка для сплава медью при различных цинка с значениях молярной доли меди  $X_{\tilde{N}u}$ . Как видно из рисунка, при постоянной увеличение температуре молярной доли меди в сплаве существенно снижает давление насыщенных паров цинка.

Молекула, ударяющаяся о

поверхность твердого тела, может сконденсироваться или отразиться вновь в газовую фазу. Вероятность конденсации возрастает при увеличении теплоты испарения и снижении температуры газа. Если теплота испарения по всей поверхности одинакова, то вероятность конденсации можно определить как долю молекул, энергия которых меньше теплоты конденсации. Используя интегральное распределение молекул по энергиям (1.21), запишем выражение для вероятности конденсации на свободной поверхности

$$\gamma = \int_{0}^{x} \sqrt{\frac{4x}{\pi}} e^{-x} dx, \qquad (1.46)$$

где x = E/(kT); E - теплота испарения. Значения  $\gamma(x)$  можно определить по таб. 1.1, воспользовавшись равенством  $\gamma(x) = F(x)$ .

Массовый поток молекул, падающий на единицу поверхности в единицу времени, равен произведению массы молекулы на частоту соударения молекул с поверхностью  $N_q$ , определяемому из (1.34). Таким образом скорость конденсации

$$G_{\hat{e}} = \gamma m N_q = \gamma p_{\tilde{a}} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \qquad (1.47)$$

где  $p_e$  и *T* - давление и температура газа. В системе единиц СИ молекулярная масса *M* измеряется в кг/кмоль, а *R*=8,31×10<sup>3</sup> Дж/(кмоль.К), тогда  $G_e$  выражается в кг/(м<sup>2</sup>.с).

При давлении насыщенного пара существует динамическое равновесие процессов конденсации и испарения, что позволяет определить скорость испарения через скорость конденсации

$$G_{\hat{e}} = p_T \gamma \sqrt{M / (2\pi RT)}, \qquad (1.48)$$

где  $p_{T}$  - давление насыщенного пара при температуре *T*.

Скорость массообмена на поверхности

$$G = G_{\hat{e}} - G_{\hat{e}} = 4,38 \times 10^{-3} (p - p_T) \gamma \sqrt{M/T}.$$
(1.49)

При  $p > p_T$  происходит осаждение, а при  $p < p_T$  — удаление вещества с поверхности тела. Процессы сублимации — десублимации описываются такими же выражениями. В таб. С10 приведены скорости испарения различных веществ, соответствующие давлению насыщенного пара 1,33 Па.

Конденсация вещества идет с выделением тепла. Теплоты конденсации можно определить, используя константу *N* из уравнения (1.44),

$$E=2,3RN$$

#### 1.7. Степени покрытия поверхности молекулами газа

Степень покрытия поверхности молекулами адсорбированных газов влияет на свойства материалов и характер протекания поверхностных явлений: эмиссию электронов из твердого тела, поверхностный электрический разряд, сухое трение и износ, адгезию пленок и т. д.

Обозначим долю поверхности, занятую адсорбированными молекулами, буквой  $\theta = a/a_m$ , где а – количество молекул, адсорбированных на единице поверхности, а  $a_m$  – количество молекул, необходимое для образования на единице поверхности мономолекулярного слоя.

$$a_{m} = \frac{4 \cdot T}{\pi d_{m}^{2} (T+C)} \quad . \tag{1.50}$$

Если измерять количество газа в м<sup>3</sup>Па/м<sup>2</sup>, то

$$a_{M} = \frac{a_{m}}{2.65.10^{20}} \frac{273}{T}.$$

Установим три степени покрытия поверхности: высокую ( $\theta >>1$ ), среднюю ( $\theta \approx 1$ ) и низкую ( $\theta <<1$ ). При низкой степени покрытия поверхности удельную скорость конденсации можно определить по формуле

$$\mu = \gamma N_q = \frac{\gamma n v_{\dot{a}}}{4}, \tag{1.51}$$

где γ - вероятность конденсации молекул на свободной поверхности. Удельную скорость испарения из адсорбированного мономолекулярного слоя при постоянной теплоте адсорбции можно рассчитать, пользуясь понятием времени адсорбции (1.42)

$$\vartheta =_{a_m} / \tau_{\dot{a}}, \tag{1.52}$$

где  $a_m$  — количество молекул, адсорбированных на единице площади мономолекулярного слоя. В уравнениях (1.51) и (1.52) скорости конденсации и испарения измеряются числом молекул, взаимодействующих с единицей поверхности в единицу времени и имеют размерность (м<sup>2</sup>.c)<sup>-1</sup>. Из условия адсорбционного равновесия

$$\frac{da}{dt} = \mu - \theta \vartheta = 0,$$

Подставляя в него (1.51) и (1.52), можно определить степень покрытия поверхности

$$\theta = bp , \qquad (1.53)$$

где

$$b = \frac{\gamma \tau_{a}}{a_m \sqrt{2\pi m k T}}$$

Уравнение адсорбции (1.53) называют уравнением Генри (рис.1.13,а). Оно справедливо для низких давлений или высоких температур, когда  $\theta << 1$ .

При средней степени покрытия ( $\theta \approx 1$ ), когда теплота адсорбции постоянна и больше теплоты конденсации ( $Q_{a} > E$ ), уравнение адсорбционного равновесия можно записать в виде

$$\frac{da}{dt} = \mu(1-\theta) - \theta \vartheta. \tag{1.54}$$



Рис.1.13. Изотермы адсорбции: а — изотерма Генри, б — изотерма Ленгмюра, в — *S* - образная изотерма, г — островковая изотерма

В уравнении (1.54) предполагается, что конденсация молекул возможна только на свободной поверхности. В равновесных условиях, когда da/dt = 0, из него можно получить следующее выражение для степени покрытия поверхности

$$\theta = \frac{bp}{1+bp} \,. \tag{1.55}$$

Выражение (1.55) называется уравнением мономолекулярной адсорбции или уравнением Лангмюра (Рис1.13,б). Оно особенно хорошо выполняется в случае хемосорбции газов на металлических поверхностях и предполагает, что в процессе поглощения газа может образоваться только один слой адсорбированных молекул.



При больших степенях покрытия наблюдается полимолекулярная адсорбция. Сделаем допущения: 1)теплота адсорбции в первом слое постоянна, 2)теплота адсорбции во втором и последующих слоях равна теплоте

конденсации, 3)вероятность конденсации на свободной поверхности одинакова для всех адсорбированных слоев. Воспользуемся моделью многослойной адсорбции, показанной на рис.1.14. Молекулы газа, адсорбированные в несколько слоев, для облегчения расчета свободной поверхности условно сдвинуты вправо. Уравнение полимолекулярной адсорбции, полученное Брунауером, Эмметом и Тейлором, известно под названием уравнения БЭТ:

$$\theta = \frac{Cp/p_T}{(1 - p/p_T)[1 + (C - 1)p/p_T]},$$
(1.56)

где *p* - равновесное давление в газовой фазе; *p* - давление насыщенных паров адсорбата при температуре *T* K; *C* - константа, зависящая от разности теплот адсорбции и конденсации;

$$C = \exp[(\mathbf{Q}_{\dot{\mathbf{a}}} - \mathbf{E})/RT].$$

Вывод уравнения (1.56) дан в приложении П2.3. Теплоты адсорбции и конденсации некоторых газов приведены в таб. С6.

Уравнение (1.56) при  $Q_a > E$  дает S - образную изотерму адсорбции (рис.1.13,в), а при  $Q_a < E$  - островковую изотерму адсорбции (рис.1.13,г). Для островковой изотермы адсорбции поглощение молекул газа на занятой поверхности более вероятно, чем на свободной. Это приводит к образованию участков поверхности с многослойными покрытиями. При  $p \rightarrow 0$  выражение (1.56) при  $b = C/p_T$  совпадает с (1.53), что с учетом (1.54) позволяет установить связь между давлением насыщенных паров и теплотой конденсации. Уравнение (1.56) при a = G/A можно преобразовать к виду

$$\frac{p/p_T}{1-p/p_T} = \frac{G}{a_m CA} + \frac{G(C-1)p}{Aa_m Cp_T}$$

где *G* - общее количество поглощенного газа; *A* - полная поверхность адсорбента. Обрабатывая экспериментальные данные G = f(p) в координатах  $\frac{p/p_T}{1-p/p_T} \hat{e} p/p_T$ , относительно которых записанное уравнение линейно, можно найти две константы *A* и *C*, которые позволяют рассчитать площадь поверхности и теплоту адсорбции.

Реальные поверхности конструкционных вакуумных материалов имеют адсорбционные центры с различными теплотами адсорбции. Изотерма адсорбции паров воды для них подчиняется уравнению Френдлиха.

$$\theta = dp^m, \tag{1.57}$$

где  $\theta$  – степень покрытия, p – давление, а d и m – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Уравнение (1.57) может быть получено из уравнения (1.53), если принять линейную зависимость теплоты адсорбции от логарифма степени покрытия в следующем виде:

$$Q_a = Q_1 - K_Q lg\theta, \qquad (1.58)$$

где  $Q_1$  – теплота адсорбции при  $\theta$  = 1, а  $K_Q$  - коэффициент пропорциональности .



Рис.1.15. Энергия адсорбции паров воды на нержавеющей стали в зависимости от степени покрытия ( $a_M = 2.10^{-2} \text{ м}^3 \Pi a/\text{м}^2$ )

На рис.1.15 показана зависимость (1.58) для воды на нержавеющей стали. Из (1.53), (1.57), (1.58) следует (вывод в приложении П2.5):

$$K_{\varrho} = \frac{RT(1-m)}{0.43m},$$

$$Q_{1} = RT \ln(d^{\frac{1}{m}}/C),$$
где  $C = \frac{10^{-13} \cdot \gamma}{a_{M}\sqrt{2\pi m kT}},$  здесь  $a_{M}$  в м<sup>3</sup>Па/м<sup>2</sup>. (1.59)

Используя то, что для многих молекул теплота адсорбции (1.58) не зависит от температуры, можно пересчитать коэффициенты уравнения Френдлиха для произвольной температуры.

$$m(T) = \frac{RT}{RT + 0.43K_{\varrho}},$$
$$d(T) = C^{m} \exp(\frac{Q_{1} \cdot m}{RT})$$

Изотермы адсорбции (рис. 1.16) паров воды на нержавеющей стали рассчитаны для различных температур по одной экспериментальной изотерме для комнатной температуры. Коэффициенты уравнения (1.57) приведены в таблице 1.4.

Коэффициенты изотермы адсорбции Френдлиха для паров воды на нержавеющей стали

Т, К	d	m	Р, Па при $\tau_a = 1$
273	1,75	0,28	9,5.10-6
298	1	0,30	3,3.10-6
398	0,13	0,36	4,7.10 <sup>-8</sup>
498	2,3.10 <sup>-2</sup>	0,42	6,2.10 <sup>-10</sup>
598	5,2.10 <sup>-3</sup>	0,46	7,8.10 <sup>-12</sup>

при различных температурах

Давления, соответствующие  $\tau_a$ =1 в таблице 1.4 и время адсорбции при различных давлениях (Рис.1.16,б), с учетом (1.58) рассчитаны по уравнению (1.42). Практически всегда время адсорбции мало по сравнению со временем испытаний.



Рис.1.16. Адсорбции паров воды на нержавеющей стали: а – изотермы, б – время адсорбции: 1 – 273 K, 2 – 298 K, 3 – 398 K, 4 – 498 K, 5 – 598 K

В тех случаях, когда за время эксперимента не достигается адсорбционное равновесие, значения степени покрытия могут в зависимости от начальных условий быть больше или меньше равновесных. Для определения зависимости  $\theta$  от времени нужно решить дифференциальное уравнение мономолекулярной адсорбции (1.56). Это уравнение можно преобразовать к виду

$$\frac{d\theta}{dt} + A\theta - B = 0, \qquad (1.60)$$

где  $A = \frac{1}{\tau} + \frac{\gamma p}{a_m \sqrt{2\pi m k T}}; B = \frac{\gamma p}{\sqrt{2\pi m k T}}.$ 

Решение уравнения (1.60)) при начальных условиях t = 0,  $\theta = \theta_0$  имеет вид,

$$\theta = \frac{B}{A}(1 - \exp(-At)) + \theta_0 \exp(-At).$$
(1.61)

Его можно переписать следующим образом :

$$\theta = \frac{bp}{1 + bp} (1 - \exp(-At)) + \theta_0 \exp(-At).$$
(1.62)

При  $t \rightarrow \infty$  равновесная степень покрытия

$$\theta_{\infty}=\frac{a_{\infty}}{a_m}=\frac{bp}{1+bp},$$

что совпадает с (1.55).

Если принять за равновесное состояние  $a = 0,99 a_{\infty}$ , то время достижения сорбционного равновесия при начальном условии  $\theta_0 = 0$ 

$$t_{\delta} = 4.6 / A = 4.6 / \left[\frac{p}{a_m \sqrt{2\pi m kT}} + \frac{\exp(-Q_{\star} / RT)}{\tau_0}\right].$$
(1.63)



Рис.1.17. Адсорбции паров масла при комнатной температуре: а - изотерма, б - кинетическая кривая

На рис. 1.17,а показана, рассчитанная по уравнению (1.56) при температуре 293 К, изотерма адсорбции паров вакуумного масла, имеющего теплоту адсорбции  $Q_a = 96$  МДж/кмоль, теплоту конденсации E = 80 МДж/кмоль и давление насыщенных паров  $p_T = 10^{-5}$  Па.

При адсорбции азота на графите для  $p = 1,33.10^4$  Па; T = 293 K;  $a_m = 9,6.10^{18}$   $i^{-2}$ ;  $\gamma = 1$ ;  $\tau_0 = 10^{-13}c$  получим  $t_0 = 3.10^{-11}c$ , что говорит о том, что при высоких давлениях или температурах адсорбционное равновесие устанавливается практически мгновенно.

При низких давлениях или температурах адсорбционное равновесие устанавливается достаточно медленно. Так, для паров масла (M = 422 кг/кмоль) при  $p = 1,3.10^{-9}$ Па; T = 298 К;  $Q_a = 96$  МДж/кмоль;  $a_m = 6,67.10^{17}$  1/м<sup>2</sup> получим  $t_d = 10^5 c$ , т.е. величину, соизмеримую с временем испытаний (рис.1.17,6).

Зависимость скорости десорбционного газовыделения от времени можно найти, дифференцируя по времени (1.61)

$$q_{\partial} = a_m \, d\theta/dt = a_m (B - \theta_0 A) exp(-At)$$

В этом уравнении  $q_{\partial}$  измеряется числом молекул, выделяющихся с единицы поверхности в единицу времени. При равновесии ( $q_{A} = 0$ ) степень покрытия  $\theta = B/A$ . Для того, чтобы происходила десорбция должно выполняться условие  $\theta_{0} > B/A$ . Уравнение можно преобразовать к виду, удобному для обработки экспериментальных данных

$$lgq_{\pi} = lg(a_m(B-\theta_0))-0,43At$$

Это уравнение не учитывает объем и площадь внутренней поверхности вакуумной камеры, наличие насоса, обеспечивающего откачку камеры.

#### 1.8. Растворение газов в твердых телах

Концентрация газов, растворенных в твердом теле, зависит от температуры, давления и типа кристаллической решетки. В металлах, для которых характерна гомополярная металлическая связь между электроположительными атомами, зависимость растворимости от давления и температуры имеет следующий вид:

$$s = s_0 p^{1/n} \exp\left(\pm \frac{Q_s}{nRT}\right). \tag{1.64}$$

где n – число атомов в молекуле газа;  $Q_s$  – энергия активации при растворении;  $s_0$  – постоянный коэффициент.



"+" Знак в формуле (1.64)характерен для газов, образующих с металлом химическое соединение, а знак "-" — для газов, образующих истинные Растворимость растворы. газов. образующих истинные растворы, с повышением температуры возрастает(Н<sub>2</sub> в Cu, Fe и Ni), а образующих химические соединения – уменьшается (H<sub>2</sub> в Ti). Растворимость *s*, показанная на рис. 1.18, рассчитывается как отношение числа атомов водорода к числу атомов металла.

Отметим также, что растворимость водорода в Ті значительно больше, чем в Ni, Fe и Cu. При атмосферном давлении в 1 см<sup>3</sup> нержавеющей стали растворяется 1 нсм<sup>3</sup> газов.

Зависимость растворимости газов в металлах от давления представляет собой степенную функцию с показателем степени 1/n. Это связано с тем, что газы растворяются в металлах в атомарном состоянии и перед растворением происходит диссоциация молекул на атомы. Например, для кислорода n = 2, а реакция диссоциации имеет вид  $O_2 \leftrightarrow O + O$ . По закону действующих масс, константа равновесия такой реакции  $K_c = p_0^2/p_{O2}$ ;  $p_0$  и  $p_{O2}$  – давления атомарного и молекулярного кислорода, откуда следует:

$$\mathsf{p}_0 = \sqrt{\mathsf{K}_{\rm c} \cdot \mathsf{p}_{02}} \tag{1.65}$$

Растворимость газов в металлах пропорциональна давлению диссоциированного газа. Для двухатомных молекул это равносильно пропорциональности корню квадратному из давления газа над поверхностью металла.

В неметаллах, атомы кристаллической решетки которых связаны между собой ионной или ковалентной связью, растворение газов происходит в молекулярном состоянии. Образуются истинные растворы, и зависимость растворимости газов от температуры и давления имеет вид:

$$s = s_0 p \exp\left[-\frac{Q_s}{RT}\right],\tag{1.66}$$

где  $Q_s$ - энергия активации при растворении;  $s_0$ - постоянный коэффициент.

Значения постоянных  $s_0$  и Qs, характеризующих растворимость основных газов в металлах и неметаллах, и значения растворимости *s* приведены в табл. С11.

Абсорбционный процесс растворения газов в твердых телах осуществляется за счет диффузии молекул газа в кристаллическую решетку или по границам зерен. Диффузионный поток пропорционален градиенту концентрации. Так как для стационарного газового потока через стенку толщиной 2h градиент концентрации  $ds/dx = (s_1-s_2)/(2h)$ , то

$$q = -D\frac{ds}{dx} = -D\frac{s_1 - s_2}{2h},$$
 (1.67)

где *q*- число молекул, проходящих в единицу времени через единицу площади поперечного сечения в направлении оси *x*; *D*- коэффициент диффузии; *s*<sub>1</sub> и *s*<sub>2</sub>- концентрации газа на границах стенки. Коэффициент диффузии *D* сильно возрастает при повышении температуры

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{Q_D}{nRT}\right].$$

здесь  $Q_D$ - энергия активации при диффузии; *n*- число атомов в молекуле газа для металлов, для неметаллов n = 1;  $D_0$ - коэффициент пропорциональности, не зависящий от температуры. Значения  $D_0$  и  $Q_D$  при диффузии газов в конструкционных материалах,

приведенные в табл. С12, нужно рассматривать как приближенные в связи с тем, что на них влияют внутренние напряжения в материале. В тех случаях, когда диффузия происходит в основном по границам зерен и дефектам упаковки, необходимо дополнительно учитывать характер механической обработки, размеры и ориентацию кристаллов.

Подставляя в (1.67) приведенную выше зависимость для *D* и *s* из (1.64), получим выражение для газопроницаемости металлов

$$q = K_0 \frac{p_2^{1/n} - p_1^{1/n}}{2h} \exp\left[-\frac{Q_D \pm Q_S}{nRT}\right],$$
 (1.68)

где  $K_0 = D_0 S_0$ - константа проницаемости.

Проницаемость водорода, например, через стенку из нержавеющей стали толщиной 1 мм при 298 К составляет 10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>·Па/(с·м<sup>2</sup>).

Если градиент концентрации изменяется во времени, то в единице объема твердого тела происходит изменение концентрации вещества, описываемое дифференциальным уравнением нестационарной диффузии

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}.$$

Это уравнение при Z = x/R, где R– эффективный размер детали, можно записать в виде

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2},$$

где  $\tau = Dt/R^2$  называется безразмерным временем диффузии. При  $\tau \approx 1$  для деталей любых форм устанавливается абсорбционное равновесие. Таким образом, время установления абсорбционного равновесия

$$t_P = \frac{R^2}{D} \,. \tag{1.69}$$

Для водорода в нержавеющей стали при комнатной температуре  $D = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ . В детали с характерным размером *R*=1 мм равновесие установится за 100 часов.

## 1.9. Электрические явления

При наличии разности потенциалов прохождение электрического тока через разреженные газы связано с перемещением электронов и положительных ионов. При отсутствии электрического поля энергетическое распределение электронов, ионов и нейтральных молекул одинаково.

Среднюю длину свободного пути электронов в вакууме можно вычислить, так же как и для молекул, по формуле (1.31), учитывая, что масса и диаметр электрона значительно меньше, чем у молекулы газа. Формулу (1.31) можно упростить:

$$L_{\dot{Y}} = \frac{4}{\pi n_2 d_{T2}^2},\tag{1.70}$$

здесь  $n_2$  – концентрация молекул газа;  $d_{T2}$  – эффективный диаметр молекулы газа;  $L_{3}$  – средняя длина свободного пути электронов.

Сравнивая (1.70) с формулой для определения средней длины свободного пути молекул газа (1.24), можно заметить, что длина свободного пути электронов не зависит от их концентрации. При одной и той же концентрации молекул газа длина свободного пути электронов в 5,6 раза больше, чем у молекул газа или положительных ионов.

Ионизация молекул остаточных газов с образованием свободных электронов и положительных ионов возможна при воздействии на молекулу α-, β- или γ- излучения с



Рис.1.19. Зависимость эффективности ионизации электронной бомбардировкой от ускоряющего напряжения

энергией, превышающей энергию ионизации соответствующих газов (табл. С13).

Наиболее часто для ионизации остаточных газов используется электронная бомбардировка. Процесс ионизации остаточных газов численно характеризуется эффективностью ионизации молекул  $\varepsilon$ , т.е. числом пар ионов, образованных одним электроном на пути в 1 м при давлении 1 Па. Зависимость  $\varepsilon$  от ускоряющего напряжения



Рис.1.20. Зависимость пробивного напряжения от произведения давления газа на расстояние между электродами

(рис. 1.19) имеет характерный максимум, соответствующий энергиям электронов 100..150 эВ. Молекулы с большим атомным числом имеют более высокие значения эффективности ионизации. Под действием разности потенциалов U<sub>э</sub> ионы и электроны дополнительно к тепловой энергии 3kT/2 получают энергию  $qU_{2}$ , где q – элементарный Температура заряд. среды, сообщающая частицам энергию, равную энергии заряженных частиц, движущихся под воздействием электрического поля,  $T = 2qU_{2}/(3k)$ . Можно подсчитать, что электроны,

ускоренные разностью потенциалов 1 В, имеют энергию такую же, как при температуре 7800 К без электрического поля,  $1 \Rightarrow B = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Электропроводность газового промежутка при самостоятельном разряде (без дополнительных ионизирующих излучений) зависит от давления. Газ всегда содержит свободные электроны, появляющиеся, например, при взаимодействии с космическим излучением. При низком вакууме в связи с малой длиной свободного пути эти электроны под воздействием электрического поля не успевают приобрести энергию, необходимую для ионизации молекул газа. Электропроводность газа в таких условиях мала. При высоком вакууме в связи с малым количеством заряженных частиц электропроводность газового промежутка также мала. В области среднего вакуума наблюдаются наибольшие значения электропроводности газа. В этих условиях свободные электроны осуществляют ионизацию молекул остаточных газов, а образующиеся при этом вторичные электроны поддерживают самостоятельный заряд.

Электросопротивление газового промежутка может характеризоваться пробивным напряжением U<sub>пр</sub>, которое зависит от природы газа, расстояния между электродами и давления. Пробивное напряжение зависит от произведения давления газа на расстояние между электродами, а не от каждого из этих параметров в отдельности. Зависимость пробивного напряжения от произведения *p.d*, где *d* – расстояние между электродами,

показано на рис. 1.20 и имеет характерный минимум в области среднего вакуума. Эта зависимость известна под названием кривой Пашена.

Прохождение электрического тока через разреженные газы в области среднего вакуума сопровождается свечением газа, зависящим от рода газа и давления. Это явление используется для качественного определения давления и состава газа. При давлениях порядка  $10^3$  Па разряд появляется между электродами в виде тонкого шнура, который при давлениях около  $10^2$  Па заполняет всю разрядную трубку. При этом в разряде от катода к аноду можно выделить несколько характерных областей: катодное темное пространство (Астона); светящийся слой, создающий катодное свечение; темное пространство (Крукса); зона отрицательного свечения; темная зона (Фарадея); положительный столб; анодное темное пространство.

Положительный столб имеет интенсивное свечение, по цвету которого можно судить о роде газа, заполняющего разрядный промежуток; воздух светится голубым цветом, кислород – желтым, азот – оранжевым, гелий – розовым, пары воды – голубоватобелым, аргон – фиолетовым, неон – красным.

Давление остаточных газов и связанная с ним степень покрытия поверхности молекулами адсорбированных газов оказывает сильное влияние на электронную эмиссию твердых тел. Средняя энергия электронов в твердом теле называется энергией Ферми (уровень Ферми). Эмиссии электронов из твердых тел препятствует энергетический барьер, называемый работой выхода электронов. Для большинства металлов работа выхода электронов находится в пределах от 2 до 6 эВ (см. табл.С12). Адсорбция газов или паров на поверхности изменяет работу выхода пропорционально степени покрытия (см. рис.1.21). При этом работа выхода электрона из материала с покрытием может понижаться или повышаться в зависимости от выбранных материалов подложки и покрытия. Для цезия на вольфраме работа выхода снижается на 2,7 эВ, а для азота на вольфраме – повышается на 0,5 эВ. Электроны, которые приобрели энергию больше суммы энергии Ферми и работы выхода, могут покинуть твердое тело. Зависимость плотности эмиссионного тока от температуры:

$$j = AT^2 \exp(-\varphi/kT), \tag{1.71}$$

где j – плотность тока, А/см<sup>2</sup>; T – абсолютная температура, К;  $\phi$  – работа выхода, Дж;  $k = 1,23 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $A \approx 120$  А / (см<sup>2</sup>.К<sup>2</sup>).

При высоких напряженностях электрического поля возникает вероятность прохождения электронами потенциального поверхностного барьера ( тунельный эффект). Такая эмиссия электронов называется автоэлектронной и подчиняется уравнению

$$j = \frac{4\sqrt{\mu/\phi}}{\mu+\phi} \cdot \frac{e^3 E^2}{8\pi h\phi} \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2}m\phi^{3/2}}{3heE}\right),\tag{1.72}$$



Рис.1.21. Работа выхода электронов в зависимости от степени покрытия:φ<sub>1</sub> - работа выхода из материала подложки,φ<sub>2</sub> - работа выхода из материала покрытия

где *E*– напряженность электрического поля; *e*– заряд электрона; *h*– постоянная Планка; μ– энергия Ферми; φ– работа выхода.

 $10^{2}$  $A/cm^2$ Плотности тока возникают напряженностях при  $10^{7}$ В/см. электрического поля Автоэлектронная эмиссия используется в автоэлектронном микроскопе, имеющем эмиттер радиусом меньше 0,1 мкм. Если эмиттером между И экраном ИЗ

люминофора приложить разность потенциалов в несколько тысяч вольт, то электроны начнут эмиттировать из катода и направляться на экран. Поликристаллическая поверхность имеет разную работу выхода на гранях с различными кристаллографическими направлениями. Адсорбция газовых молекул также изменяет работу выхода отдельных частей катода. Неоднородность плотности электронного тока по поверхности экрана приводит к появлению изображения. На экране можно получить увеличенное в 10<sup>6</sup> раз изображение тонкого конца катода.

Автоэлекронный микроскоп позволяет наблюдать изменения поликристаллической структуры поверхности в результате поверхностной диффузии атомов вольфрама при температуре более 1400 К. Миграция атомов бария на поверхности вольфрама можно наблюдать при температуре более 400 К. Кислород, водород, азот и многие другие газы,

адсорбируясь на поверхности катода, могут вызывать изменение его эмиссионных характеристик.

При изменении полярности электрического поля между экраном и острием, когда экран становится катодом, устройство продолжает работать уже как ионный микроскоп. Атомы, например гелия, бомбардирующие острие, теряют в результате поверхностной ионизации электроны, а образовавшиеся положительные ионы движутся к экрану. Различная эффективность поверхностной ионизации отдельных участков катода позволяет получать на экране изображение поверхности с разрешением до размера отдельных атомов.

Пучки электронов с энергиями 10..200 эВ, взаимодействуя с поверхностью, проникают лишь на глубину нескольких атомных слоев. Дифракция отраженных электронов позволяет получать на экране изображение поверхностных структур адсорбированных слоев. В аппаратуре для изучения свойств поверхности при помощи дифракции медленных электронов для разделения первичного и вторичного пучков используется отклонение электрическим и магнитным полями. Вторичный пучок дополнительно ускоряется для получения качественного изображения на люминофорном экране.

При бомбардировке поверхности пучками электронов или ионов возникает вторичная электронная эмиссия. Причинами ее возникновения являются: отражение первичного пучка электронов ,передача свободным электронам энергии, достаточной для диффузии к поверхности и преодоления работы выхода, переходами электронов между их энергетическими уровнями в твердом теле.

Энергия отраженных электронов может быть равна энергии первичных электронов. Энергия вторичных электронов, диффундирующих из объема твердого тела, находится в пределах от 1 до 5 эВ. Энергия электронов, возникающих в результате энергетических переходов (Оже-электроны), зависит от типа материала эмиттера. Она находится в пределах от 10 до 20 эВ. Анализ энергетических спектров Оже-электронов позволяет получить сведения о составе и количестве элементов на поверхности. Она сильно зависит от адсорбции газов и позволяет наблюдать образование малых долей

мономолекулярного слоя, что делает ее полезным инструментом для поверхностных исследований в сверхвысоком вакууме.

Пока не существует теории, позволяющей на основании фундаментальных свойств материалов рассчитывать эффективность вторичной электронной эмиссии. Она определяется экспериментально как число вторичных электронов, образованных одной первичной частицей. Этот коэффициент имеет максимум при изменении энергии первичных частиц (табл.С13).

Изолированная мишень в вакууме, находящаяся под плавающим потенциалом, может приобрести положительный и отрицательный заряд в зависимости от энергии первичных электронов. При коэффициенте вторичной электронной эмиссии большем единицы мишень будет заряжаться положительно, а в противоположном случае отрицательно.

# 1.10. Контрольные вопросы

1.1. Как изменится формула для расчета давления газа, если скорость молекул, вылетающих с поверхности, будет в два раза меньше скорости молекул, ударяющихся о поверхность?

1.2. Чем определяется максимальная теоретическая быстрота откачки вакуумных насосов?

1.3. От чего зависит величина средней длины свободного пути молекул газа?

1.4. Какие допущения используются при выводе функции распределения молекул газа по скоростям и энергиям?

1.5. Какова степень покрытия поверхности молекулами азота и кислорода при комнатной температуре и атмосферном давлении?

1.6. Чем отличается физическая адсорбция от хемосорбции; почему при хемосорбции происходит поглощение только одного мономолекулярного слоя газа?

1.7. Назовите основные допущения мономолекулярной и полимолекулярной теорий адсорбции.

1.8. Чем отличаются закономерности растворимости газов в конструкционных и геттерных материалах?

1.9. Какова природа адсорбционных сил, какой из эффектов межмолекулярного взаимодействия при адсорбции является основным для полярных молекул?

1.10. Каковы закономерности испарения молекул с поверхности твердого тела?

1.11. Как формулируется закон косинуса для испарения молекул?

1.12. В чем различие между плоским и точечным источниками испарения?

1.13. Какме параметры определяют время адсорбции?

1.14. Какова связь между давлением насыщенных паров и содержанием компонет в сплавах?

1.15. Почему длина свободного пути электрона при одинаковой температуре и давлении больше, чем молекул газа?

1.16. Что такое эффективность ионизации молекул газа?

1.17. От чего зависит пробивное напряжение вакуумного промежутка?

1.18. Каковы основные закономерности термоэлектронной эмиссии ?

1.19. Каковы основные закономерности автоэлектронной эмиссии?

1.20. При каких давлениях возникает световое излучение в газовом разряде?

# 1.11.Задачи

- 1.1. Как изменится давление газа, если при неизменном объеме и температуре половину молекул азота заменить на молекулы водорода?
- 1.2. При нагревании газа на 10 К при постоянном давлении объем его увеличивается в 2 раза. В каком интервале температур происходит нагревание?
- 1.3. Во сколько раз изменится средняя длина свободного пути молекул азота при изменении температуры от 700 до 350 К?
- 1.4. В баллоне емкостью 10 л при температуре 17<sup>0</sup> С давление водорода составляло 10<sup>-2</sup> Па. После охлаждения баллона до 7<sup>0</sup> С через 1 час манометр на баллоне показывал такое же давление. Какой газовый поток натекал в баллон?
- 1.5. Определить давление в вакуумной камере объемом 100 л, если при температуре
   298 К в ней содержится 10<sup>5</sup> молекул азота /m=4,65.10<sup>-26</sup> кг/.
- 1.6. В вакуумной камере объемом 1 м<sup>3</sup> при температуре 293 К получено давление 10<sup>-9</sup> Па. Определить сколько молекул газа осталось в камере ?
- 1.7. Определить быстроту откачки азота вакуумным насосом, имеющим диаметр входного отверстия 0,01 м, при температуре 300 К, если коэффициент захвата молекул во входном отверстии равен 0,5.
- 1.8. Во сколько раз изменится время адсорбции молекул воды на поверхности нержавеющей стали, при изменении температуры от 300 до 77 К, если теплота адсорбции равна 80 МДж / кмоль?
- 1.9. Какое давление азота установится в сосуде (V = 4 л), половина объема котрого заполнена 1 кг цеолита СаА, при его охлаждении от 293 до 77 К, если коэффициенты адсорбируемости цеолита СаА по азоту равны: 10<sup>3</sup> для T = 298 K, 10<sup>6</sup> для T = 77 К?
- 1.10. Определить диаметр сферической вакуумной камеры, давление паров воды в которой возрастает в два раза при повышении температуры от 300 до 500 К, если вероятность конденсации на свободную поверхность равна 1, справедлив закон Генри для адсорбции, а теплота адсорбции равна 80 МДж / кмоль.

- 1.11. Рассчитать время установления адсорбционного равновесия азота в сосуде объемом 1 л после быстрого нагрева нити диаметром 0,1 мм и длиной 10 мм, если теплота адсорбции равна 12 МДж/кмоль.
- 1.12. Рассчитать время регенерации при комнатной температуре азотной ловушки, имеющей площадь охлаждаемой поверхности 10<sup>4</sup> см<sup>2</sup> и объем 10 л при откачке остаточных газов с теплотой адсорбции 12 МДж / кмоль, если производительность откачки насоса 10<sup>-4</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / с, а начальное давление равно 10<sup>-2</sup> Па.
- 1.13. Как измениться давление азота в герметичной вакуумной камере объемом 1 л после ее нагрева до 1000 К, если начальное давление равно 10<sup>-6</sup> Па, начальная температура 300 К, а теплота адсорбции 12 МДж / кмоль?
- 1.14. Какова степень покрытия поверхности нержавеющей стали молекулами воды при давлении 10<sup>-3</sup> Па, температуре 298 К, если теплота адсорбции равна 80 МДж / кмоль.
- 1.15. Какое минимальное давление можно получить при откачке сферической камеры диаметром 1 м идеальным насосом, обеспечивавшим в камере быстроту откачки 1 м<sup>3</sup> / с, при удельном газовыделении 10<sup>-6</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / (м<sup>2</sup>.с)?
- 1.16. Какую минимальную толщину стенки вакуумной камеры из нержавеющей стали можно принять из условия равенства проходящих через нее потоков газовыделения и газопроницаемости?
- 1.17. Какова погрешность толщины покрытия на квадратной пластинке площадью 0,01 м<sup>2</sup>, расположенной симметрично на расстоянии 0,25 м над точечным источником испаряемого материала.

# Глава 2. Теоретические основы

## 2.1. Степени вакуума

Понятие вакуума как состояния газа может быть расширено разделением его по степеням в зависимости от характера протекания различных физических процессов. Многие физические процессы в вакууме сильно зависят от соотношения числа столкновений молекул друг с другом и со стенками вакуумной камеры.

Частота столкновений между молекулами  $K_{\rm M}$  обратно пропорциональна средней длине свободного пути:  $K_{\rm M} = v_{\rm a}/L$ . Из общего числа соударений молекул со стенками камеры (Рис. 2.1)  $nv_{\rm a}F/4$ , приходящихся на находящихся внутри камеры nV молекул, легко рассчитать среднее число соударений в единицу времени одной молекулы со стенкой:  $K_{\rm c} = v_{\rm a}F/(4V) = v_{\rm a}/d_{\rm sp}$ , где F – площадь поверхности стенок, соприкасающихся с разреженным газом; V – объем камеры;  $d_{\rm sp} = 4V/F$  – эффективный размер вакуумной камеры.

Для молекул газа внутри сферического сосуда диаметром D эффективный размер камеры  $d_{9\phi} = 2/3D$ , для трубы бесконечной длины с диаметром D получим  $d_{9\phi} = D$ , а для двух бесконечных параллельных поверхностей, расположенных на расстоянии D друг от друга,  $-d_{9\phi} = 2D$ .



Рис.2.1. Вакуумная камера произвольной формы

Отношение *К<sub>c</sub>/К<sub>м</sub>* называется критерием Кнудсена.

$$\mathrm{Kn} = K_c / K_{\scriptscriptstyle M} = L / d_{\scriptscriptstyle \Im \phi}. \qquad (2.1)$$

В зависимости от значения этого критерия различают вакуум низкий, средний и высокий.

Низкий вакуум – это состояние газа, при котором взаимные столкновения между молекулами преобладают над столкновениями молекул газа со стенками вакуумной камеры. Такое состояние газа соответствует условию Kn << 1. Обычно принимают Kn  $< 5 \cdot 10^{-3}$ . При этом длина свободного пути молекул газа значительно меньше размеров вакуумной камеры. Течение газа в низком вакууме происходит в вязкостном режиме. Проводимость трубопровода пропорциональна давлению и зависит от его диаметра в четвертой степени. Вязкость и теплопроводность газов не зависит от давления. Коэффициент самодиффузии в газах уменьшается обратно пропорционально давлению. При напылении в низком вакууме столкновения молекул газа с молекулами распыляемого вещества не дают возможность получить на стенках камеры изображение экрана, поставленного на пути молекулярного пучка.

Средний вакуум – это состояние газа, когда частоты соударений молекул друг с другом и со стенками вакуумной камеры одинаковы, при этом  $L \approx d_{3\phi}$ , а Кп  $\approx 1$ . Обычно принимают:  $5 \cdot 10^{-3} < \text{Kn} < 1,5$ . Физические явления в этой области вакуума имеют переходный характер, наблюдаются наилучшие условия для электрического пробоя, свечения и ионизации газов.

Высокий вакуум – это состояние газа, при котором столкновения молекул газа со стенками вакуумной камеры преобладают над взаимными столкновениями молекул газа. При этом Kn > 1. Обычно принимают Kn > 1,5. Течение газа происходит в молекулярном режиме. Проводимость трубопровода зависит от его диаметра в третьей степени и не зависит от давления. Коэффициенты вязкости и теплопроводности пропорциональны давлению. Самодиффузия в газах не зависит от давления. Изображение экрана, поставленного на пути молекулярного пучка, получается отчетливым.

Во всех степенях вакуума изменением температуры можно выделить области, при которых поверхности находящегося в нем твердого тела имеют различные степени покрытия  $\theta$ : низкую ( $\theta \ll 1$ ), среднюю ( $\theta \approx 1$ ) и высокую ( $\theta \gg 1$ ). Специальное название получила область высокого вакуума, при которой наблюдается низкая степень покрытия поверхности. Она называется сверхвысоким вакуумом и характеризуется двумя условиями Kn > 1,5;  $\theta < 5 \cdot 10^{-3}$ . При этом число адсорбированных молекул мало, и можно определять поверхностные свойства чистых материалов, что важно для различных областей науки и техники.

В литературе встречается упрощенная классификация степеней вакуума в зависимости только от давления. Эта классификация имеет смысл только для

вакуумных сосудов определенной геометрической формы. В противном случае в вакуумных расчетах могут быть допущены значительные ошибки.

## 2.2. Явления переноса

Вязкость, теплопроводность и диффузия в газах объединяются общим названием явления переноса. Вязкость или внутреннее трение в газах определяется переносом количества движения, теплопроводность газа - энергии, диффузия - молекулярной концентрации. Явления переноса зависят от степени вакуума. Стационарная скорость переноса физической величины *А* 

$$\frac{dA}{dt} = V_{q^{\Delta}} AS, \qquad (2.2)$$



Рис.2.2. Расчетная схема для определени коэффициента вязкости газа

где  $V_q$ - объем газа, участвующий в переносе в единицу времени на единице площади поверхности переноса;  $\Delta A$  - разность значений переносимой физической величины в единице объема газа для двух соседних слоев переноса: S - площадь поверхности переноса.

В области низкого вакуума газ, находящийся между

поверхностями переноса 1 и 2 (Рис.2.2), можно разделить на слои толщиной, равной средней длине свободного пути. Разность переносимой физической величины в двух соседних слоях

$$\Delta A = 2L \frac{dA}{dx}.$$
 (2.3)

Установившаяся скорость переноса (2.2) с учетом (2.3) может быть представлена в виде

$$\frac{dA}{dt} = R\frac{dA}{dx},\tag{2.4}$$

где *R*-коэффициент переноса. С учетом выражения (1.35)

$$R = v_a L/2. \tag{2.5}$$

При движении поверхности 2 (рис.2.2) относительно поверхности 1 со скоростью  $v_{\rm n}$  между слоями газа возникает перенос количества движения. Сила внутреннего трения или вязкость газа определяется по формуле (2.4) при  $A = nmv_n$ .

$$F = -\eta \frac{dv_i}{dx} S, \qquad (2.6)$$

где η- коэффициент динамической вязкости. Знак минус появился в связи с тем, что сила трения и скорость переноса имеют противоположные направления. Учитывая (2.5), для низкого вакуума получим

$$\eta_t = \frac{v_a Lnm}{2}.$$
 (2.7)

Принимая во внимание, что средняя длина свободного пути (1.29) обратно пропорциональна, а молекулярная концентрация (1.10) прямо пропорциональна давлению газа, можно сделать вывод, что коэффициент динамической вязкости газа при низком вакууме не зависит от давления газа. Используя (1.10),(1.18) и (1.25), преобразуем (2.7) к виду

$$\eta_i = \frac{\sqrt{mkT}}{\pi^{3/2} d_m^2 (1 + C/T)}$$

(2.8)

Из полученного выражения следует, что  $\eta_{\rm H}$  зависит от температуры  $T^{\rm x}$ ,где x изменяется от 1/2 при высоких температурах (*T*>>*C*) до 3/2 при низких температурах (*T*<<*C*). Значения коэффициентов динамической вязкости для некоторых газов при температуре 273 К даны в табл. С14.

Коэффициентом кинематической вязкости газа называется отношение коэффициента динамической вязкости и плотности газа.

Теплопроводность газов связана с переносом энергии. Энергия, заключенная в единице объема газа равна  $c_v n \cdot m \cdot T$ , где теплоемкасть газа при постоянном объеме можно рассчитать по формуле

$$c_{\nu} = \frac{k}{(\gamma - 1)m},\tag{2.9}$$

здесь  $\gamma = c_p/c_V$ , для одноатомных газов  $\gamma = 1,66$ ; для двухатомных  $\gamma = 1,4$ ; для трехатомных  $\gamma = 1,3$  (табл.С15).

Уравнение стационарной теплопроводности газа может быть получено из (2.4) при  $A = c_v \cdot n \cdot m \cdot T$ . Перенос тепла молекулами газа

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx}S,$$
 (2.10)

где λ- коэффициент теплопроводности газа. Направление переноса тепла и градиента температуры противоположны. При низком вакууме

$$\lambda_i = c_V \cdot \eta_i. \tag{2.11}$$

Коэффициент теплопроводности газа при низком вакууме не зависит от давления газа так же, как и коэффициент динамической вязкости, и имеет с ним одинаковую температурную зависимость. Подставляя (2.8) и (2.9) в (2.11), получим

$$\lambda_{i} = \frac{k^{3/2}T^{1/2}}{d_{m}^{2}(1+C/T)(\gamma-1)\pi^{3/2}m^{1/2}}.$$

(2.12)

Коэффициенты теплопроводности некоторых газов при низком вакууме приведены в таб. С15. Теплопередача через газовый промежуток в низком вакууме может происходить, кроме теплопроводности, также за счет конвекции и излучения.

Перенос теплоты конвекцией от поверхности нити, нагретой до температуры *T<sub>н</sub>* к стенкам вакуумной камеры, имеющим температуру *T*, описывается уравнением

$$E_{\rm K} = \alpha (T_{\rm H} - T) A, \qquad (2.13)$$

где а - коэффициент теплообмена; *А* - площадь поверхности нити.

При свободной конвекции из-за силового воздействия гравитационного поля на газ, имеющий различную плотность вследствие температурных градиентов, коэффициент теплообмена

$$\alpha_{\rm c} = a \, p^{2/3} \, (T_{\rm H} - T), \tag{2.14}$$

где *а* - экспериментальный коэффициент, зависящий от материала и формы поверхности. Коэффициент теплообмена в условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании нити для воздуха

$$\alpha_{\rm B} = {\rm Nu}.\lambda/d,$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газа; d - характерный размер (диаметр нити); Nu =  $k_1 \text{Re}^{k_2}$  - критерий Нуссельта; Re =  $v_{\Gamma} d.\rho/\eta$  - критерий Рейнольдса;  $v_{\Gamma}$  - скорость газового потока;  $k_1$  и  $k_2$  - константы, зависящие от числа Re:  $k_1 = 0,45$ ;  $k_2 = 0,5$  при Re<10<sup>3</sup> и  $k_1 = 0,245$ ;  $k_2 = 0,6$  при Re  $\ge 10^3$ .

Теплопередачу излучением в низком вакууме можно определить по закону Стефана - Больцмана:

$$E_{e} = 5.7R_{e} \left[ \left( \frac{T_{1}}{100} \right)^{4} - \left( \frac{T_{2}}{100} \right)^{4} \right] R_{\tilde{a}}, \qquad (2.15)$$

где  $E_{\mu}$  - плотность теплового потока,  $BT/M^2$ ;  $T_1$ ,  $T_2$  - температуры внешней и внутренней поверхности переноса;  $R_{\Gamma}$  - геометрический фактор (для параллельных плоскостей и концентричных цилиндрических оболочек  $R_{\Gamma}=1$ );  $R_{e}$ - приведенная степень черноты:

$$R_e = \frac{1}{1/e_2 + (A_2/A_1)[(1/e_1) - 1]}.$$
(2.16)

где  $A_1$  и  $A_2$  - площади внешней и внутренней поверхностей переноса;  $e_1$  и  $e_2$  - коэффициенты излучения внешней и внутренней поверхностей.

Для гладких поверхностей в случае нержавеющей стали e = 0,1 при T = 300 К и 0,06 при T=77 К, а для меди соответственно e = 0,03 и 0,019. При установке экранов приведенная степень черноты уменьшается пропорционально количеству установленных экранов *N*. Если  $A_1 = A_2$ ,  $e_1 = e_2 = e$ , то приведенная степень черноты

$$R_{N} = \frac{R_{e}}{N+1} = \frac{e}{(2-e)(N+1)}.$$
(2.17)

Уравнение стационарной диффузии можно записать, если принять молекулярную концентрацию газа в качестве переносимой физической величины, в виде

$$P_n = -D_c \frac{dn}{dx} S, \qquad (2.18)$$

где D<sub>c</sub> - коэффициент самодиффузии в низком вакууме. Согласно (2.5), запишем

$$D_c = v_a L/2.$$
 (2.19)

Воспользовавшись формулами (1.25), (1.18) и (1.10), имеем

$$D_{c} = \frac{k^{3/2}T^{5/2}}{\pi^{3/2}m^{1/2}pd_{m}^{2}(T+C)}$$

Таким образом, коэффициент самодиффузии в области низкого вакуума обратно пропорционален давлению. Температурная зависимость коэффициента самодиффузии определяется множителем  $T^{5/2}$  (*T*+*C*), который можно записать в виде  $T^x$ , где *x* 

изменяется от 1,5 при *T*>>*C* до 2,5 при *T*<<*C*, т. е. коэффициент самодиффузии увеличивается с повышением температуры газа. '

Коэффициент взаимной диффузии *D*<sub>в</sub> двух газов при низком вакууме рассчитывается по формуле

$$D_{a} = \frac{8\sqrt{2}}{3} \left(\frac{kT}{\pi}\right)^{3/2} \frac{1}{p(d_{T1} + d_{T2})^{2}} \sqrt{\frac{1}{m_{1}} + \frac{1}{m_{2}}}$$

Здесь  $d_{T1}$  и  $d_{T2}$  - эффективные диаметры молекул газа с массой  $m_1$  и  $m_2$ , определяемые по формуле (1.26) .Коэффициент взаимной диффузии  $D_{\rm B}$ , не зависит от процентного состава смеси и обратно пропорционален общему давлению.

Удобно представить выражение для  $D_e$ , в виде  $D_e = D_0 (T/T_0)^x (p_0/p)$ , где x=1,5...2,5;  $T_0=273$  K;  $p_0=10^5$  Па. Коэффициенты  $D_0$  для смеси воздуха с различными газами имеют значения, приведенные в табл.С17.

В высоком вакууме молекулы перемещаются между поверхностями 1 и 2 (Рис.2.2) без соударений друг с другом. В этих условиях  $\Delta A = d.dA/dx$ , где d - расстояние между поверхностями переноса. Коэффициент переноса (2.4) для высокого вакуума можно представить в виде

$$R = v_a d/4$$
 (2.20)

Сила внутреннего трения в высоком вакууме может быть определена из выражения (2.6), но при другом значении коэффициента динамической вязкости

$$\eta_{\rm B} = v_{\rm a}.d.n/2 \tag{2.21}$$

С учетом (1.10) и (1.18) выражение (2.21) примет вид

$$\eta_{\hat{a}} = d \cdot p \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}.$$
(2.22)

Коэффициент динамической вязкости в высоком вакууме прямо пропорционален давлению и обратно пропорционален корню квадратному из абсолютной температуры. Теплопередача в высоком вакууме происходит за счет теплопроводности и излучения. Конвективным теплообменом в высоком вакууме можно пренебречь. Теплопроводность газа может быть рассчитана по уравнению (2.10). Коэффициент теплопроводности в высоком вакууме

$$\lambda_{\rm B} = R_{\alpha}.c_{\rm V}.\eta_{\rm B}, \qquad (2.23)$$

где для двух параллельных поверхностей  $R_{\alpha} = \alpha/(2-\alpha)$ ,  $\alpha$  - коэффициент аккомодации (табл.С16). Зависимости  $\lambda_{\rm B}$  от температуры и давления такие же, как для  $\eta_{\rm B}$  из (2.22). Преобразуя (2.23), получим

$$\lambda_{\rm B} = k_T . p, \qquad (2.24)$$

где

$$k_T = \frac{\alpha \cdot m^{1/2} \cdot d \cdot c_V}{(2 - \alpha)\sqrt{2\pi mkT}}.$$
(2.25)

Диффузия газов в высоком вакууме определяется уравнением (2.18), а коэффициент диффузии не зависит от давления и прямо пропорционален корню квадратному из абсолютной температуры

$$D_{\hat{a}} = \frac{d \cdot v_{\hat{a}}}{4} = d\sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}.$$
(2.26)



В среднем вакууме наблюдаются переходные явления. Они объясняются появлением на границе вакуум - твердое тело скачка переносимой физической величины. Скачок увеличивается при понижении давления. Феноменологическое описание таких процессов достаточно сложно. Для технических расчетов можно пользоваться более простыми аппроксимационными формулами, обеспечивающими точность  $\pm$  10%. Âîñïîëüçóåìñÿ óðàâíâíèåì (2.4) ñ êîýôôèöèåíôîì ïåðåíîñà

$$R = \frac{v_{\dot{a}} \cdot L \cdot d}{2(d+2L)}.$$
(2.27)

Выражение (2.27) справедливо для всех степеней вакуума. При низком вакууме  $(2L\rightarrow 0)$  оно совпадает с (2.5), а при высоком вакууме  $(2L\rightarrow \infty)$  с (2.20). Коэффициент динамической вязкости при любой

степени вакуума (Рис.2.3)

$$\eta = \frac{\eta_i \cdot p}{Kn_1 + p}, \qquad (2.28)$$

где  $\eta_{\rm H}$  - коэффициент динамической вязкости для низкого вакуума (2.8), Kn<sub>1</sub>=2 $L_1/d$ .

Коэффициент теплопроводности при любой степени вакуума (Рис.2.4)



Рис.2.5. Коэффициент самодиффузии при 293 К: 1 - водород, 2 - воздух

$$\lambda = \frac{\lambda_i \cdot p}{\mathrm{Kn}_1 + p},\tag{2.29}$$

где  $\lambda_{\rm H}$  - коэффициент теплопроводности для низкого вакуума (2.11).

Коэффициент самодиффузии при любой степени вакуума (Рис.2.5)

$$D = \frac{D_i}{\mathrm{Kn}_1 + p},\tag{2.30}$$

где *D*<sub>н</sub> - коэффициент самодиффузии при низком вакууме (2.19).

### 2.3. Температурное равновесие давлений

В связанных между собой сосудах, имеющих различную температуру, в зависимости от степени вакуума устанавливается различное соотношение давлений и молекулярных концентраций. При низком вакууме условием отсутствия газовых потоков в двух соединенных между собой объемах, имеющих разную температуру, является равенство давлений в этих объемах:  $p_1 = p_2$ . При этом, согласно уравнению газового состояния, соотношение концентраций  $n_1/n_2 = T_2/T_1$ .

В высоком вакууме может устанавливаться только динамическое равновесие, при котором потоки газа, переходящие из одного сосуда в другой, равны. Для сосудов, соединенных отверстием, согласно выражениям для числа молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени(1.34) и среднеарифметической скорости молекул газа (1.18), можно записать условие равновесия в виде

$$A\frac{n_1}{4}\sqrt{\frac{8kT_1}{\pi m}} = A\frac{n_2}{4}\sqrt{\frac{8kT_2}{\pi m}},$$

где А - площадь отверстия. После упрощения получим

$$p_1 / p_2 = \sqrt{T_1 / T_2} \hat{e} \quad n_1 / n_2 = \sqrt{T_2 / T_1}.$$
 (2.31)

Это справедливо и для сосудов, соединенных трубопроводами. Таким образом, в высоком вакууме равновесие в соединенных объемах устанавливается при давлениях, пропорциональных корню квадратному из отношения их абсолютных температур.

В области среднего вакуума для определения соотношения между давлениями можно пользоваться приближенной формулой

$$p_1/p_2 = (T_1/T_2)^{\frac{L}{d+2L}},$$
 (2.32)

где *d* - эффективный размер соединительного отверстия или трубопровода; *L* - длина свободного пути молекул газа при среднем давлении. Относительная ошибка формулы не превышает 10%.

Формула (2.32) справедлива как в областях низкого (при  $L \rightarrow 0$ ;  $p_1 = p_2$ ), так и высокого вакуума (при  $L \rightarrow \infty$ ,  $p_1 / p_2 = \sqrt{T_1 / T_2}$ ). Приведенные соотношения важны при измерении давления в соединенных вакуумных камерах, имеющих различную температуру.

Пусть манометрический преобразователь установлен на участке вакуумной системы с температурой  $T_1 = 293$  K, а давление измеряют в объеме, охлажденном до температуры жидкого азота  $T_2 = 77$  K (такие условия имеют место в вакуумных системах с азотными

ловушками и адсорбционными насосами). Тогда в условиях высокого вакуума, согласно (2.32),  $p_2 = p_1/2$ . При измерении же давления в вакуумной печи манометрическим преобразователем, установленным на участке вакуумной системы, имеющей комнатную температуру  $T_1 = 293$  К и  $T_2 =$ 1273 К,  $p_2 \approx 2p_1$ .

Если между баллонами 1 и 3 (рис.2.6,а), находящимися в одинаковых температурных условиях, установить баллон 2 имеющий другую температуру



Рис.2.6. Схемы соединения сосудов, имеющих различные температуры

баллон 2, имеющий другую температуру, то, применяя последовательно уравнение (2.32), можно убедиться, что наличие баллона 2 не влияет на давления  $p_1$  и  $p_3$  в баллонах 1 и 3.

При высоком вакууме (рис. 2.6,б) отношение давлений не зависит от числа соединяемых баллонов  $p_1 / p_4 = \sqrt{T_1 / T_2}$ . Если же в баллоне 2 создать условия низкого вакуума, например, увеличив его размеры, то  $p_2$  станет равным  $p_3$ , а отношение давлений увеличится:  $p_1/p_4 = T_1/T_2$ . Этот эффект используется для создания тепловых вакуумных насосов.

#### 2.4. Моделирование течения газов методом механики сплошной среды

При расчете вакуумной системы можно решать прямую задачу определения скорости течения газа в зависимости от геометрических размеров и распределения давлений. Обратная задача состоит в определении геометрических характеристик элементов по заданной скорости течения газа. Для решения этих задач необходимо знать закономерности течения газа, которые зависят от степени вакуума.

В низком вакууме при высоких давлениях возможно существование инерционного режима течения газа, аналогичного турбулентному режиму, рассматриваемому в гидродинамике. При этом силы инерции движущейся массы газа, вызывающие образование вихрей, приводят к сложному характеру распределения скорости движения газа. Для определения условия существования инерционного режима течения можно воспользоваться критерием Рейнольдса  $\text{Re}=d.v_r/\eta_{\kappa}$ . Здесь d - характерный размер элемента;  $v_r$  - скорость течения газа;  $\eta_{\kappa}$  -коэффициент кинематической вязкости. Инерционный режим течения газа возникает при Re>2200. Условие существования инерционного режима можно записать в другой форме, выражая  $v_r$  через поток газа Q:  $v_r=4Q/(\pi d^2 p)$ . Для воздуха при комнатной температуре условие Re>2200 можно переписать в виде  $Q>3.10^3d$ , где Q - поток газа,  $M^3$ . Па/с; d - диаметр трубопровода, м. В элементах вакуумных систем такие потоки существуют очень редко. В основном они встречаются в момент запуска некоторых вакуумных установок. Поэтому в дальнейшем этот режим течения газа рассматривать не будем.

В низком вакууме основную роль играет вязкостный режим течения газа, при котором характер распределения скорости в поперечном сечении определяется силами внутреннего трения. При высоком вакууме силы внутреннего трения в газах стремятся к нулю и существует режим течения газа, для которого характерно независимое перемещение отдельных молекул. Такой режим течения называется молекулярным.

В среднем вакууме на течение газа одновременно оказывают влияние внутреннее трение и молекулярный перенес. Существующий при этом переходный режим течения называют молекулярно-вязкостным.

Граничные условия существования различных режимов течения газа в вакуумных системах в зависимости от критерия Кнудсена Кn - отношения средней длины свободного пути молекул газа L к эффективному размеру  $d_{э\phi}$  -представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Режимы течения	Границы		
	верхняя	нижняя	
Вязкостный	Атмосферное	$\mathrm{Kn} \leq 5.10^{-3}$	
	давление		
Молекулярно-вязкостный	$Kn > 5.10^{-3}$	Kn ≤ 1,5	
Молекулярный	Kn > 1,5	$Kn \rightarrow \infty$	

Режимы течения газа в вакуумных системах

В каждом режиме для любого из элементов вакуумных систем существует своя зависимость проводимости от давления, температуры и характерных размеров элемента. При низком вакууме, когда длина свободного пути молекул газа очень мала, газ можно считать сплошной средой, движение которой определяется силами инерции или внутреннего трения. При высоком вакууме, хотя газ перестает быть сплошной средой, эти методы остаются удобным математическим аппаратом для аппроксимации основных закономерностей течения газа.

Для описания течения газа можно записать два дифференциальных уравнения: баланса массы и баланса сил. Уравнение баланса сил позволяет записать уравнение газового потока. Величина потока может измеряться числом киломолей, проходящих через трубопровод в единицу времени.

$$P = \frac{D \cdot A(p_1 - p_2)}{R \cdot T \cdot l},$$
 (2.33)

где A и l - площадь сечения и длина трубопровода, D - коэффициент диффузии.
При измерении потока в единицах СИ (кг/с) уравнение потока (2.33) принимает вид

$$G = PN_{A}m = \frac{D \cdot m \cdot A(p_{1} - p_{2})}{k \cdot l \cdot T},$$
(2.34)

В соответствии с уравнением газового состояния в форме (1.12) масса газа Nm при постоянной температуре прямо пропорциональна произведению давления газа на его объем. Это позволяет ввести внесистемную условную единицу количества газа - 1 Па.м<sup>3</sup>, которая равна количеству газа, заключенному в объеме 1 м<sup>3</sup> при давлении 1 Па и температуре 273 К. Для газа с молекулярной массой M пересчет этой единицы в килограммы можно сделать согласно соотношению 1 м<sup>3</sup>.Па=1,3.10<sup>-5</sup>  $M/M_{e}$  (кг), где  $M_{B}$  - молекулярная масса воздуха (Me=29 кг/кмоль). Условная единица газового потока 1 м<sup>3</sup>.Па/с часто применяется в вакуумных расчетах, когда температура во всех элементах вакуумной системы одинакова.

Если выразить газовый поток в условных единицах потока газа, то согласно (1.12) и (2.34),

$$Q = G \frac{kT_0}{m} = \frac{DAT_0}{l \cdot T} (p_1 - p_2) = U(p_1 - p_2), \qquad (2.35)$$

где *Q*-газовый поток, Па·м<sup>3</sup>/с; *U*-проводимость элемента вакуумной системы, м<sup>3</sup>/с;

$$U = DAT_0 / (l \cdot T);$$
 (2.36)

где *Т*-температура газа, К;  $T_0$ =273 К.

Рассмотрим далее определение проводимости отверстий и круглых трубопроводов

при различных режимах течения. Под отверстием будем понимать трубопровод, длина которого значительно меньше диаметра ( $l \le 0,01d$ ) Пусть отверстие расположено в стенке, разделяющей два бесконечно больших объекта (рис.2.7,а). При низком вакууме через отверстие протекает поток газа,



 б - соединение ограниченного и бесконечного объемов который в условных единицах (м<sup>3</sup>·Па/с) определяется уравнением

$$Q = \psi A p_1 \sqrt{\frac{RT_1}{M}},\tag{2.37}$$

$$\Psi = r^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left(1 - r^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right)},$$
(2.38)

A - площадь отверстия в м<sup>2</sup>,  $r = p_2 / p_1$ ,  $p_1$  и  $T_1$  - давление и температура в объекте 1. Вывод уравнения (2.37) приведен в приложении П2.4.

Уменьшение отношения давлений  $r \leq 1$  приводит к тому, что количество газа, протекающего через диафрагму, и конечная скорость потока в области  $p_2$  увеличиваются до тех пор, пока отношение  $p_2 / p_1$ , не достигнет критического значения, соответствующего скорости звука. Если процесс истечения адиабатический, то критическое значение

$$r_{\hat{e}} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}.$$
(2.39)

Для двухатомных газов и воздуха ( $\gamma$ =1,4)  $r_{\kappa}$ =0,528, для одноатомных газов ( $\gamma$ =1,67)  $r_{\kappa}$ =0,437, для трехатомных газов ( $\gamma$ =1,3)  $r_{\kappa}$ =0,546.

При отношениях давлений  $p_2 / p_1 < r_{\kappa}$  количество перетекающего газа остается неизменным. В области отношений  $p_2 / p_1 > r_{\kappa}$  проводимость отверстия, согласно (2.35) и уравнению (2.37), определяется выражением

$$U_{\hat{i}\hat{a}} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \Psi \frac{A}{1 - r} \sqrt{\frac{RT_1}{M}}.$$
(2.40)

Для воздуха и других двухатомных газов при у=1,4 из (2.38) и (2.40) получим

$$\Psi = 2,65r^{0,714}(1-r^{0,236})^{1/2}; \qquad (2.41)$$

$$U_{i\hat{a}} = \frac{91A\psi}{1-r} \sqrt{\frac{T_1}{M}},$$
 (2.42)

где M - молекулярная масса, кг/кмоль;  $T_1$  - абсолютная температура, К; A - площадь отверстия, м<sup>2</sup>; r - отношение давлений  $p_2 / p_1$ ;  $\psi$  - функция от r, рассчитанная согласно (2.41) и показанная на рис.2.8.

где

При комнатной температуре(T = 293 K) для воздуха (M = 29 кг/кмоль) уравнение (2.42) можно упростить:

$$U_{i\hat{a}} = \frac{289\psi A}{1-r} \delta \quad \hat{e} \quad 1 > r \ge 0,528 \quad (2.43)$$

В закритическом режиме, когда r < 0,528, величина  $\psi = \psi(0,528) = 0,69$ . Тогда проводимость отверстия

$$U_{i\hat{a}} = \frac{200A}{1-r} \check{\partial} \quad \dot{e} \quad 0,528 > r \ge 0,1. \quad (2.44)$$

При больших перепадах давления, когда *r*<0,1, получим



Рис.2.8. Проводимость отверстия при вязкостном режиме течения газа: 1 - удельная проводимость отверстия для воздуха при 298 К , 2 - функция  $\psi$ для  $\gamma = 1,4$ 

$$U_{\rm OB} = 200 A$$
 для  $0, 1 > r \ge 0$  (2.45)

Обычно при расчете проводимости отношение давлений *r* заранее не известно. Расчет ведется методом последовательных приближений. Для первого приближения всегда можно принять, что проводимость равна минимальному значению  $U_{ob} = 200 A \text{ m}^3/\text{c}$ и не зависит от *r*. Для круглых отверстий это значение  $U_{ob} = 160d^2 \text{ m}^3/\text{c}$ .

В обычных вакуумных системах, проектируемых для работы в стационарном режиме, отношение давлений г всегда больше коэффициента использования насоса. При оптимальных значениях коэффициентов использования насосов отношение давления *r* лежит в пределах 0,8...0,9, что позволяет принимать в качестве первого приближения  $U_{oB}$  = 1000A м<sup>3</sup>/с. Для круглых отверстий  $U_{oB} = 785d^2$  м<sup>3</sup>/с. Проводимость отверстия при высоком вакууме в молекулярном режиме рассчитывают, согласно (2.35), в виде

$$U_{\hat{n}} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \frac{GkT}{m(p_1 - p_2)}$$

где  $G = G_1 - G_2$ ;  $G_1 u G_2$  - массовые потоки через отверстие, проходящие навстречу друг другу. С учетом  $G_1 = n_1 \cdot m \cdot v_{a1} \cdot A/4$ , а  $G_2 = n_2 \cdot m \cdot v_{a2} \cdot A/4$ , для проводимости можно записать

$$U_{\hat{n}} = \frac{\left(n_1 \sqrt{\frac{8kT_1}{\pi m}} - n_2 \sqrt{\frac{8kT_2}{\pi m}}\right)A}{4(n_1 - n_2)}.$$
(2.46)

Если  $T_1 = T_2 = T$ , то это выражение упрощается:

$$U_{\hat{n}} = 36.4\sqrt{T/M}$$
, (2.47)

где *М* - в кг/кмоль; *Т* - в К; *А* - в м<sup>2</sup>; *U*<sub>ом</sub> - в м<sup>3</sup>/с. Расчет проводимости отверстия для воздуха при комнатной температуре по (2.47) дает в результате

$$U_{\rm OM} = 116 \, A.$$
 (2.48)

Так как для круглого отверстия  $A = \pi d^2/4$ , то  $U_{\rm OM} = 91d^2$  м<sup>3</sup>/с.

В области среднего вакуума при молекулярно-вязкостном режиме течения можно пользоваться приближенной формулой

$$U_{\rm OMB} = U_{\rm OM} b + U_{\rm OB} , \qquad (2.49)$$
$$b = \frac{1 + 2.5 \frac{d}{2L}}{1 + 3.1 \frac{d}{2L}} ,$$

где

которая справедлива также в областях молекулярного и вязкостного режимов течения газа.

Рассмотрим отверстие между бесконечно большим и ограниченным объектами. В этом случае трубопровод с отверстием (рис. 2.7,б) по второму закону термодинамики должен иметь одинаковую проводимость при течении газа в обоих возможных направлениях

$$\frac{1}{U_{A1}} + \frac{1}{U_{\dot{o}\ \dot{o}}} + \frac{1}{U_{A1,A2}} = \frac{1}{U_{A2}} + \frac{1}{U_{\dot{o}\ \dot{o}}}$$

где  $U_{A1}$  и  $U_{A2}$  - проводимости отверстий с площадями  $A_1$  и  $A_2$  со стороны бесконечных объектов соответственно;  $U_{A1,A2}$  - проводимость отверстия, имеющего площадь  $A_2$  со стороны трубопровода;  $U_{\rm TP}$  - проводимость трубопровода внутри стенки.

Решая относительно  $U_{A1,A2}$  и учитывая, что  $U_{A1}/U_{A2} = A_1/A_2$ , получим

$$U_{A1,A2} = \frac{U_{A2}}{1 - A_2 / A_1}.$$
 (2.50)

Проводимости отверстий при любых режимах течения, рассчитанные ранее для присоединения к бесконечным объектам, применяя (2.50), можно преобразовать в проводимости отверстий, соединенных с ограниченным объектом. Форма отверстий по приведенной методике расчета не влияет на их проводимость.



Рис.2.9. Расчетная схема течения газа через круглый трубопровод при вязкостном режиме

Рассмотрим течение газов в трубопроводах области В низкого При вязкостном вакуума. режиме течения газа средняя длина свободного пути молекул газа значительно меньше диаметра трубопровода. Слой газа у поверхности трубопровода остается неподвижным, остальные а слои, имеющие толщину, равную средней

длине свободного пути, движутся в условиях стационарного потока со скоростью, зависящей от радиуса трубопровода.

Рассмотрим трубопровод с круглым поперечным сечением. При стационарном потоке в малом элементе газового цилиндра, образованного на радиусе r приращением dr (рис.2.9), существует равновесие движущей силы  $f_1$ , вызываемой разностью давлений, и силы внутреннего трения в газах  $f_2$ . Условие равновесия можно записать в виде:  $f_1+f_2 = 0$  или

$$\pi r^2 dp + 2\pi r \eta \frac{dv}{dr} dl = 0.$$

Интегрируя по радиусу трубопровода, при начальных условиях  $r = r_0$ , v = 0, получим параболическое распределение скоростей по сечению трубопровода:

$$v = \frac{(r_0^2 - r^2)dp}{4\eta dl}$$

При этом объемный расход газа

$$V = \int_{0}^{r_{0}} v 2\pi r dr = \frac{\pi r_{0}^{4} dp}{8\eta dl}.$$
 (2.51)

Уравнение (2.51) позволяет определить объемный расход несжимаемой среды. Для изотермически сжимаемых разреженных газов дополнительно учитываем условие pV = Const. Поток газа Q, протекающий через трубопровод, найдем как произведение объемного расхода V на давление в трубопроводе. Интегрируем (2.51) от 0 до l и от  $p_2$  до  $p_1$ , пренебрегая для длинных трубопроводов концевыми эффектами.

$$Q = pV = \frac{\pi r_0^4 (p_1^2 - p_2^2)}{16\eta l}.$$
(2.52)

Согласно (2.35) запишем выражение для проводимости при вязкостном режиме течения

$$U_{\delta\hat{a}} = Q / (p_1 - p_2) = \frac{\pi r_0^4 p_{\tilde{n}\delta}}{8\eta l}.$$
 (2.53)

Таким образом, проводимость круглого трубопровода при вязкостном режиме течения газа обратно пропорциональна его длине и коэффициенту динамической вязкости, прямо пропорциональна среднему давлению в трубопроводе и четвертой степени радиуса трубопровода. Для воздуха при 293 К и  $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5}$  H/(м<sup>2</sup> ·c) формулу (2.53) можно преобразовать к виду

$$U_{\delta\hat{a}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} p_{\tilde{n}\delta}; \qquad (2.54)$$

здесь d и l в м; p - в Па;  $U_{\rm TB}$  - в м<sup>3</sup>/с.

При молекулярном режиме течения длина свободного пути молекул газа больше диаметра трубопровода, и молекулы движутся независимо друг от друга, соударяясь только со стенками трубопровода.

Будем считать, что каждая из молекул, хаотически движущихся в трубопроводе, имеет постоянную составляющую переносной скорости *v*<sub>п</sub>, направленную по оси трубопровода в область с меньшим давлением (рис.2.10). В этом случае движущая сила



 $f_1 = dp A$ , где A - поперечное сечение трубопровода. Уравновешивающая сила, равная общему изменению количества движения всех молекул при их ударе о стенку трубки,  $f_2 =$  $- B \cdot dl \cdot N_q \cdot m \cdot v_n$ ; здесь B - периметр трубопровода;  $N_q$  - число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени. Уравнение равновесия  $f_1 + f_2 = 0$  можно записать в виде

$$dp \cdot A - B \cdot dl \cdot N_q \cdot m \cdot v_n = 0. \tag{2.54}$$

Рис.2.10. Расчетная схема течения газа при молекулярном режиме

Если в (2.54) ввести объемный расход  $V = v_n A$  и использовать выражения (1.34), (1.10), (1.18), то получим

$$\frac{dp}{mpV}\sqrt{2\pi mkT} = \frac{B}{A^2}dl.$$

В стационарном режиме произведение  $p \cdot V$ , стоящее в знаменателе, постоянно и равно газовому потоку Q. Проинтегрируем левую часть этого уравнения по давлению в пределах от  $p_2$  до  $p_1$  и правую часть по длине в пределах от 0 до l:

$$\frac{p_1 - p_2}{mQ} \sqrt{2\pi mkT} = \int_0^l \frac{B}{A^2} dl.$$

Откуда поток газа

$$Q = \frac{\sqrt{2\pi m k T} (p_1 - p_2)}{m \int_{0}^{l} \frac{B}{A^2} dl}.$$

Используя (1.18) для v<sub>a</sub>, имеем

$$Q = \frac{\pi v_{a}(p_{1} - p_{2})}{2\int_{0}^{l} \frac{B}{A^{2}} dl}.$$

Более точное выражение для Q, учитывающее функцию распределения молекул по скоростям:

$$Q = \frac{4v_{a}(p_{1} - p_{2})}{3\int_{0}^{l} \frac{B}{A^{2}} dl}.$$

В этом случае проводимость трубопровода

$$U_{\delta i} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \frac{4v_{\dot{a}}}{3\int_{0}^{l} \frac{B}{A^2} dl}.$$
 (2.55)

Для трубопровода постоянного поперечного сечения

$$U_{\rm TM} = 4v_a A^2 / (3Bl). \tag{2.56}$$

В случае круглого поперечного сечения

$$U_{\hat{i}\hat{i}} = \frac{\pi d^3 v_{\hat{a}}}{12 \cdot l} = 38.1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}},$$
(2.57)

где *d* и *l* выражены в м; *M* - в кг/кмоль; *T* - в К; *U* - в м<sup>3</sup>/с. Таким образом, проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения не зависит от давления. Для воздуха при 293 К проводимость цилиндрического трубопровода круглого поперечного сечения

 $U_{\rm TM} = 121 \ d^3 / l.$ 



Рис.2.11. Проводимость трубопровода *d*=1м, *l*=1м для воздуха при 293 К: М - молекулярный, МВ - молекулярно-вязкостный, В - вязкостный режимы течения газа

В области среднего вакуума в молекулярно-вязкостном режиме проводимость трубопроводов можно рассчитывать по полуэмпирической формуле, предложенной Кнудсеном:

$$U_{\rm TMB} = b U_{\rm TM} + U_{\rm TB}.$$
 (2.59)

(2.58)

Здесь  $U_{\text{тв}}$  -проводимость трубопровода при вязкостном режиме;  $U_{\text{тм}}$  - проводимость трубопровода при молекулярном режиме; *b* - коэффициент, равный 0,8 на границе с вязкостным режимом ом. Среднее значение *b* = 0,9 может быть

течения и 1 на границе с молекулярным режимом. Среднее значение *b* = 0,9 может быть принято постоянным для технических расчетов. На рис. 2.11 показана зависимость проводимости круглого трубопровода от давления.

Определить проводимости некруглых трубопроводов можно по той же методике, которая была использована для определения проводимостей круглых трубопроводов. Расчетные формулы для некоторых форм трубопроводов представлены в табл. С18.

## 2.5. Моделирование течения газа методом интегральных угловых коэффициентов

В области высокого вакуума для анализа молекулярных потоков применяют метод интегральных угловых коэффициентов. Большинство вакуумных систем при анализе молекулярных потоков может быть разбито на ряд однородных поверхностей, имеющих по всей площади постоянное значение коэффициентов поглощения  $\beta$  и отражения  $\rho$ , причем  $\beta + \rho = 1$ .

Будем считать, что при десорбции молекул со стенок выполняется закон косинуса. Угловое распределение молекул на входе в элемент вакуумной системы можно приближенно считать также подчиняющимся косинусному закону.

Рассмотрим систему видимых друг для друга однородных поверхностей (Рис.2.12). Молекулярный поток, ударяющийся о i-ую поверхность, определим в виде

$$Q_{i} = \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n} \varphi_{k,i} Q_{\rho k};$$
(2.60)

где  $Q_{\rho k}$  - молекулярный поток, покидающий k - поверхность;  $\phi_{k,i}$  -угловой коэффициент, определяющий долю молекулярного потока, попадающего от k-ой поверхности на i-ую поверхность.

Поток молекул, покидающих і-поверхность,

 $Q_{\rm pi} = Q_{\rm Ai} + \rho_{\rm i} Q_{\rm i}$ ; (2.61)

где  $Q_{\text{дi}}$  - газовыделение с *i*-ой поверхности;  $\rho_{\text{i}}$  -коэффициент отражения от *i*-ой поверхности.

Количество молекул, поглощаемых в единицу времени на *i*-ой поверхности,



 $Q_{\beta i} = \beta_i Q_i,$ 

Рис.2.12. Расчетная схема расположения поверхностей

где  $\beta_i$  -коэффициент поглощения на *i*-ой поверхности.

(2.62)

Для определения угловых коэффициентов запишем выражение для молекулярного потока, падающего с элементарной площадки  $dF_k$  на элементарную площадку  $dF_i$ . С учетом закона косинуса (1.37)имеем

$$d^2 Q_{k,i} = \frac{dQ_k \cos \psi_{k,i}}{\pi} d\omega, \qquad (2.63)$$

где  $dQ_k$  - молекулярный поток, покидающий поверхность  $dF_k$ ;  $d\omega$  - телесный угол, под которым площадка  $dF_i$  видна из площадки  $dF_k$ ;  $d\omega = dF_i \cos \psi_{i,k} / r^2$ .

Считаем, что элементарные площадки достаточно малы, чтобы выполнялось условие r = Const. Подставляя в (2.63) выражение для телесного угла d $\omega$ , получим

$$d^2 Q_{k,i} = \frac{dQ_k \cos \psi_{k,i} \cos \psi_{i,k}}{\pi r^2} dF_i$$
(2.64)

откуда вероятность вылета молекулы с поверхности  $dF_k$  на поверхность  $dF_i$  или дифференциальный угловой коэффициент

$$d^{2}\varphi_{k,i} = \frac{d^{2}Q_{k,i}}{dQ_{k}} = \frac{\cos\psi_{k,i}\cos\psi_{i,k}}{\pi r^{2}}dF_{i}.$$
 (2.65)

Интегрируя (2.65) по площади  $F_i$ , можно получить локальный угловой коэффициент, определяющий массообмен между элементарной площадкой  $dF_k$  и поверхностью  $F_i$ .

$$d\varphi_{k,i} = \int_{F_i} \frac{\cos\psi_{k,i} \cos\psi_{i,k}}{\pi r^2} dF_i.$$
 (2.66)

Средний угловой коэффициент или вероятность того, что молекула, вылетевшая с поверхности k попадет на поверхность I, определяется после второго интегрирования по площади  $F_k$ :

$$\varphi_{k,i} = \frac{1}{F_k} \iint_{F_k F_i} \frac{\cos \psi_{k,i} \cos \psi_{i,k}}{\pi r^2} dF_k dF_i.$$
(2.67)

Полученное выражение для расчета угловых коэффициентов определяется только геометрическими характеристиками исследуемой системы. Они аналогичны угловым коэффициентам теории лучистого теплообмена, обладающими свойствами взаимности, замкнутости и аддитивности:

1) угловые коэффициенты взаимодействующих поверхностей обратно пропорциональны их площадям

$$\varphi_{2,1}F_2 = \varphi_{1,2}F_1 \; ; \tag{2.68}$$

что следует из (2.67).

2) для замкнутой поверхности, разделенной на n взаимодействующих поверхностей, сумма угловых коэффициентов для любой поверхности по отношению к остальным равна единице:

$$\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n} \varphi_{k,i} = 1;$$
(2.69)

3) угловой коэффициент двух взаимодействующих поверхностей, одна из которых разделена на n частей, равен сумме отдельных угловых коэффициентов:

$$\varphi_{i,k} = \sum_{j=1}^{n} (\varphi_{k,i})_{j}.$$
(2.70)

В табл.2.2 приведены значения угловых коэффициентов для некоторых форм поверхностей, часто встречающихся в вакуумных установках.

Зная угловые коэффициенты, можно составить систему уравнений (2.61), решение которой позволяет при известных  $\rho_{I}$  или  $\beta_{i}$  найти все массообменные характеристики: суммарный поток  $Q_{\rho i}$ , покидающий поверхность  $F_{i}$ ; поток молекул  $Q_{i}$ , ударяющийся о поверхность  $F_{i}$ ; поток молекул  $Q_{\beta i}$ , поглощаемый на поверхности  $F_{i}$ .

В качестве иллюстрации рассмотрим пример расчета коэффициента захвата откачного устройства В виде цилиндра диаметром d и высотой l = 2d с сорбирующими (рис.2.13). Молекулы стенками входят в цилиндр косинусным угловым с распределением. Газовыделение co всех поверхностей остальных отсутствует. Коэффициент отражения молекул от входного отверстия (поверхность 1)  $\rho_1 = 0$ , на стенках (поверхности 2 и 3) p<sub>2.3</sub>=0.5.

Система уравнений (2.61)) для рассматриваемого объекта принимает следующий вид:



Рис.2.13. Камера с сорбирующими стенками

$$Q_{\rho 1} = Q_{a1};$$

$$Q_{\rho 2} = \rho_{2}(\varphi_{1,2}Q_{\rho 1} + \varphi_{2,2}Q_{\rho 2} + \varphi_{3,2}Q_{\rho 3});$$

$$Q_{\rho 3} = \rho_{3}(\varphi_{1,3}Q_{\rho 1} + \varphi_{2,3}Q_{\rho 2} + \varphi_{3,3}Q_{\rho 3}).$$
(2.71)

Для нахождения углового коэффициента  $\phi_{31}$ , определяющего вероятность попадания молекул с поверхности 3 на поверхность 1, воспользуемся табл.2.2, откуда

## Таблица 2.2

# Угловые коэффициенты для расчета вакуумных систем

Тип элемента	Значения коэффициентов	Обозначения
Тело внутри тела	φ <sub>1,1</sub> =0;	
Fi	φ <sub>1,2</sub> =1;	
$\left( \begin{array}{c} O \end{array} \right) - F_2$	$\phi_{2,1} = F_1/F_2$	
Два соосных диска <b>2</b> <i>R</i>	$\varphi_{1,2} = \frac{1}{2x^2} \left[ 1 + x^2 + z^2 - \sqrt{(1 + x^2 + z^2)^2 - 4x^2 z^2} \right]$	x=r/a
F1 8	$x^{2} = \frac{x^{2}}{x^{2}}$	
F2 20	$\psi_{2,1} - \frac{1}{z^2} \psi_{1,2}$	z=R/a
	$\varphi_{12} = \varphi_{21} = \frac{1}{4^2} (\sqrt{1 + 4x^2} - 1)^2$	
	4x <sup>2</sup>	x=z
Внутренняя поверхность цилиндра		
	$\phi_{1,1} = 1 + y - \sqrt{y^2 + 1}$	
		y=a/d
Два цилиндра	$0_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ 2yt + (y+z)\sqrt{1 + (y+z)^2} - z\sqrt{1 + z^2} - \frac{1}{2} \right]$	
	$\psi_{1,2}$ $2y \begin{bmatrix} 2y \\ y \end{bmatrix}$ $(y + 2) \psi_{1} + (y + 2) = 2 \psi_{1} + 2$	y=a/d
$v = F_2$	$-(y+t+z)\sqrt{(y+t+z)^2+1+(t+z)\sqrt{1+(t+z)^2}}$	t=c/d
	$\phi_{2,1}=\frac{y}{t}\phi_{1,2}$	z=b/d
0 F1	$\varphi_{1,2} = \frac{1}{2y} \left[ 2yt + y\sqrt{1 + y^2} - (y + t) \right] \times$	z = 0
d d	$\frac{2y}{1+(y+t^2)} + t\sqrt{1+t^2}$	
	× vi + (y + t ) + t vi + t ]	
Цилиндр и диск	$\varphi_{12} = \frac{1}{2(1-t^2)} \left[ 4t\sqrt{1+t^2} - 4y\sqrt{1+y^2} - 4y\sqrt{1+y^2} - 4y\sqrt{1+y^2} \right]$	f = d/d
$-F_2$	$\frac{2(1-j^{2})}{\sqrt{(4+j^{2})^{2}+(2+j^{2})^{2}+(4+j^{2})^{2}}}$	$I = a_2/d_1$ $t = a_1/d_1$
5	$-\sqrt{(4t^2 + f^2 + 1)^2 - 4f^2} + \sqrt{(4t^2 + f^2 + 1)^2 - 4f^2}$	$t = a_2/d_1$ $y = a_1/d_2$
$d_1$	$+\sqrt{(4y^2+f^2+1)^2-4f^2}$	y – u <sub>1</sub> /u <sub>1</sub>
<b>r≪·····</b> >	1 C 2	
	$\varphi_{21} = \frac{1 - f^{-1}}{4(t - y)} \varphi_{12}$	

$$\varphi_{3,1} = \frac{l^2}{d^2} \left( \sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} - 1 \right)^2.$$
(2.72)

Для *l* = 2*d* из (2.72)  $\phi_{3,1}$  = 0,057. Для определения остальных угловых коэффициентов воспользуемся условиями симметрии

$$\begin{split} \phi_{3,1} \,=\, \phi_{1,3} \;;\;\; \phi_{2,1} \,=\, \phi_{2,3} \;;\;\; \phi_{1,2} \,=\, \phi_{3,2} \;; \\ \phi_{1,1} \,=\,\; \phi_{3,3} \,=\, 0 ; \end{split}$$

по логическими соображениям

свойством взаимности

$$\varphi_{1,2} = \varphi_{2,1}F_2 / F_1;$$

свойством замкнутости

$$\varphi_{1,2} = 1 - \varphi_{1,3}$$
;  $\varphi_{2,2} = 1 - \varphi_{2,1} - \varphi_{2,3}$ ,

которые позволяют найти все угловые коэффициенты

$\phi_{1,1}$	$\phi_{2,1}$	$\phi_{3,1}$		0	0,943	0,057
φ <sub>1,2</sub>	$\phi_{2,2}$	φ <sub>3,2</sub>	=	0,236	0,528	0,236
$\phi_{1,3}$	$\phi_{2,3}$	$\phi_{3,3}$		0,057	0,943	0

Решая систему (2.71), получим

$$Q_{\rho 1} = Q_{\mu 1}$$
;  $Q_{\rho 2} = 0.66Q_{\mu 1}$ ;  $Q_{\rho 3} = 0.138Q_{\mu 1}$ .

Поток молекул, выходящий из объекта через поверхность 1, определим по формуле

$$Q_1 = \varphi_{1,1}Q_{\rho 1} + \varphi_{2,1}Q_{\rho 2} + \varphi_{3,1}Q_{\rho 3} = 0,235Q_{\mu 1} .$$

Коэффициент захвата откачного устройства (вероятность поглощения молекулы, вошедшей в объект через входное отверстие)

$$\eta = (Q_{\rm A1} - Q_{\rm 1}) / Q_{\rm A1} = 0,765.$$

#### 2.6. Моделирование течения газа методом статистических испытаний

Имитационное моделирование течения газа в вакуумных системах может осуществляться методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Это численный метод решения математических задач путем моделирования случайных величин с заданным законом распределения, построения вероятностных моделей и статистической оценки результатов. Этим методом можно решать любые задачи, сводя их к расчету математического ожидания. Наибольшее распространение метод статистических испытаний получил при решении как стационарных, так и нестационарных задач, связанных с течением газов в элементах вакуумных систем в высоком и среднем вакууме, когда движение каждой из молекул осуществляется хаотически путем последовательных столкновений со стенками элемента.



Рис.2.14. Элемент вакуумной системы произвольной конфигурации

Вероятность перехода молекул из одного сечения элемента вакуумной системы в другое определяется геометрией исследуемого элемента. По вероятностям перехода и известным концентрациям газа можно определить газовые потоки, возникающие в вакуумных системах.

Рассмотрим применение метода статистических испытаний к моделированию стационарного течения газа при высоком вакууме через вакуумный элемент, имеющий один вход, один выход и произвольную внутреннюю конфигурацию (рис.2.14).

Исходными данными для расчета должны быть: конфигурация элементов, распределение молекул по площади входного отверстия, угловое распределение молекул на входе, угловое распределение молекул, десорбирующихся с внутренних поверхностей вакуумных элементов.

Конфигурацию элементов можно с соответствующими ограничениями приближенно описать набором уравнений второго порядка

 $a_{11}x^{2} + a_{22}y^{2} + a_{33}z^{2} + a_{12}y + a_{23}yz + a_{13}zx + a_{14}x + a_{24}y + a_{34}z + a_{44} = 0.$ (2.73)

При удачном выборе положения системы координат уравнения (2.73) сильно упрощаются. Уравнение цилиндра, ось которого совпадает с осью *z*, имеет вид  $x^2 + y^2 = r_0$ ; уравнение плоскости, перпендикулярной оси *z*, имеет вид z = 1 и т. д.

Условия на входе в элемент считаем соответствующими присоединению элемента к бесконечно большому объекту, Из молекулярно-кинетической теории известно, что молекулы, попадающие во входное отверстие из бесконечно большого объекта, равномерно распределены по площади отверстия и имеют косинусное угловое распределение.

На стенках, ограничивающих внутреннее пространство элемента, принимаем, что десорбция молекул происходит в соответствии с законом косинуса. Моделируемыми случайными величинами являются координаты точки входа молекулы в элемент и два угла, определяющие направление движения молекул в элементе от точки входа или с поверхности элемента.

Координатами точки входа для круглого входного отверстия (рис.2.14) являются угол  $\varphi$  и радиус *r*. Для обеспечения равновероятного входа молекул по всей площади необходимо, чтобы угол  $\varphi$  был равномерно распределен в интервале от 0 до  $2\pi$ . Генерируя датчиком случайных чисел, равномерно распределенным в интервале от 0 до 1, случайное число  $\xi$  [0,1], получим случайную величину угла

$$\varphi = 2\pi\xi[0,1].$$
 (2.74)

Для определения случайного радиуса входа молекулы в систему напишем число молекул, попадающих в кольцо шириной *dr* на радиусе *r*,

$$dN = N \frac{2\pi r dr}{\pi r_0^2} = N \frac{2r}{r_0^2} dr.$$

Вероятность попадания молекулы в круг площадью  $\pi r^2$ 

$$P(r) = \int_{0}^{r_0} \frac{2r}{r_0^2} dr = \frac{r^2}{r_0^2}.$$
 (2.74)

Моделируя вероятность P(r) новым случайным числом  $\xi[0,1]$ , равномерно распределенным в интервале от 0 до 1, получим

$$r = r_0 \sqrt{\xi[0,1]}.$$
 (2.75)

Направление вектора скорости молекулы v в точке входа 0' определяется двумя углами:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис.2.14). Угол  $\alpha_1$  образован осью x' и проекцией вектора скорости на плоскость x'y'. Угол  $\alpha_2$  образуется между осью z' и вектором скорости v. В соответствии с принятыми граничными условиями случайный угол  $\alpha_1$  равномерно распределен в интервале от 0 до  $2\pi$ :

$$\alpha_1 = 2\pi \xi[0,1], \tag{2.76}$$

а для нахождения случайного угла α<sub>2</sub>, имеющего косинусное распределение, необходимо воспользоваться выражением (1.39):

$$\alpha_2 = \arcsin(\sqrt{\xi[0,1]}).$$
 (2.77)

Уравнения (2.74)..(2.77) позволяют моделировать все необходимые для решения задачи случайные величины  $\varphi$ , r,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В случае присутствия в элементе сорбирующих поверхностей должны быть заданы дополнительные случайные числа, характеризующие поглощение молекул.

Вероятностная модель стационарного течения газа описывает случайную траекторию движения молекул в элементе. Для математического моделирования траектория движущихся молекул газа воспользуемся уравнением прямой в локальной для каждой поверхности системе координат

$$x'/b' = y'/m' = z'/n'$$
 (2.78)

где b', m', n' - направляющие косинусы каждой прямой в локальной системе координат, определяемые углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Для определения точки встречи молекулы с поверхностью элемента нужно преобразовать уравнение (2.78) в глобальную систему координат, в которой записаны уравнения определяющие конфигурацию элемента:

$$\frac{x-x_1}{b} = \frac{y-y_1}{m} = \frac{z-z_1}{n},$$
(2.79)

82

где  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $z_1$  - координаты точки вылета молекулы в глобальной системе координат; b, m, n - направляющие косинусы прямой в глобальной системе координат, которые определяют из преобразования

$$\begin{pmatrix} b \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 & m_1 & n_1 \\ b_2 & m_2 & n_2 \\ b_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} \begin{pmatrix} b' \\ m' \\ n' \end{pmatrix},$$

где  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , - направляющие косинусы глобальных осей по отношению к оси x';  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  - по отношению к оси y';  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  - по отношению к оси z'.

Совместное решение уравнения (2.79) со всеми уравнениями (2.73), определяющими конфигурацию элемента, позволяет получить точки пересечения. Пересечение прямой с плоскостью дает одну точку, с цилиндром - две. Логически могут быть отброшены точки пересечения, которые не лежат на внутренней поверхности элемента, в соответствии с ограничениями к уравнению (2.73) на внутренней поверхности элемента. Из оставшихся необходимо выбрать одну точку, находящуюся на минимальном расстоянии от исходной по направлению полета молекулы.

Для найденной таким образом точки пересечения вновь определяется случайное направление вылета. Углы вылета находятся аналогично  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  из (2.76) и (2.77), при этом они измеряются в локальной системе координат, в которой ось z' направлена по нормали к соответствующей поверхности вылета. Движение молекулы прослеживается до тех пор, пока она не покинет элемент через входное или выходное отверстие.

Исход каждого испытания есть случайная величина *X*, которая может иметь два значения: 0 и 1. Будем считать, что молекула проходит элемент, когда *X*=1. Траектория такой молекулы начинается от точки *B* на рис. 2.14.

Если молекула возвращается обратно, то X=0. Пример траектория такой молекулы, начинающейся от точки A, показан на рис. 2.14. Вероятность прохождения молекулой элемента от входного сечения 1 до выходного сечения 2 находится как среднеарифметическое значений случайной величины X при достаточно большом числе испытаний N:

$$P_{1\to 2} = \frac{1}{N} (X_1 + X_2 + ... + X_N), \qquad (2.80)$$

где *X*<sub>1</sub>..*X*<sub>N</sub> - значения случайной величины *X* для соответствующего испытания.

Поток газа, проходящий через элемент,

$$Q = Q_0 P_{1 \to 2}, \tag{2.81}$$

где  $Q_0$  - поток газа, входящий в элемент через входное отверстие.

Проведем статистическую оценку результатов. Определим характеристики случайной величины *X*. Пусть M(X),  $M(X^2)$  - математические ожидания случайных величин *X* и  $X^2$ :

$$M(X) = \sum_{i=1}^{2} P_{i}Y_{i}; \quad M(X^{2}) = \sum_{i=1}^{2} P_{i}Y_{i}^{2},$$

где  $P_i$  - вероятности исходов  $Y_i$  случайной величины X. Вероятность  $P_1$ , соответствующая  $Y_i = 1$ , равна  $P_{1\to 2}$ , а вероятность  $P_2$ , соответствующая  $Y_2 = 0$ , равна  $1 - P_{1\to 2}$ . Таким образом,

$$M(X) = M(X^2) = P_{1\to 2}.$$
 (2.82)

Используем значения полученных математических ожиданий для нахождения дисперсии случайной величины *X*:

$$D(X) = M(X^{2}) - [M(X)]^{2} = P_{1 \to 2}(1 - P_{1 \to 2}).$$
(2.83)

Среднеквадратичное отклонение случайной величины Х

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{P_{1 \to 2}(1 - P_{1 \to 2})}.$$
(2.84)

В соответствии с формулой Чебышева при любом фиксированном ε > 0

$$P(|X_{cp,N} - M(X)| \le \varepsilon) \ge 1 - \gamma.$$
(2.85)

При достаточно большом числе испытаний *N* среднеарифметическое  $X_{cp,N}$  отличается от M(X) не более чем на є с вероятностью не менее чем  $1 - \gamma$ , где

$$\gamma = D(X)/(N \varepsilon^2). \tag{2.86}$$

Относительная погрешность отклонения среднеарифметического от математического ожидания с учетом (2.86)

$$\delta = \frac{\varepsilon}{P_{1 \to 2}} = \frac{1}{P_{1 \to 2}} \sqrt{\frac{D(X)}{N\gamma}}.$$
(2.87)

Воспользовавшись выражением (2.83) для D(X), преобразуем (2.87), тогда

$$\delta = \sqrt{\frac{1 - P_{1 \to 2}}{P_{1 \to 2} N \gamma}}.$$
(2.88)

При фиксированном значении γ ошибка в расчетах убывает пропорционально корню квадратному из числа испытаний. Число испытаний можно определить из (2.88):

$$N = R \frac{1 - P_{1 \to 2}}{P_{1 \to 2}}.$$
 (2.89)

где  $R = 1 / (\delta^2 \gamma)$ . При  $P_{1 \to 2} = 0,5$  число испытаний N = R. В табл.2.3 приведены значения числа испытаний R для различных значений относительной погрешности расчета  $\delta$  и вероятности выполнения оценки  $1 - \gamma$ .

Из таблицы видно, что при  $P_{1\rightarrow 2} = 0,5$  погрешность 10% с вероятностью 0,99 может быть достигнута при 10000, а с вероятностью 0,9 - при 1000 испытаний.

Таблица 2.3

δ	$1-\gamma$						
	0,99	0,97	0,95	0,90			
0,01	1,0.10 <sup>6</sup>	3,3.10 <sup>5</sup>	2,0.10 <sup>5</sup>	1,0.10 <sup>5</sup>			
0,02	$2,5.10^5$	8,3.10 <sup>4</sup>	5,0.10 <sup>4</sup>	$2,5.10^4$			
0,03	1,1.10 <sup>5</sup>	3,7.10 <sup>4</sup>	$2,2.10^4$	1,1.10 <sup>4</sup>			
0,04	6,3.10 <sup>4</sup>	2,1.10 <sup>4</sup>	1,3.10 <sup>4</sup>	$6,3.10^3$			
0,05	4,0.104	1,3.10 <sup>4</sup>	8,0.10 <sup>3</sup>	$4,0.10^3$			
0,10	$1,0.10^4$	$3,3.10^3$	$2,0.10^3$	$1,0.10^3$			

### Значения коэффициента R

Недостатком метода статистических испытаний является необходимость проведения большого числа испытаний для получения приемлемой точности, что требует обязательного применения вычислительной техники.

Достоинством метода является универсальность вычислительного алгоритма. Для расчета нового элемента требуется только аналитически задать его конфигурацию.

#### 2.7. Газовыделение

Выделение газов из твердых тел в вакуум является следствием поглощения газа во время изготовления или предварительной обработки материала. Газовыделение можно разделить на два вида: десорбционное и диффузионное (Рис.2.15). Первое связано с выделением газов с поверхности, а второе - из объема материала. Некоторые газы выделяются в основном с поверности, другие - из объема материала. В атмосферном воздухе, имеющем влажность 50%, давление паров воды составляет 10<sup>3</sup> Па. При этом на



Рис.2.15. Содержательная модель газовыделения: 1 – вакуумная камера, 2 – вакуумный насос

поверхности всех материалов адсобируется несколько монослоев воды. Bo время откачки камеры происходит их выделение, что значительно удлиняет время откачки. При производстве стали в ее объеме растворяется значительное количество Более водорода. сложные явления возникают при химических реакциях. Адсорбированная вода, например, при каталитических реакциях может разлагаться на водород и кислород. Водород при этом будет растворяться в объеме материала.

При малых теплотах адсорбции, соответствующих малым временам адсорбции и значениям *А*>>1, адсорбционное равновесие устанавливается очень быстро, и скорость десорбционного газовыделения можно определить через скорость изменения давления.

$$q_{\rm äc} = \frac{da}{dp} \cdot \frac{dp}{dt}.$$
(2.90)

Если справедливо уравнение Френдлиха(1.57), то da/dp =  $a_M$ dmp<sup>m-1</sup>.

Уравнение откачки вакуумной камеры, к которой подключен вакуумный насос, а внутренняя поверхность покрыта адсорбируемым газом, можно записать в виде

$$V_{\scriptscriptstyle \theta} \, \frac{dp}{dt} + Sp + q_{\scriptscriptstyle ac} F = 0, \tag{2.91}$$

где  $V_{\kappa}$  - объем камеры, p – давление, S – эффективная быстрота откачки камеры,  $q_{\text{дс}}$  – удельное газовыделение, F – площадь внутренней поверхности камеры. С учетом (2.90) уравнение откачки (2.91) можно переписать в виде



Рис.2.16. Десорбцонное газовыделение паров воды с нержавеющей стали при 298 К: а - зависимость дополнительного объема от давления б – удельное десорбционное газовыделение

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{Sp}{V_{\hat{e}} + V_{a}},\qquad(2.93)$$

где V<sub>д</sub> – дополнительный объем.  $V_{a} = a_{M} dm p^{m-1} F$ .

Дополнительный объем возникает из-за десорбции газа со стенок и его величина зависит от давления. Увеличение дополнительного объема при снижении давления показано на Рис.2.16,а для паров воды на нержавеющей стали при комнатной температуре.

Подставляя (2.93) в (2.91), определим удельное десорбционное газовыделение в виде

$$q_{\rm ac} = \frac{p}{f + \frac{v}{a_{\rm M} dm p^{m-1}}},$$
(2.94)

где  $v = V_{\kappa}/S$ , f = F/S. Для паров воды на нержавеющей стали при v=f=1 1 для комнатной температуры зависимость удельного газовыделения от давления показана на рис 2.16,б.

Если адсорбционное равновесие устанавливается достаточно медленно, то (2.90) несправедливо и для определения  $q_{\rm ac}$  нужно, задавшись законом изменения dp / dt, продифференцировать (1.60).

(2.92)

Диффузионное газовыделение связано с выделением газа из деталей, расположенных внутри вакуумной камеры, или газопроницаемостью через ее стенки. Рассмотрим случай, когда массообмен происходит только в поверхностном слое, толщина которого значительно меньше толщины деталей. При этом деталь можно рассматривать как полубесконечное тело. Длина детали должна быть существенно больше ее толщины. Это позволяет считать задачу одномерной.

Предположим, что начальная концентрация газа в детали постоянна и равна  $s_0$ . Давление газа над поверхностью детали также будем считать постоянным, а равновесную концентрацию газа в детали, соответствующую этому давлению, обозначим через  $s_m$ . Независимость  $s_0$  и  $s_m$  от времени соответствует граничным условиям первого рода.

На практике такая задача часто встречается, когда обезгаживание деталей происходит при постоянных температуре и давлении, а коэффициент диффузия достаточно мал:  $D < 0.1h^2 / t_{max}$ , где h - половина толщины детали;  $t_{max}$  - максимальная длительность процесса масообмена. Математически данную задачу можно записать в следующем виде

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial x^2};$$

$$t = 0; \ s(x,0) = s_0; \quad x = 0; \ s(0,t) = s_m;$$

$$t = \infty; \ s(x,\infty) = s_m; \quad x = \infty; \ \frac{\partial s(\infty,t)}{\partial t} = 0.$$
(2.95)

Решение (2.95) при указанных граничных условиях можно представить в виде функции безразмерного времени  $\tau = Dt / h^2$ :

$$s(x/h,\tau) = s_m + (s_0 - s_m) \operatorname{erf}\left(\frac{x/h}{2\sqrt{\tau}}\right),$$
 (2.96)

где erf(U)=  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{U} e^{-U^{2}} dU$  - функция ошибок Гаусса. Результаты расчетов по формуле (2.96)

- для различных отношений x / h при поглощении газа, когда  $s_m > s_0$ , показаны на рис.2.17,а; а при выделении газа, когда  $s_m < s_0$ , - на рис.2.17,б.



Рис.2.17. Распределение концентрации в полубесконечном теле: а –поглощение газа, б – выделение газа

Так как удельный газовый поток через единицу поверхности, обращенную в вакуум,

$$q = -D\frac{ds}{dx}\Big|_{x=0} = -\frac{(s_0 - s_m)D}{h} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}},$$
(2.97)

то удельное количестве газа, участвующего в массообмене,

$$a = \int_{0}^{t} q dt = -2(s_0 - s_m)h\sqrt{\tau/\pi}.$$
(2.98)

При этом средняя концентрация газа в теле

$$s_{\tilde{n}\tilde{o}} = s_0 - 2(s_0 - s_m)\sqrt{\tau/\pi}, \qquad (2.99)$$

а степень массообмена, т.е. отношение количества газа, участвующего в массообмене, к полному количеству газа, находящемуся в твердом теле до начала массообмена,

$$\sigma = \frac{|a|}{s_0 h} = 2 \left( 1 - \frac{s_m}{s_0} \right) \sqrt{\tau / \pi}.$$
(2.100)

Степень массообмена определяет абсолютную степень обезгаженности или газонасыщенности тела и может являться расчетным критерием для выбора типового технологического процесса обработки деталей в вакууме.

Критерием для выбора времени технологического процесса, связанного с выделением или поглощением газа, может служить эффективность массообмена

$$v = \frac{\sigma}{(s_0 - s_m) / s_0} = 2\sqrt{\tau / \pi}, \qquad (2.101)$$

которая представляет собой отношение достигнутой степени массообмена к максимально возможной при данных условиях.

На рис.2.18 показаны графики зависимости удельного безразмерного потока и эффективности массообмена от безразмерного времени.

Пользоваться приведенными формулами можно для твердых тел любой формы при τ ≤ 0,I, откуда следует приведенное выше ограничение по коэффициенту диффузии. При этом тело еще может считаться бесконечным в



Рис.2.18. Безразмерный газовый поток – 1 и эффективность массообмена – 2 в зависимости от безразмерного времени

направлении оси х. Максимальная эффективность массообмена, которая может быть достигнута при условии τ ≤ 0,I, составляет 36%.

В тех случаях, когда требуется получить большие степени массообмена или  $\tau > 0,I$ , необходимо учитывать форму деталей, из которых выделяется или поглощается газ. Для этого нужно искать решение задачи (2.95) при новых граничных условиях. Для деталей типовых форм - шара, пластины, цилиндра; такие решения имеются в специальной литературе.

Диффузионное газовыделение сильно зависит от рода материала и его предварительнойобработки. Конструктивным способом борьбы с диффузионным газовыделением является выбор материалов, предварительно прошедших обезгаживание при высокой температуре (более 1000°С) в печах вакуумного или водородного отжига. Для материалов, не допускающих высокотемпературной обработки, используется их охлаждение в процессе работы

Рассмотренный случай газовыделения или газопоглощения относится к деталям, расположенным внутри вакуумной камеры. Для стенок вакуумной камеры кроме нестационарного диффузионного газовыделения из объема материала наблюдается газопроницаемость - дополнительный поток, являющийся следствием разности давлений газа в объемах, разделяемых перегородкой.

Рассмотрим нестационарную газопроницаемость через стенку вакуумной камеры, имеющей форму неограниченной пластины, при несимметричных граничных условиях. Будем считать, что концентрация газа в пластине и давление со стороны вакуума  $s_0$  и  $p_0$ , а со стороны атмосферы -  $s_a$  и  $p_a$ . Начальная концентрация газа в пластине равна  $s_0$ . Математическая формулировка задачи:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}.$$

Граничные условия:

$$t = 0; s(x,0) = s_0; \qquad x = 0; s(0,t) = s_0;$$
  
$$t = \infty; s(x,\infty) = (s_a - s_0) \frac{x}{2h} + s_0; \qquad x = 2h; s(2h,t) = s_a.$$

Решение задачи можно записать в функции безразмерного времени  $\tau = Dt^2/h^2$ .

$$s(x,t) = s_0 + \frac{s_a - s_0}{2h} + \frac{2(s_a - s_0)}{\pi} \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin \frac{k\pi x}{2h} \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2 \tau}{4}\right).$$

Тогда скорость газопроницаемости в момент времени т

$$q = -D\frac{\partial s(0,t)}{\partial x} = -\frac{D(s_a - s_0)}{2h} - \frac{2(s_a - s_0)D}{2h} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2 \tau}{4}\right).$$
(2.102)

При  $t \rightarrow \infty$  это уравнение превращается в стационарную зависимость (1.67).

Общее количество газа, проникшего в вакуумную камеру за время t,

$$G = -\int_{0}^{t} q dt = -\frac{(s_a - s_0)\tau h}{2} + \frac{(s_a - s_0)h}{3} + \frac{4(s_a - s_0)h}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 k^2 \tau}{4}\right).$$
(2.103)



Рис.2.19. Газопроницаемость вакуумной камеры: a – распределение концентрации, δ – количество газа, прошедшего через стенку

На рис. 2.19,а показано распределение концентрации газа в стенке вакуумной камеры, а на рис. 2.19,б - количество газа, выделившееся из стенки вакуумную камеру за время τ. При τ > 0,67 уравнение (2.102) можно упростить:

$$q = \frac{(s_a - s_0)D}{2ht} \left[ t - \frac{(2h)^2}{6D} \right].$$
 (2.104)

Это упрощенное уравнение позволяет рассчитать количество газа, выделившегося вакуумную камеру:

$$G = qt = -\frac{(s_a - s_0)D}{2h} \left[ t - \frac{(2h)^2}{6D} \right].$$
 (2.105)

Результаты расчетов по уравнению (2.105) показаны пунктиром на рис. 2.19,6. При τ ≤ 0,67 газопроницаемость считается равной нулю, а время задержки

$$t_{\varsigma} = \frac{\sqrt{0.67} \cdot h}{\sqrt{D}} = 0.82 \frac{h}{\sqrt{D}}.$$
(2.106)

#### 2.8. Основное уравнение

Рассмотрим схему простейшей вакуумной системы (рис. 2.20) состоящую из откачиваемого объекта 1, манометрических преобразователей 2 и 3, насоса 4 и соединительного трубопровода 5. Течение газа из откачиваемого объекта в насос происходит за счет разности давлений ( $p_{o-} p_1$ ), причем  $p_o > p_1$ .



Быстроту откачки насоса *S<sub>i</sub>* в произвольном сечении соединительного трубопровода можно определить как объем газа, проходящий через это сечение в единицу времени:

$$S_i = dV_i / dt.$$

Объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта в трубопровод через сечение 0 при давлении *p*<sub>0</sub> называется быстротой откачки объекта или эффективной быстротой откачки насоса:

$$S_0 = dV_2/dt$$
.

Объем газа, удаляемый насосом в

единицу времени через входной патрубок

Рис.2.20. Простейшая вакуумная система

(сечение I) при давлении  $p_1$  - это быстрота действия насоса:

$$S_{\rm H} = dV_1/dt$$

Отношение эффективной быстроты откачки к быстроте действия насоса называется коэффициентом использования насоса:

$$K_u = S_o / S_{\scriptscriptstyle H} \tag{2.107}$$

Поток газа, проходящий через заданное поперечное сечение трубопровода, называется производительностью откачки в этом сечении.

$$Q = p_i S_i$$

Если поток газа остается постоянным во всех сечениях трубопровода, то уравнение баланса массы dQ / dx = 0 превращается в уравнение сплошности потока. Поток при этом остается неизменным во всех сечениях вакуумной системы, а источник газовыделения

находится в откачиваемом объекте, что характерно для вакуумных систем со сосредоточенными параметрами

$$Q = p_1 S_{\rm H} = p_o S_o. \tag{2.108}$$

Для участка вакуумной системы, состоящей из группы трубопроводов, затворов, ловушки и т.д. можно записать уравнение (2.35)

$$Q = U_o (p_o - p_1), (2.109)$$

где  $U_0$  - проводимость участка вакуумной системы,  $p_0$  и  $p_1$  - давления на концах участка вакуумной системы.

Проводимость является коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давлений. Она численно равна количеству газа, протекающему по участку вакуумной системы в единицу времени при разности давлений на его концах, равной единице. Сопротивление - это величина, обратная проводимости:

$$Z = 1/U_{\rm o}$$

Установим связь между тремя основными характеристиками вакуумной системы: быстротой действия насоса  $S_{\rm H}$ , эффективной быстротой откачки объекта  $S_{\rm o}$  и проводимостью вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом  $U_{\rm o}$ . Воспользовавшись (2.108) и (2.109), можно записать:

$$S_{H} = Q/p_{1} = U_{o}(p_{o} - p_{1})/p_{1};$$
  
$$S_{o} = Q/p_{o} = U_{o}(p_{o} - p_{1})/p_{o}.$$

Если переписать эти уравнения в виде

$$\frac{1}{S_i} = \frac{p_1}{(p_o - p_1)U_o}, \qquad \frac{1}{S_o} = \frac{p_o}{(p_o - p_1)U_o};$$

то после вычитания первого выражения из второго получим

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_H} = \frac{1}{U_o}.$$
(2.110)

Уравнение (2.110) называют основным уравнением вакуумной техники. Его можно также переписать в виде

$$\mathbf{S}_{\mathrm{o}} = \mathbf{S}_{\mathrm{H}} \mathbf{U}_{\mathrm{o}} / (\mathbf{S}_{\mathrm{H}} + \mathbf{U}_{\mathrm{o}})$$

При условии  $S_{\rm H} = U_{\rm o}$  получим, что  $S_{\rm o} = 0.5S_{\rm H}$ . Если  $U_{\rm o} \rightarrow \infty$ , то  $S_{\rm o} \rightarrow S_{\rm H}$ ; при  $U_{\rm o} \rightarrow 0$  следует, что  $S_{\rm o} \rightarrow 0$ . Вводя в основное уравнение коэффициент использования насоса  $K_u$ , согласно (2.107), получим два полезных соотношения:

$$K_{\mu} = U_{o} / (S_{\mu} + U_{o});$$
 (2.111)

$$U_{0} = S_{H} K_{u} / (1 - K_{u}). \qquad (2.112)$$

Графическая интерпретация уравнения (2.111) приведена на рис. 2.21. Максимальное значение коэффициента использования насоса равно единице. .При этом проводимость трубопровода значительно превышает быстроту действия насоса.



Рис.2.21. Зависимость коэффициента использования от отношения проводимости к быстроте действия насоса

## 2.9. Контрольные вопросы

2.1. Почему вводится понятие различных степеней вакуума, и какой критерий используется для их определения ?

2.2. Что такое эффективный размер вакуумной камеры?

2.3. Чем объяснить то, что коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности газа не зависят от давления в области низкого вакуума?

2.4. Как зависит проводимость трубопроводов от давления при вязкостном режиме течения?

2.5. Какое значение проводимости отверстия нужно принимать в качестве первого приближения при расчете вакуумных систем?

2.6. Какие способы передачи тепла эффективны при высоком вакууме?

2.7. Чем определяется пробивное напряжение вакуумного промежутка?

2.8. Почему искровой разряд возникает при напряжении в несколько тысяч вольт, а для дугового разряда достаточно 40-50 В?

2.9. Какую поправку нужно вносить в показания манометрического преобразователя, присоединенного к вакуумной камере через азотную ловушку?

2.10. Как определить понятие сверхвысокого вакуума?

2.11. Какие режимы течения газа характерны для вакуумных систем?

2.12. Какие единицы потока газа используются в вакуумной технике?

2.13. Какой существует закон распределения скоростей газового потока в зависимости от радиуса трубопровода при вязкостном режиме течения газа?

2.14. При каком режиме течения газа существует прямой и обратный газовый поток в трубопроводе?

2.15. Как зависит проводимость при вязкостном режиме течения газа от диаметра трубопровода?

2.16. Как зависит проводимость от диаметра при молекулярном режиме течения газа в трубопроводе?

2.17. Какие свойства угловых коэффициентов можно использовать при расчетах вакуумных систем?

2.18. При каком режиме течения газа для расчета вакуумных систем можно пользоваться имитационным моделированием?

2.19. Чем определяется точность расчета при математическом моделировании вакуумных систем?

2.20. От чего зависит коэффициент использования вакуумных насосов?

### 2.10. Задачи

- 2.1. Определить степень вакуума в сферической камере диаметром 1м, заполненной воздухом при T=293 К и давлении 10<sup>-4</sup> Па.
- 2.2. Найти давление азота соответствующее переходу между высоким и средним вакуумом в концентрической вакуумной камере длиной 1м, образованной цилиндрами диаметром 1 м и 0.5 м при температуре 293 К.
- 2.3. Во сколько раз будут отличатся давления перехода между различными степенями вакуума для сферической камеры диаметром 1 м и кубической камеры со стороной 1 м?
- 2.4. Рассчитать силу трения в области низкого вакуума при движении пластины площадью 2 м<sup>2</sup> со скоростью 100 м / с в водороде на расстоянии 0,1 м от неподвижной плоской поверхности.
- 2.5. Какое количество жидкого азота испарится в течении часа из ловушки для паров масла, если площадь охлаждаемой поверхности 100 см<sup>2</sup>, материал ловушки нержавеющая сталь, теплота испарения жидкого азота 200 Дж / г, остаточным газом является азот при давлении 10<sup>-2</sup> Па, а температура корпуса ловушки равна 300 К ?

- 2.6. Определить отношение давлений, показываемых манометрами, установленными на вакуумной печи, имеющей температуру 1273 К, и на трубопроводе, имеющем температуру 293 К, при высоком вакууме и при отсутствии газовых потоков.
- 2.7. Определить отношение давлений в двух трубопроводах, имеющих комнатную температуру, между которыми установлена ловушка с температурой 77 К.
- 2.8. Вакуумная система, давление азота в которой 10 Па, состоит из трех баллонов, соединенных между собой трубопроводами диаметром 0,4 м и 0,01 м. Температура баллонов соответственно 293, 500, 1000 К. Определить отношение давлений, которые установятся во всех баллонах при отсутствии газовых потоков.
- 2.9. В условиях высокого вакуума соединили между собой два сосуда, температуры которых соответственно 300 и 600 К, а давления 10<sup>-4</sup> и 10<sup>-6</sup> Па. Каковы давления в сосудах после их соединения, если объем первого сосуда 1, а второго 2 л.
- 2.10. Вакуумный прибор, в котором нет откачных средств, объемом 0,01 м<sup>3</sup> должен храниться в течение года ( 3,5 .10<sup>7</sup> с ) в атмосфере водорода при перепаде давлений 2.10<sup>5</sup> Па. За время хранения допустимое повышение давления из-за негерметичности равно 10<sup>-2</sup> Па. Каковы требования к чувствительности течеискателя, использующего гелий в качестве пробного газа при перепаде давлений 10<sup>5</sup> Па.
- 2.11. Какой поток воздуха будет протекать через отверстие диаметром 0,2 м, давление с одной стороны которого 10 Па, а с другой 8 Па, если температура равна 298 К ?
- 2.12. Во сколько раз изменится поток газа через трубопровод диаметром 0,1 м и длиной 1 м при изменении среднего давления в трубопроводе от 1 до 100 Па при температуре 500 К?
- 2.13. Определить проводимость по воздуху круглого конического трубопровода длиной 1 м, если его минимальный диаметр равен 0,1, максимальный 0,3 м; T=300 K, а режим течения газа - молекулярный.
- 2.14. Какова должна быть длина трубки диаметром 0,001 м, один конец которой открыт на атмосферу, а второй соединен с насосом, производительность которого 5.10<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / с?
- 2.15. При каком давлении будет наблюдаться минимальное пробивное напряжение промежутка 30 мм, T = 300 K, M = 28 кг / кмоль ?
- 2.16. На каком расстоянии от входной щели масс-спектрометра должна находится выходная щель для попадания в нее ионов азота в скрещенном электрическом и

магнитном поле, если ускоряющее напряжение перед входной щелью равно 1000 В, индукция магнитного поля 0,1 Т, а элементарный заряд иона 1,6.10<sup>19</sup> К ?

- 2.17. До какой температуры нужно нагреть поверхность, эмитирующую электроны, чтобы они имели энергию такую же как после ускорения в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В.
- 2.18. Какое количество ионов азота, образуется при прохождении электроном межэлектродного промежутка 20 мм, имеющем линейное распределение разности потенциалов от 0 до 40 В, при давлении 10<sup>-2</sup> Па, если эффективность ионизации равна 0,5 Па<sup>-1</sup>, а потенциал ионизации равен14,5 В ?
- 2.19. Какой путь пройдет α-частица с начальной энергией 4,75.10<sup>6</sup> эВ в азоте при давлении 10<sup>5</sup> Па и температуре 300 К до потери избы точной энергии, если энергия ионизации равна 14,5 эВ ?
- 2.20. Определить давление азота, при котором в условиях циклотронного резонанса длина свободного пути будет больше длины траектории иона до попадания на коллектор, расположенный на расстоянии 20 мм от оси ионизирующего излучения, если индукция магнитного поля B = 0,1 T ?
- 2.21. На какое расстояние отстанет ион кислорода от иона азота, пролетев расстояние 1 м, если начальная энергия ионов одинакова и равна 100 эВ ?
- 2.22. Плоский конденсатор находится в водороде при давлении 10<sup>2</sup> Па. Будет ли происходить в конденсаторе ионизация атомов водорода от столкновения с электронами, если напряжение на конденсаторе 400 В, расстояние между его пластинами 25 мм, а потенциал ионизации водорода 13,54 эВ.
- 2.23. При какой рабочей температуре вольфрамового катода электроны, обладающие средней кинетической энергией ,соответствующей этой температуре, смогут совершить работу выхода 4,54 В ?
- 2.24. В электронной лампе с поверхности катода в виде нити диаметром 0,16 мм и длиной 50 мм испускается 1,5.10<sup>17</sup> электронов с квадратного сантиметра в секунду. Определить сеточный ток положительных ионов, если давление азота в лампе 10<sup>-2</sup> Па, расстояние между катодом и анодом 1 см, а анодное напряжение 100 В ?

## Глава 3. Измерение вакуума

#### 3.І. Классификация методов измерения

Область давлений, используемая в современной вакуумной технике, очень широка –  $10^5$ .  $10^{-12}$  Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне не может быть обеспечено одним прибором. В практике изменения давления разреженных газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называют вакуумметрами. Они обычно состоят из двух частей: манометрического преобразователя и измерительной установки. По методу измерения вакуумметры могут быть разделены на абсолютные к относительные. Показания абсолютных приборов не зависят от рода газа и могут быть заранее рассчитаны В приборах для относительных измерений используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Они нуждаются в градуировке по образцовым приборам. Вакуумметры измеряют общее давление газов, присутствующих в вакуумной системе. На рис.3.I показаны диапазоны рабочих давлений различных типов вакуумметров.

Измерители парциальных давлений, как и измерители общих давлений, характеризуются нижним и верхним пределами измеряемых парциальных давлений, чувствительностью, а также свойственным только им параметром разрешающей способностью. Под разрешающей способностью понимается



Рис.3.1. Диапазоны рабочих давлений вакуумметров

отношение молекулярной массы газа M к наименьшему различаемому ее изменению  $\Delta M_{\rm e}$ 

#### $\rho_{\rm M} = M / \Delta M.$

В зависимости от типа прибора во всем диапазоне изменения могут оставаться постоянными значения  $\rho_M$ ,  $M / \rho_M$ ,  $M \cdot \rho_M$ . Экспериментально разрешающую способность определяют по масс-спектру. Ширина пика измеряется на уровне 10 или 50% высоты пика.

Измерение парциальных давлений в вакуумных системах в настоящее время проводят двумя методами: ионизационным и сорбционным.

Ионизационный метод основан на ионизации и разделения положительных ионов в зависимости от отношения массы иона к его заряду. Можно одновременно или поочередно измерять составляющие ионного тока, соответствующие парциальным давлениям различных газов, присутствующих в вакуумной системе.

Для разделения ионного тока на составляющие используется различие скоростей движения ионов различных газов, прошедших одинаковую разность потенциалов, т. е. обладающих одинаковой энергией:  $mv^2 / 2 = Uq$ , откуда следует выражение для скорости иона

$$v = \sqrt{2Uq/m}.\tag{3.1}$$

Скорость иона определяется отношением *m/q*. В большинстве случаев при ионизации газов медленными электронами образуются ионы, имеющие один элементарный положительный заряд, вследствие чего (с приемлемой для большинства измерений точностью) можно считать, что скорости ионов в электрическом поле обратно пропорциональны корню из молекулярной массы газа.



Отношение  $M_e = M / n_q$  называют массовым числом иона. Здесь M молекулярная масса, выраженная в атомных единицах массы (а.е.м.);  $n_q$  число элементарных зарядов; 1 а.е.м. равна 1/16 массы основного изотопа кислорода <sup>16</sup>О. Для однозарядных ионов массовое число совпадает с молекулярной массой иона. Например,

для однозарядного иона  $CO_2^+ M_e = 44$  а.е.м В результате измерений ионных токов, соответствующих различным массовым числам, получается масс-спектр (рис.3.2).

Чувствительность ионизационных газоанализаторов определяется как отношение изменения ионного тока в цепи коллектора к вызывающему его изменению парциального давления газа, выражается в А/Па и зависит от рода газа.

Верхний предел измеряемых давлений определяется отклонением от линейной зависимости между ионных током и соответствующим ему парциальным давлением вследствие рассеивания ионов в анализаторе. Предельно допустимое значение такого отклонения-10%. Максимальные рабочие давления обычно не превышают 10<sup>-3</sup> .. 10<sup>-2</sup> Па. При

более высоких давлениях для анализа газов требуются расширительные устройства или вспомогательная вакуумная система, обеспечивающие снижение плотности анализируемой газовой смеси без изменения процентного состава ее компонентов.

Нижним пределом измеряемых парциальных давлений считается минимальное абсолютное давление, измеряемое прибором с заданной точностью. Минимальное парциальное давление газов, которое может быть определено при данном отношении сигнал/шум, называют порогом чувствительности. За начало регистрации можно принимать сигнал, вдвое превышающий шум.

В зависимости от характера используемых электрических и магнитных полей ионизационные методы измерения парциальных давлений можно разделить на статические и динамические. В статических методах используются постоянные, а в динамических - переменные электромагнитные поля.

К ионизационным статическим газоанализаторам относятся магнитный и панорамный, а к динамическим - омегатронный, времяпролетный, квадрупольный и монополярный фильтры масс. Разрешающая способность промышленных приборов находится в пределах 40 .. 500 а. е. м.

Сорбционный метод измерения парциальных давлений использует анализ адсорбированных газов. В одной из его разновидностей - термодесорбционном методе изза различных теплот адсорбции остаточных газов нагревание поверхности по определенному временному закону сопровождается последовательной десорбцией компонентов газовой смеси. Недостатком метода является невозможность регистрации плохо адсорбируемых газов He, Ne и H<sub>2</sub>.

Другой разновидностью сорбционного метода является Оже-спектрометрия - метод анализа веществ на поверхности твердого тела по характерным энергиям электронов, эмиттируемым при внутриатомном переходе электронов между энергетическими уровнями. Исследуемая поверхность подвергается воздействию ионизирующего излучения, чаще всего первичным потоком электронов с энергией, в 3..5 раз большей потенциала ионизации соответствующего уровня. Глубина выхода Оже-электронов в среднем около 1 нм, т. е. получаемая этим методом информация относится к поверхности исследуемого образца. По составу веществ на поверхности можно определить состав хорошо адсорбирующихся веществ в газовой фазе.

Этот метод нашел широкое применение для контроля элементного состава поверхности, оценки эффективности различных методов очистки подложек, процессов диффузии и миграции, эпитаксии, адсорбции и десорбции.

101

Газовый поток - это масса газа, проходящая в единицу времени через заданное поперечное сечение элемента вакуумной системы. В Международной системе единицей газового потока является кг / с. Потоки индивидуальных веществ можно измерять также количеством киломолей газа, проходящих через заданное сечение элемента вакуумной системы в единицу времени.

При постоянной температуре газа часто используют внесистемную единицу газового потока м<sup>3</sup>Па / с. Для воздуха при 273 К 1 м<sup>3</sup>Па =  $1,3.10^{-5}$  кг. Стационарный поток газа, выраженный в м<sup>3</sup>Па / с, можно записать в виде

$$Q=U(p_1-p_2),$$

где *U* - проводимость вакуумной системы. Это уравнение может быть использовано для измерения стационарных газовых потоков методом двух манометров по перепаду давления на вакуумном элементе известной проводимости.

Выражение для определения как стационарных, так и нестационарных газовых потоков можно записать в дифференциальной форме:

$$Q = \frac{d(pV)}{dt} = p\frac{dV}{dt} + V\frac{dp}{dt}.$$
(3.2)

В соответствии с уравнением (3.2) для измерения газовых потоков используют два метода: постоянного давления и постоянного объема. В методе постоянного давления измерение потока осуществляется по скорости изменения объема газа. В методе постоянного объема поток газа измеряется по скорости изменения давления.

Описанные методы измерения потоков считаются абсолютными. Косвенные методы тепловые, радиоизотопные, ионизационные нуждаются в градуировке по абсолютным методам
## 3.2. Механические методы

К механическим методам относятся: деформационный, гидростатический и вязкостный. Деформационный метод основан на измерении деформации мембранных элементов под воздействием разности давлений. Для измерения деформации могут использоваться рычажные или зубчатые механизмы, изменение емкости конденсатора или индуктивности катушки. При небольших деформациях сохраняется удобная для измерений линейность между давлением и деформацией. При нулевом методе измерения деформация рабочего элемента равна нулю за счет компенсации измеряемого давления давлением других газов или электростатическими силами. Возможность расчета деформации с требуемой точностью делает эти манометры абсолютными. Чувствительность метода увеличивается при снижении жесткости рабочего элемента. Она ограничена механической прочностью и возникновением пластических деформаций.

Верхний предел измерения может быть равен атмосферному давлению. Нижний предел ограничен температурными деформациями и упругим последействием элемента. Упругим последействием называют длительное возвращение деформированного элемента в исходное состояние после снятия нагрузки.

Трубка Бурдона (рис 3.3) деформационный манометр в виде спиральной трубки 2, скручивающейся под действием атмосферного давления в случае откачки внутренней полости за счет разных радиусов кривизны, а следовательно, и площадей наружной и внутренней поверхностей трубки.

Подсчитаем силы F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>, действующие соответственно на поверхности с большим и меньшим радиусами:

 $F_1 = (p_a - p)A_1;$   $F_2 = (p_a - p)A_2,$ где  $p_a$  - атмосферное давление; p - давление в трубке;  $A_1$  и  $A_2$  -



Рис.3.3. Деформационный преобразователь (Трубка Бурдона)

площади наружной и внутренней поверхностей участка спиральной трубки. Измерительное

уравнение связывает между собой перемещение конца трубки x и разность давлений  $p_a - p$  соотношением

$$\Delta F = F_1 - F_2 = (p_a - p)(A_1 - A_2) = cx_1$$

где с - жесткость трубки.

Манометр измеряет давления в пределах 10<sup>5</sup>..10<sup>3</sup> Па. Измерение давлений ниже 10<sup>3</sup> Па затруднено тем, что трубка при малой жесткости должна быть достаточно прочной, чтобы выдержать атмосферное давление. Погрешность измерения равна 5% и ограничена упругим последействием трубки. К вакуумной системе манометр подключается через штуцер 4. Регистрация перемещения спиральной трубки обычно рычажно-стрелочная, когда конец спиральной трубки связан через зубчатый сектор 3 со стрелкой 1.



Рис. 3.4. Различные типы деформационных преобразователей

Деформационные мембранные преобразователи различаются В способа регистрации зависимости от перемещения мембраны И метода измерения. В барометрах используется схема, показанная на рис.3.4,а. Внутри образованной герметичной полости, мембранами 1, создается сравнительное давление *p*<sub>ср</sub>. Если измеряемое давление р не равно *p*<sub>ср</sub>, то происходит деформация мембраны И перемещение стрелки, пропорциональное разности давлений

(*p*<sub>cp</sub> – *p*)= *кх*, где *к* - коэффициент пропорциональности. Такой прибор измеряет разность давлений и поэтому называется дифференциальным.

На этом же принципе работает мембранный преобразователь (рис.3.4,б), но в нем применен емкостный метод регистрации перемещения. Мембрана 2 в этом приборе герметично разделяет корпус 1 на две камеры, в одной из которых поддерживается сравнительное давление

p<sub>cp</sub>, а другая присоединяется патрубком 5 к вакуумной системе. Через изолятор 4 в нижнюю

камеру вводится электрод 3, образующий с мембраной конденсатор, емкость которого является функцией давления Этот преобразователь может измерять абсолютное давление в вакуумной системе, если  $p_{cp} = 0$ .

Мембранный преобразователь с двумя электродами (рис.3.4, в) работает при нулевой деформации мембраны. На электрод 2 подается переменное напряжение, позволяющее определить емкость и положение мембраны. На электрод 1 прикладывается постоянное напряжение, которое за счет электростатических сил возвращает мембрану к исходному положению, компенсируя воздействие разности давлений. Разность давлений в этом приборе пропорциональна квадрату постоянного напряжения, приложенного к электроду 1.

Диапазон измерения мембранных преобразователей 10<sup>5</sup>..10<sup>-1</sup> Па. Но так как линейность показаний сохраняется только при небольших деформациях мембраны, то один прибор может измерять давления, лежащие в пределах 2..3 порядков.

В гидростатическом методе измеряемая разность давлений уравновешивается весом столба жидкости высотой *h*:

$$(p_{\rm cp}-p)=g\rho h.$$

где *g* - ускорение земного притяжения; р - плотность жидкости.

В качестве рабочей жидкости для заполнения рассмотренных манометров применяют ртуть и масло. Масляные большую манометры имеют чувствительность, так как плотность масла примерно в 15 раз меньше плотности ртути. Однако масло хорошо растворяет газы, и перед работой требуется его тшательное обезгаживание.

Пределы измерения ртутных манометров  $10^5$ ..  $10^3$  Па, а масляных -  $10^4$ .. $10^0$  Па. Погрешность при отсчете уровня h может быть доведена до 0,1 мм.



Рис.3.5. Жидкостные манометры: а - с открытым коленом, б - с закрытым коленом

Более точное измерение уровня не имеет смысла из-за непостоянства величины поверхностного натяжения, колебаний плотности, температурных градиентов и т. д. Чувствительность манометров к перепаду давлений в основном ограничивается вязкостью самой жидкости.

Манометры с открытым коленом (рис.3.5,а) удобны для измерения давлений, близких к атмосферному. В этом случае  $p_{cp} = p_a$  и высота столба *h* минимальна. Показания такого манометра зависят от атмосферного давления. В манометре с закрытым коленом (рис. 3.5,б) перед заполнением рабочей жидкостью получают давление  $p_{cp} = 0$ , что позволяет непосредственно измерять абсолютное давление газа в вакуумной системе, В этом случае показания прибора не зависят от атмосферного давления. При измерении давлений меньших, чем  $2.10^4$  Па манометр с закрытым коленом имеет меньшие габариты, чем манометр с открытым коленом.



Гидростатические манометры с предварительным сжатием газа компрессионными. называются Компрессионный манометр (рис.3.6) состоит из измерительного баллона 2 с капилляром  $K_1$ , резервуара со ртутью 1, соединительного трубопровода 3 с капилляром К2. Через азотную ловушку 4 манометр подключается к вакуумной системе. Баллон 2 перед началом измерений соединяется с вакуумной системой через трубку 3. Из баллона 1 под давлением атмосферного воздуха ртуть поднимается вверх по трубке Т,

Рис.3.6. Компрессионный манометр ртуть поднимается вверх по труоке T, отключает баллон 2 от вакуумной системы и сжимает заключенный в баллоне газ до давления, которое можно непосредственно измерить по разности уровней ртути в закрытом и сравнительном капиллярах  $K_1$  и  $K_2$ . После компрессии давление измеряется точно так же, как и в обычном ртутном манометре с закрытым коленом.

Уравнение компрессионного манометра на основании закона Бойля - Мариотта имеет следующий вид:

$$pV_0 = (p + \rho gh)V, \tag{3.3}$$

где *p* - измеряемое давление; *V*<sub>0</sub> - начальный объем сжимаемого газа; *h* - разность уровней в сравнительном и закрытом капиллярах;  $V = \pi d_{\kappa}^2 h_1/4$  - конечный объем газа после сжатия;  $d_{\kappa}$  - диаметр капилляров. Решая (3.3) относительно давления р, получим

$$p = \frac{\pi \rho g d_{\hat{e}}^2 h h_1}{4(V_0 - \pi d_{\hat{e}}^2 h_1 / 4)}$$

При условии, что  $\pi h_1 d_{\kappa}^2/4$  значительно меньше  $V_0$ ,

$$p = \frac{\pi \rho g d_{\hat{e}}^2}{4V_0} h h_1, \qquad (3.4)$$

Если ртуть в закрытом капилляре манометра всегда поднимать до одного и того же уровня, то  $h_1$ , будет величиной постоянной и уравнение (3.4) можно записать так:  $p = C_1 h$ ;  $C_1 = \pi \rho g d_{\kappa}^2 h_1 / (4V_0)$ . Этот способ измерения давления называется методом линейной шкалы.

Для расширения пределов измерения можно пользоваться методом квадратичной шкалы, при котором сжатие в манометре производится так, чтобы ртуть в сравнительном капилляре  $K_2$  всегда устанавливалась на одном уровне с запаянным концом закрытого капилляра  $K_1$ . При этом  $h = h_1$ . Тогда уравнение (3.4) можно записать в виде  $p = C_2 h^2$ ;  $C_2 = \pi \rho g d_{\kappa}^2 / (4V_0)$ .

Диапазон измерения компрессионных манометров  $10^{1}..10^{-3}$  Па. Трудности в измерении более низких давлений связаны с непостоянством капиллярной депрессии ртути (понижение уровня ртути в капилляре по сравнению с ее уровнем в сообщающемся с капилляром широком сосуде); откачивающим действием струи ртутного пара из манометра в ловушку; отличием формы конца запаянного капилляра от формы мениска ртути, что ограничивает минимальное значение  $h_1$  на уровне 5..10 мм.

Кроме того, по технологическим соображениям диаметр капилляров приходится выбирать не меньше 1 мм, а объем измерительного баллона определяется прочностью стекла и обычно не превышает 1 л, что дает максимальное значение коэффициента компрессии 2,5.10<sup>5</sup>.

Для измерения более высоких давлений требуется манометр с очень длинными (или переменными по сечению) капиллярами. В области давлений более 10 Па можно пользоваться обычными гидростатическими манометрами без предварительного сжатия газа. Для уменьшения откачивающего действия струи ртутного пара трубка *T* сделана в виде капилляра, охлаждаемого водой. Компрессионный манометр относится к абсолютным приборам и используется в качестве образцового для градуировки других приборов. Его показания не зависят от рода газа. Однако компрессионным манометром нельзя измерить давление паров тех веществ, у которых упругость насыщенных паров при температуре измерения меньше давления в измерительном капилляре после сжатия; нельзя проводить непрерывное измерение давления. Недостатком манометра является также то, что он должен присоединяться к вакуумной системе через азотную ловушку.

### 3.3. Тепловые методы

Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через разреженный газ от давления. Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока. Уравнение теплового баланса такого прибора можно представить в следующем виде:

$$I_{\rm H}^{2}R = E_{\rm K} + E_{\rm T} + E_{\rm H} + E_{\rm M}, \qquad (3.5)$$

где  $I_{\rm H}$  - ток, проходящий через нить; R - сопротивление нити;  $E_{\kappa}$ ,  $E_{\rm T}$ ,  $E_{\rm H}$ ,  $E_{\rm M}$  - потери теплоты за счет конвекции, теплопроводности газа, излучения нити и теплопроводности материала нити. В области низкого вакуума можно использовать зависимость от давления коэффициента конвективного теплообмена. Такие манометры называются конвекционными. Их верхний предел измерения равен атмосферному давлению. Их недостатком является зависимость показаний прибора от его положения в пространстве. Конвективным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т. е.  $E_{\kappa} \approx 0$ , а потери теплоты излучением

$$E_{\rm M} = K_{\rm M} (T_{\rm H}^{4} - T_{\rm 5}^{4}) A;$$

здесь A - поверхность нити;  $K_{\mu}$  - коэффициент излучения материала нити;  $T_{\mu}$  и  $T_{5}$ температуры нити и баллона

Тепловые потери нити по материалам нити и электродов, соединяющих нить с корпусом преобразователя,

$$E_{\rm M} = b(T_{\rm H} - T_{\rm G})f/l,$$

(*b* - коэффициент теплопроводности материала нити; *f* - сечение нити, а *l* – длина нити.). Потери теплоты через газовый промежуток *d* 

$$E_{\rm T} = \lambda (T_{\rm H} - T_{\rm f}) A/d, \qquad (3.6)$$

где λ - коэффициент теплопроводности газа (2.29).

В области низкого вакуума коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Манометр, использующий зависимость коэффициента теплопроводности от давления, работает в области среднего и высокого вакуума. Давление, соответствующее переходу от низкого в средний вакуум, является верхним пределом измерения теплового манометра. В области высокого вакуума коэффициент теплопроводности (2.24) уменьшается порционально давлению ( $\lambda = K_{\rm T} p$ ). Измерительное уравнение теплового преобразователя с учетом уравнений (3.5), (3.6) и (2.24) в области высокого вакуума можно записать так:

$$p = \frac{I_{i}^{2}R - (E_{i} + E_{i})}{K_{\delta}(T_{i} - T_{i})A}d.$$
(3.7)

Для точного измерения давления необходимо, чтобы  $E_{\rm T}$  составляло значительную долю от  $E_{\rm u} + E_{\rm M.}$ 

Поэтому условие

$$I_{\rm H}^2 R - (E_{\rm M} + E_{\rm M}) \ge 0.01 I_{\rm H}^2 R$$

определяет нижний предел измерения манометра. Из уравнения (3.7) видно, что давление является функцией двух переменных: тока накала и температуры нити.

Существует два метода работы тепловых манометров: постоянной температуры нити и постоянного тока



Рис.3.7 Градуировочные кривые теплового преобразователя: а - при постоянном токе накала, б - при постоянной температуре нити

накала. Градуировочные кривые теплового манометра, показанные на рис.3.7а,6 для обоих методов работы, представляют собой в средней части соответственно параболу и гиперболу. Концы градуировочных кривых у верхнего и нижнего пределов измерения не описываются уравнением 3.7 и переходят в линии, параллельные оси давления.

Для расширения верхнего предела измерения теплового преобразователя следует уменьшать его габариты, что увеличивает отношение L/d и сдвигает границу низкого и среднего вакуума в сторону более высоких давлений

Нижний предел измерения тепловых преобразователей можно улучшить, уменьшая долю ( $E_{\rm u}+E_{\rm m}$ ) в сумме тепловых потерь нити. Это может быть достигнуто понижением температуры нити и уменьшением диаметра вводов, соединяющих нить с баллоном.

Показания тепловых преобразователей определяются произведением К<sub>т</sub>р и зависят от рода газа. Преобразователь будет давать одинаковые показания при выполнении следующих условий:

$$K_{\rm T1}p_1 = K_{\rm T2}p_2 \dots = K_{\rm Ti}p_{\rm i} \dots = K_{\rm Tn}p_{\rm n}.$$
(3.8)

Выпускаемые промышленностью приборы проградуированы по сухому воздуху. Если необходимо измерить давление других газов, то нужно учитывать относительную чувствительность прибора к данному газу

$$p_i = p_{\hat{a}} \frac{\hat{E}_{\hat{\alpha}\hat{a}}}{\hat{E}_{\hat{\alpha}i}} = p_{\hat{a}} q_i, \qquad (3.9)$$

109

где  $p_{\rm B}$  и  $K_{\rm TB}$  - давление и коэффициент теплопроводности воздуха; $q_i = K_{\rm TB} / K_{\rm Ti}$  - коэффициент относительной чувствительности теплового преобразователя к данному газу. Значения  $q_i$  для различных газов по отношению к воздуху могут отличаться в несколько раз (см. табл.C15).

Если преобразователь измеряет давление смеси газов, то его показания будут выражены в воздушном эквиваленте *p*<sub>в</sub>:

$$K_{\rm T1}p_1 + K_{\rm T2}p_2 \dots + K_{\rm Ti}p_{\rm i} \dots + K_{\rm Tn}p_{\rm n} = K_{\rm TB}p_{\rm B}.$$
(3.10)

Так как из определения относительной чувствительности (3.9) следует, что  $p_{\rm B} = p_{\rm cm}/q_{\rm cm}$ , то выражение (3.10)) можно записать в виде

$$\frac{p_{\hat{n}\hat{1}}}{q_{\hat{n}\hat{i}}} = \frac{p_1}{q_1} + \frac{p_2}{q_2} + \dots + \frac{p_n}{q_n}.$$

Разделив обе части этого уравнения на *р*см, получим

$$\frac{1}{q_{\hat{n}\hat{i}}} = \frac{V_1}{q_1} + \frac{V_2}{q_2} + \dots + \frac{V_n}{q_n},$$

где  $V_1$ ,  $V_2$ ...  $V_n$  - объемные концентрации соответствующих газов, причем  $\sum_{i=1}^{n} V_i = 1$ . Таким образом, коэффициент относительной чувствительности для смеси газов определяется по формуле

$$\frac{1}{q_{\hat{n}\hat{i}}} = \sum_{i=1}^{n} V_i / q_i.$$
(3.11)

Тепловые преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на термопарные и преобразователи сопротивления. В термопарном преобразователе (рис. 3.8,а) температура нити 1 измеряется термопарой 2. Электроды расположены в стеклянном или металлическом баллоне 3, имеющем патрубок для подключения к вакуумной системе. Термо-ЭДС термопары измеряется милливольтметром, ток накала нити регулируется реостатом и измеряется миллиамперметром.

В преобразователе сопротивления для измерения температуры используется зависимость сопротивления нити от температуры. Он включается в мостовую схему (рис 3.8, б) . Ток накала нити измеряется миллиамперметром, включенным в то же плечо моста, что и преобразователь, а температура нити—по току гальванометра в измерительной диагонали моста. Ток накала регулируется реостатом.

Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити. Тепловые преобразователи измеряют общее давление всех газов и паров, присутствующих в вакуумной системе, и обеспечивают непрерывность измерения давления. Инерционность показаний, связанная с тепловой



Рис.3.8. Схемы тепловых преобразователей: а - термопарного, б - сопротивления

инерцией нити, изменяется от нескольких секунд при низких давлениях до нескольких миллисекунд при высоких давлениях.

Тепловые преобразователи как приборы для относительных измерений давления обычно градуируются по компрессионному манометру. Диапазон рабочих давлений традиционных преобразователей составляет 5.10<sup>3</sup>..10<sup>-1</sup> Па. Преобразователи, изготовленные средствами микромеханики, с тензорезисторами, расположенным на тонкой кремниевой мембране, имеют лучший нижний предел измеряемых давлений (10<sup>-3</sup> Па). Характеристики современных тепловых вакуумметров представлены в табл.П.5.

## 3.4. Электрические методы измерения общих давлений

Электрические методы измерения низких общих давлений основаны на закономерностях электрических явлений в вакууме. Наибольшее распространение получил ионизационный метод измерения, использующий пропорциональность между давлением и разрядным током, протекающим между электродами, к которым приложена разность потенциалов. Нижний предел измерения этих преобразователей обычно ограничен фоновым током, имеющим с измеряемым током одинаковое направление. Верхний предел измерения определяется допустимым отклонением от линейности градуировочной характеристики - зависимости разрядного тока от давления.

Существует несколько типов ионизационных преобразователей: электронные, магнитные и радиоизотопные. В электронных преобразователях ионизация газа осуществляется термоэлектронами, эмиттируемыми накаленным катодом. Магнитные преобразователи используют для ионизации электроны, полученные за счет автоэлектронной эмиссии из холодного катода; в радиоизотопных преобразователях для тех же целей используется α или β излучение. Чувствительность ионизационных преобразователей, также как и эффективность ионизации, зависит от рода газа.

Если преобразователь проградуирован по воздуху, а применяется для измерения давления других газов, то необходимо учитывать относительную чувствительность *R*. Из условия равенства ионных токов при измерении давления различных газов запишем

$$K_1 p_1 = K_2 p_2 = ... = K_i p_i = ... = K_B p_B$$
,

откуда  $p_i = p_B / R_i$ , где  $R_i = K_i / K_B$  - относительная чувствительность . Относительные чувствительности ионизационных преобразователей даны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Тип	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Не	Ar	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Электронный	1	0,43	0,16	1,3	1,6	0,85
Магнитный	1	0,43	0,15	1,4	1,3	0,85
Радиоизотопный	1	0,23	0,21	1,2	1,5	—

#### Относительная чувствительность ионизационных преобразователей

Продолжение таб.3.1

Тип	Ацетон	Hg	CH <sub>4</sub>	Xe	Ne	СО	H <sub>2</sub> O
Электронный	-	2,5	1,5	2,8	0,27	1,04	_
Магнитный	_	_	_	3,5	0,26	_	-
Радиоизотопный	2,7	_	_	_	-	_	0,88

При измерении давления смеси газов из условия равенства ионных токов имеем  $K_{\rm cm}p_{\rm cm} = K_1p_1 + K_2p_2 + ... + K_{\rm i}p_{\rm i} + ... + K_{\rm n}p_{\rm n}$ .

Поделив полученное уравнение на К<sub>в</sub>, получим

$$\frac{E_{\hat{n}\hat{i}} p_{\hat{n}\hat{i}}}{\hat{E}_{\hat{a}}} = R_1 p_1 + R_2 p_2 + ... + R_i p_i + ... + R_n p_n,$$

откуда

$$R_{\bar{n}\bar{i}} = \sum_{i=1}^{n} R_i V_i, \qquad V_i = p_i / p_{\bar{n}\bar{i}} \; .$$

Принцип действия электронных преобразователей основан на пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшемся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов. Существует две схемы электронного преобразователя: с внутренним и с внешним коллектором.

Схема с внутренним коллектором (рис.3.9,а) аналогична обычному триоду. Коллектором ионов является сетка, на которую относительно катода подается отрицательное напряжение Eκ В несколько десятков Вольт, а на анод положительное напряжение E<sub>a</sub>=100..200 В. Электроны на пути от катода к аноду (ток  $I_{\rm e}$ ) соударяются с молекулами остаточных газов, И



Рис.3.9. Схемы электронных преобразователей: а - с внутренним коллектором, б - с внешним коллектором

образовавшиеся положительные ионы попадают на сетку, создавая ионный ток *I*<sub>и</sub>, измеряемый гальванометром.

В схеме с внешним коллектором (рис. 3.9, б) потенциалы сетки и анода меняются местами, и коллектором становится анод. Электроны, летящие от катода к сетке, совершают вокруг ее витков ряд колебаний, что увеличивает длину траектории электронов и повышает

вероятность ионизации молекул остаточных газов. Это делает схему с внешним коллектором более чувствительной, несмотря на то, что часть положительных ионов, образовавшихся между сеткой и катодом, не участвует в измерении давления.

Рассмотрим уравнение электронного преобразователя

$$dN = np\varepsilon \cdot dr, \tag{3.12}$$

где dN - число положительных ионов; n - число электронов; dr - элементарная длина траектории электронов;  $\varepsilon$  - эффективность ионизации, равная количеству положительных ионов, образуемых одним электроном на единице пути при единичном давлении (см. рис. 1.19).Если ввести в (3.12) электронный ток  $I_e = n/t$ , то

 $dN/t = I_{\rm e} \cdot p \varepsilon \cdot dr.$ 



Рис.3.10. Конструктивные схемы электронных преобразователей: а - с внешним коллектором, б - с осевым коллектором, в - с магнитным полем

Интегрируя по всей длине траектории электрона с энергией, большей потенциала ионизации, получим выражение для ионного тока

$$I_{e} = I_{e} p \int_{r_{1}}^{r_{2}} \varepsilon dr,$$

которое перепишем в виде

$$I_{\rm H} = K_{\rm H} I_{\rm e} p, \qquad (3.13)$$

где К<sub>и</sub> – постоянная чувствительности электронного манометра;

$$\hat{E}_{e} = \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon dr.$$

Из выражения (3.13), называемого уравнением электронного преобразователя, очевидно, что, для того чтобы измеряемый ионный ток был пропорционален давлению, необходимо во время измерения поддерживать постоянное значение электронного тока. Тогда чувствительность электронного манометра *a* - равна тангенсу угла наклона градуировочной кривой к оси давления.

$$a = I_{\rm e} K_{\rm M}$$
.

Схематично конструкция электронного преобразователя с внешним коллектором представлена на рис.3.10,а. Коллектор ионов 1 имеет форму цилиндра с электрическим вводом в верхней части баллона, сетка 2 - форму двойной спирали с двумя выводами для обезгаживания путем пропускания электрического тока. Катод 3 вольфрамовый. Чувсвительность *а* при токе эмиссии 5 мА для типового преобразователя составляет ~10<sup>-3</sup> А/Па. Пределы давлений, которые могут быть измерены таким манометрическим преобразователем, составляют 1..10<sup>-5</sup> Па.

Верхний предел измерения типового электронного преобразователя составляет ~1 Па и соответствует нарушению линейности градуировочной характеристики, когда средняя длина свободиого пути электрона в объеме прибора становится меньше пути электрона между электродами. Для расширения верхнего предела можно уменьшить расстояние между электродами. Существуют приборы, верхний предел которых таким путем удалось довести до 10<sup>2</sup> Па. Чтобы катод не сгорел при таких высоких давлениях, его изготовляют из оксидов редкоземельных металлов.

Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, возникающими из-за эмиссии фотоэлектронов в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки и ультрафиолетового излучения накаленного катода. Рентгеновское излучение анодной сетки является результатом ее бомбардировки электронами. Автоэлектронная эмиссия коллектора появляется под действием разности потенциалов 200..300 В между коллектором и анодной сеткой и вносит дополнительную составляющую в фоновый ток.

Фоновые электронные токи имеют одинаковое направление с ионным током и поэтому оказывают одинаковое воздействие на измерительные приборы. Максимальным фоновым током является ток рентгеновского излучения, пропорциональный эмиссионному току:

$$I_{\phi} = K_{\rm s} I_{\rm e},$$

где *К*<sub>s</sub>-коэффициент пропорциональности.

115

С учетом существования фоновых токов уравнение электронного преобразователя можно записать в следующем виде:

$$I = I_{\mu} + I_{\phi} = I_{e}(K_{s} + K_{\mu}p),$$

а нижний предел измерения - определить соотношением ионного и фонового токов:

$$\frac{I_{\grave{e}}}{I_{\hat{o}}} = \frac{\hat{E}_{\grave{e}}}{\hat{E}_{s}p}.$$

Таким образом, для расширения нижнего предела измерения нужно увеличить  $K_{\rm u}$  или уменьшить  $K_{\rm s}$ .

Для уменьшения фоновых токов и, следовательно, коэффициента  $K_s$  был предложен преобразователь с осевым коллектором (рис.3.10,6), в котором катод и коллектор поменялись местами, что значительно уменьшило телесный угол, в котором рентгеновское излучение сетки попадает на коллектор. Это привело к уменьшению  $K_s$  приблизительно в 10<sup>3</sup> раз по сравнению с конструкцией рис. 3.10,а и расширило нижний предел измерения до 10<sup>-8</sup> Па.

Чувствительность  $K_{\mu}$  можно увеличить, если поместить преобразователь в магнитное поле (рис.3.10,в). Электроны от катода к аноду в этом случае движутся по спирали. В электронном преобразователе с магнитным полем, создаваемым катушкой 2 и направленным параллельно оси анода 3, катод 4 - термоэлектронный, а коллектор 1 расположен в верхней части баллона. Такой преобразователь за счет увеличения чувствительности имеет нижний предел на 2..3 порядка ниже, чем конструкция преобразователя, показанная на рис.3.10,а.

Быстрота откачки электронных преобразователей составляет 10<sup>-3</sup>..10<sup>-1</sup> л/с, что в закрытых конструкциях преобразователей, присоединяемых через трубку с малой проводимостью, может привести к заметным ошибкам измерения. Дополнительные источники погрешности связаны с химическим взаимодействием газов с накаленным катодом и ионной десорбцией под воздействием электронной бомбардировки газов, химически поглощенных анодом. Технические характеристики современных вакуумметров с электронными преобразователями даны в табл.П.5.

Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда в скрещенных магнитном и электрическом полях от давления. Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного газового разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов.

Ячейка Пеннинга (рис.3.11,а) состоит из двух дисковых катодов 1 и цилиндрического анода 2; в магнетронном преобразователе (рис.3.11,б) в отличие от ячейки Пеннинга катоды

соединены между собой центральным стержнем; в инверсно-магнетронном преобразователе (рис.3.11,в) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом. Все электроды находятся в постоянном магнитном поле. На анод подается положительное относительно катода напряжение2..6 кВ, катод заземлен и соединяется с входом усилителя постоянного тока.



Рис.3.11. Электродные схемы магнитных преобразователей: а - ячейка Пеннинга, б - магнетронная, в - инверсно-магнетронная

Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, в магнетронном или инверсно-магнетронном преобразователе движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоиде, образованной окружностью диаметром

 $D = 2mE/(qB^2),$ 

катящейся по окружности радиуса r вокруг оси с угловой частотой вращения

$$\omega = qB/m$$

и тангенциальной скоростью

 $v_{\rm T} = E/B$ ,

где - *E* - напряженность электрического поля; *B* - магнитная индукция; *m* и *q* - масса и заряд электрона. В ячейке Пеннинга электроны движутся по спиральным траекториям между катодными пластинами.

Магнитная индукция выбирается больше критического значения, соответствующего равенству диаметра электрода и диаметра окружности, по которой движется электрон, и составляющего в современных приборах ~ 0,1 Тл.

При соударении с молекулой остаточного газа электрон теряет часть энергии на ее ионизацию и перемещается в радиальном направлении к аноду. В связи с тем что радиальная скорость электронов значительно меньше, чем тангенциальная, при низких давлениях в разрядном промежутке образуется отрицательный объемный заряд.

Положительные ионы, образовавшиеся в результате столкновения с электронами, движутся к катоду. Так как их масса значительно больше, чем у электрона, то магнитное поле практически не влияет на траекторию движения ионов. Соударение положительных ионов с катодом приводит к появлению вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току.

Таким образом, разрядный ток магнитного преобразователя

$$I_{\rm p} = I_{\rm \oplus} + I_{\rm M} + I_{\rm B},$$

где  $I_{\phi}$  - фоновый ток автоэлектронной эмиссии;  $I_{\mu}$  - ионный ток;  $I_{B}$  - ток вторичной электронной эмиссии.



Рис.3.12. Схема магнетронного преобразователя с уменьшенными фоновыми токами

Ток автоэлектронной эмиссии не зависит от давления и потому может считаться фоновым током; йонный и ток вторичной электронной эмиссии зависят от давления:

$$I_{\rm H}+I_{\rm B}=ap^n\,,$$

где постоянные  $a = 10^{-2} ..10^{-1}$  А/Па и n = 1..1, 4.Учитывая эту зависимость и пренебрегая фоновым током, получим измерительное уравнение магнитного преобразователя

$$I_{\rm p} = K_{\rm \mu} p$$
,

здесь К<sub>и</sub> - чувствительность прибора;

$$K_{\rm M}=ap^{n-1}.$$

Разрядный ток магнитного преобразователя нелинейно зависит от давления. Верхний предел измерения связан с ограничением максимального разрядного тока балластным сопротивлением, защищающим измерительный прибор от возникновения дугового разряда, Для расширения верхнего предела измерения следует уменьшить анодное напряжение и размеры разрядного промежутка. Обычно верхний предел измерения находится в области давлений 10..100 Па.

Нижний предел измерения определяется временем зажигания разряда и значением фонового тока. В современных приборах он составляет 10<sup>-11</sup> Па. Для уменьшения фонового

тока применяются специальные экраны 3 (рис.3.12), расположенные в промежутке между катодом 2 и анодом 1, где напряженность электрического поля максимальна. Большая часть фонового тока в этом случае переходит на корпус, минуя прибор, которым измеряется разрядный ток.

Для обеспечения зажигания разряда при низких давлениях необходимо повышать анодное напряжение и увеличивать размеры разрядного промежутка. Для облегчения зажигания разряда в сверхвысоком вакууме на экранных пластинах устанавливают острые иголки, усиливающие автоэлектронную эмиссию, или радиоизотопы. Наиболее надежным способом обеспечения быстрого зажигания разряда является использование нагреваемых элементов, включение которых приводит к резкому повышению давления или термоэмиссии электронов.

При применении сильных магнитных полей (B > 0,1 Тл) значение постоянной n в формуле, описывающей чувствительность прибора, стремится к единице. При этом расширяется диапазон работы прибора в области как низких, так и высоких давлений.

Магнитные преобразователи, так же как и электронные, имеют неодинаковую чувствительность к различным газам. Коэффициенты относительной чувствительности магнитных преобразователей

$$R_{\Gamma} = K_{\Gamma}/K_{\rm B}$$

для ряда газов представлены в табл.3.1.

Быстрота откачки колеблется для различных преобразователей в зависимости от рода газа и режимов работы в пределах от 10<sup>-2</sup> до 1 л/с, что значительно больше, чем для электронных. Это приводит к увеличению погрешности измерений при наличии вакуумного сопротивления между преобразователем и вакуумной камерой.

Преимуществом магнитного преобразователя перед электронным является более высокая надежность в работе в связи с заменой накаленного катода холодным, а недостатком - нестабильности, связанные с колебаниями работы выхода электронов при загрязнении катодов.

Эти нестабильности особенно заметны при работе преобразователя в вакуумных системах с парами масла, продукты разложения которого при ионной бомбардировке и масляные диэлектрические пленки, покрывающие поверхности электродов, могут в несколько раз изменить постоянную преобразователя. В значительной степени лишены этого недостатка самоочищающиеся магнитные преобразователи, работающие на переменном токе. В таких преобразователях катод и анод меняются местами в соответствии с полупериодами питающего напряжения, а очистка их поверхностей осуществляется ионной

бомбардировкой. Технические характеристики некоторых магнитных вакуумметров даны в табл. П.5.

В радиоизотопных преобразователях для ионизации газа используется  $\alpha$  - или  $\beta$  излучение радиоактивных изотопов: <sup>226</sup>Ra, <sup>239</sup>Pu, <sup>238</sup>Pu, <sup>3</sup>H и т. д. Особенно эффективно использование  $\alpha$  - излучения. Энергия  $\alpha$  - частиц (двухзарядных положительных ионов гелия), возникающих при радиоактивном распаде, составляет (4,5..5,5)10<sup>6</sup> эВ. В связи с этим в радиоизотопных преобразователях не требуется накаленного катода и высокого напряжения, как в электронных и магнитных преобразователях.

Стабильность работы прибора обеспечивается независимостью радиоактивного распада от температуры окружающей среды и физике-химического воздействия находящихся в преобразователе газов. Благодаря этим свойствам и неограниченному сроку службы радиоизотопный преобразователь с точки зрения метрологии является одним из лучших приборов для измерения вакуума.



При взаимодействии с молекулами газов α частицы вызывают их ионизацию, причем количество образованных положительных ионов пропорционально давлению. Измерительное уравнение преобразователя радиоизотопного имеет вид

 $I_{\mathrm{H}} = K_{\mathrm{F}}p,$ 

где  $K_{\Gamma}$  - чувствительность преобразователя, зависящая от рода газа. Преобразователи обычно  $K_{\rm B} = 10^{-10}..10^{-11}$  А/Па). Для



градуируются по воздуху или азоту (для воздуха  $K_{\rm B} = 10^{-10}..10^{-11}$  А/Па). Для определения чувствительности к другим газам можно пользоваться представленными в табл. 3.1 значениями  $R_{\rm r} = K_{\rm r}/K_{\rm B}$ . Радиоизотопный преобразователь (рис. 3.13) состоит из выполненного в виде стержня коллектора 1, цилиндрического анода 2 и радиоизотопного источника 3. Вылетающие из радиоизотопного источника  $\alpha$  - частицы, соударяясь с молекулами остаточных газов, образуют положительные ионы, которые под действием разности потенциалов между анодом и коллектором (~50 В) направляются к коллектору, вызывая в его цепи ионный ток, пропорциональный давлению.

Нижний предел рабочих давлений определяется фоновым током, возникающим при бомбардировке коллектора  $\alpha$  - частицами. Этот ток имеет две составляющие, первая связана с положительным зарядом самих  $\alpha$  - частиц, а вторая - с возникновением тока вторичной электронной эмиссии с коллектора. Нижний предел измерения давления радиоизотопного манометра составляет 10<sup>-1</sup> ...10<sup>-2</sup> Па. Для расширения диапазона рабочих давлений в некоторых преобразователях коллектор защищен экранами или расположен вне зоны видимости источника  $\alpha$  - частиц. При этом нижний предел измеряемых давлений может быть снижен еще на два порядка. Этого же можно достигнуть увеличивая габариты преобразователя, что сопровождается повышением чувствительности без изменения значения фонового тока.

Верхний предел измеряемых давлений обусловлен независимостью от давления газа ионного тока на коллектор после того, как длина пути, проходимая в газе  $\alpha$  - частицей, имеющей начальную энергию  $E_{\alpha}$  до полной потери энергии, будет меньше размеров преобразователя:

$$L_{\alpha} = E_{\alpha}L_1 / (E_{\mu}p);$$

здесь  $E_{\mu}$  - энергия ионизации молекулы газа;  $L_1$  - средняя длина свободного пути  $\alpha$  - частицы при единичном давлении. При  $E_{\alpha} = 4,79.10^6$  эВ (для радия),  $E_{\mu} = 15$  эВ,  $L_1 = 5.10^{-1}$  см/Па и р =  $10^5$  Па получим  $L_{\alpha} = 1,6$  см. Таким образом, максимальная длина пробега  $\alpha$  - частицы в преобразователе с верхним пределом, равным атмосферному давлению, не должна превышать 1,6 см.

Диапазон рабочих давлений радиоизотопных преобразователей составляет 10<sup>5</sup> ..10<sup>-2</sup> Па, но обычно его не удается реализовать в одном приборе. Широкодиапазонные конструкции преобразователей выполняются с двумя камерами: большого и малого размеров. Характеристики радиоизотопного вакуумметра приведены в табл. П.5. В настоящее время промышленный выпуск радиоизотопных вакуумметров из соображений безопасности прекращен.

## 3.5. Электрические методы измерения парциальных давлений

Статические магнитные газоанализаторы (масс-спектрометры) (рис.3.14) основаны на пространственном разделении моноэнергетического пучка ионов в однородном поперечном магнитном поле. Процесс газового анализа состоит из ионообразования, ускорения ионов и формирования ионного пучка, разделения ионов по массовым числам и измерения интенсивности ионного тока.

Ионообразование осуществляется электронной бомбардировкой нейтральных газовых молекул в ионном источнике 4 за счет тока эмиссии  $i_3$ . Ионный источник находится под положительным потенциалом относительно земли (+1 кВ), выталкивающим ионный пучок  $i_+$  в пространство дрейфа. Положительные ионы, пройдя одинаковое ускоряющее напряжение, входят в пространство дрейфа в соответствии с (3.1) со скоростями  $v \approx \sqrt{q/m}$ .

В пространстве дрейфа, где действует поперечное магнитное поле индукцией *B*, под воздействием силы Лоренца

$$F_1 = qvB$$
,

положительные ионы движутся в направлении, определяемом правилом левой руки, по окружностям постоянных радиусов R. При этом сила Лоренца уравновешивается центробежной силой

$$F_2 = mv^2/R$$
.

Из условия равенства сил F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub> найдем выражение для радиуса траектории ионов

$$R = mv/(qB), \tag{3.14}$$

которое с учетом (3.1) можно переписать в виде

$$R = \frac{1}{B}\sqrt{2Um/q}.$$
(3.15)

Таким образом, радиус траектории иона прямо пропорционален корню квадратному, из отношения массы иона к его заряду. Решая уравнение (3.15) относительно m/q, получим измерительное уравнение статического масс-спектрометра с магнитным отклонением:

$$m/q = R^2 B^2/(2U).$$
 (3.16)

В результате взаимодействия с магнитным полем на коллектор 3 попадают только те ионы, радиус траектории которых соответствует положению щели в диафрагме перед коллектором. Изменяя радиус траектории иона *R* за счет изменения ускоряющего напряжения *U* или магнитной индукции *B*, можно создавать условия для попадания на коллектор ионов с различными массовыми числами. Ионный ток коллектора после

усилителя 2 измеряется выходным прибором 1. В рассмотренной схеме анализатора ионы отклоняются на угол 180°. На практике значения углов отклонения могут быть как больше, так и меньше 180°.

Как следует из (3.16), наиболее эффективна магнитная развертка массспектра по значению магнитной индукции *B*, но в связи с лучшим быстродействием, простотой схем питания и меньшими размерами



Рис.3.14. Статический газоанализатор( массспектрометр )

магнитной системы в промышленных приборах предпочтение отдается электростатической развертке по ускоряющему напряжению *U*.

Разрешающая способность масс-спектрометра зависит от размеров прибора и расширения ионного пучка:

$$\rho_m = \frac{M_e}{\Delta M_e} = \frac{R}{s_1 + s_2 + \sigma(R)},$$

где  $s_1$  и  $s_2$  - ширина щелей на выходе из источника ионов и перед коллектором ионов соответственно;  $\sigma(R)$  - суммарное расширение ионного пучка в плоскости щели  $s_2$  в результате аберраций. Аберрации являются следствием разброса ионов одинаковой массы по скоростям, неоднородности в распределении магнитного поля по высоте ионного пучка, влияния пространственного заряда и т. д. При диапазоне массовых чисел от 2 до 150 разрешающая способность на половине высоты пика  $\rho_M \ge 50$ .

Чувствительность масс-спектрометра возрастает при увеличении ширины щелей, которую обычно выбирают от 0,1 до 1 мм. Для стандартных приборов коэффициент чувствительности  $K_{\mu}$  при откачке азота составляет 10 мА/Па. Относительная чувствительность магнитных анализаторов

$$C_{\rm i} = K_{\rm ui} / K_{\rm uN2}$$

зависит от рода газа (табл.3.2). Верхний предел рабочих давлений 10<sup>-2</sup> Па определяется постоянством коэффициента чувствительности, нижний 10<sup>-8</sup> Па - фоновыми токами. Порог чувствительности равен 10<sup>-3</sup> % и зависит от уровня шумов электрометрического усилителя или умножителя и фонового масс-спектра прибора.

#### Таблица 3.2

#### Относительная чувствительность C<sub>i</sub> приборов

	0
ππα μοιλοκομμα ποκιμιο πι μι ιν	TAD TAILUU NAATUUUU IV FAAAD
П НЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПИННИИ НЬНЫХ	Лак гений пактичных газок
	L .

Прибор	<b>N</b> <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Не	Ar	$CO_2$	<b>O</b> <sub>2</sub>	$C_2H_2$		
Магнитный	1	0,46	0,17	1,3	1,1	0,83	_		
анализатор									
Омегатрон	1	0,45	0,21	1,2	1,37	0,7	1,4		
Продолжение табл. 3.2									

Прибор	CH <sub>4</sub>	Ne	СО	H <sub>2</sub> O	$C_2H_4$	$C_2H_6$
Магнитный	0,84	0,25	1,08	1,05	0,59	1,16
анализатор						
Омегатрон	0,67	0,3	1,1	0,65	1,04	1,3

Простота и надежность магнитных анализаторов позволяет применять их в системах контроля и управления вакуумными технологическими процессами. Технологические характеристики прибора, специально разработанного для управления технологическими процессами, даны в табл.П.6



Рис.3.15. Панорамный газоанализатор ( фарвитрон )

Панорамный газоанализатор (фарвитрон) относится к статическим приборам для определения парциальных давлений. Разделение ионов по массовым числам осуществляется В нем ПО частоте колебаний ионов в электростатическом поле с параболическим распределением потенциала. Зависимость частоты колебаний ионов от массового числа в таком поле можно записать в

следующем виде:

$$f = K\sqrt{qU/m},\tag{3.17}$$

где *U* - напряжение на центральном электроде электростатического поля с параболическим распределением потенциала; *K* - коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией анализатора; m - масса иона; *q* - заряд иона.

Структурная схема панорамного газоанализатора показана на рис.3.15. Электронный ток между катодом 1 и сетчатым анодом 3 проходит через диафрагму-модулятор 2. Положительные ионы, образующиеся результате электронной бомбардировки В нейтральных молекул остаточных ускоряются анодом В направлении газов. электростатического поля с параболическим распределением потенциала, образованным электродами 4.

Модулируя электронный ток с частотой колебаний ионов, имеющих заданные массовые числа согласно (3.17), электростатическом анализаторе можно образовать пакет, число ионов в котором непрерывно увеличивается после каждого периода ионизирующего электронного тока.

Пакет ионов, частота колебаний которого совпадает с частотой напряжения модулирующего электрода, называется резонансным. Он наводит напряжение на сигнальном электроде 5, которое усиливается высокочастотным усилителем 6 и через демодулятор поступает на вертикально отклоняющую систему катодного осциллографа 7. Горизонтальное отклонение в осциллографе осуществляется генератором развертки 8 на частоте 50 Гц, синхронизирующим горизонтальную развертку осциллографа с временной разверткой высокочастотного напряжения генератора 9, подключенного к модулирующему электроду 2. На экране электронно-лучевой трубки осциллографа можно видеть одновременно весь спектр газов.

Для обеспечения постоянства числа периодов модуляции во время регистрации сигнала, создаваемого ионами любой массы, развертку частоты осуществляют по закону

$$f = a / t^b,$$

где *а* и *b* - постоянные; *t* - время. Подбором показателя степени *b* можно обеспечить однозначность между выходным сигналом и парциальным давлением различных газов.

Разрешающая способность панорамных анализаторов  $\rho_{\rm M} = 15..20$ , диапазон массовых чисел 2..200, диапазон рабочих давлений  $10^{-3}..10^{-7}$  Па. Технические характеристики панорамного газоанализатора имеются в табл. П.6.

Циклотронный газоанализатор (омегатрон) относится к динамическим анализаторам парциальных давлений. Принцип его действия основан на движении положительных ионов во взаимно перпендикулярных постоянном магнитном и высокочастотном электрических полях. Ток эмиссии термокатода 5 (рис3.16) образует электронный луч по оси прибора z, направленный параллельно силовым линиям магнитного поля B к аноду 2. Положительные ионы, образовавшиеся в электронном луче, движутся по спирали в скрещенном постоянном магнитном магнитном образовавшиеся в электронном электрическом поле, приложенном к двум

125



Рис.3.16. Циклотронный газоанализатор (омегатрон)

пластинам 1 и 3. Уравнения движения ионов в идеальном омегатроне можно записать в следующем виде:

$$m\ddot{x} = -q\dot{y}B;$$
  
 $m\ddot{y} = qE\sin(\omega t) + q\dot{x}B;$   
 $m\ddot{z} = 0,$ 

где Е и ω - напряженность и угловая частота высокочастотного электрического поля; t - время.

Коллектор 4, расположенный в вырезе нижней пластины, регистрирует только те ионы, для которых период вращения совпадает с периодом изменения электрического поля. Такие ионы называются резонансными. Траектория

резонансных ионов представляет собой раскручивающуюся спираль, радиус которой

$$R = Et/(2B) \; .$$

Резонансные ионы за каждый оборот получают приращение энергии от электрического поля. Остальные ионы движутся по ограниченным траекториям и не достигают коллектора.

Используя выражение (3.14) для радиуса траектории иона, определим период и частоту вращения резонансного иона:

$$T = 2\pi R / v = 2\pi m / (2Bq);$$
  
$$f = 1 / T = \Omega / (2\pi)$$

 $(\Omega = Bq/m$  - циклотронная частота). В постоянном магнитном поле  $\Omega m / q = \text{const}$ , поэтому шкала массовых чисел при развертке по частоте - гиперболическая. Измерение ионного тока, проходящего через коллектор, осуществляется электрометрическим усилителем.

Разрешающая способность омегатрона обратно пропорциональна массе иона:

$$\rho_{\rm M} = q B^2 R_{\kappa} / (2Em),$$

где  $R_{\kappa}$  - расстояние от электронного луча до коллектора. С увеличением массы иона разрешающая способность уменьшается. Реально удается достигнуть при  $\Delta M_e = 1$  а.е.м. значения  $\rho_{\rm M} = 35..45$ .

Коэффициент чувствительности по азоту при электронном токе 10 мкА лежит в пределах (4..10)-10<sup>-7</sup> А / Па. При больших электронных токах чувствительность уменьшается пространственного нерезонансных Относительная из-за роста заряда ионов. чувствительность

$$C_{\rm i} = K_{\rm ui} / K_{\rm uN2}$$

зависит от рода газа ( см. табл. 3.2). Максимальное рабочее давление омегатрона (1..4)10<sup>-3</sup> Па, минимальное - 10<sup>-8</sup> Па. Технические характеристики измерителей парциальных давлений омегатронных приведены в табл. П.6.

Во времяпролетном динамическом газоанализаторе для разделения ионов по массам используют разницу во времени пролета промежутка *l*<sub>0</sub> ионами различных газов (рис. 3.17,а)

 $t = l_0 / v = l_0 \sqrt{m/(2qU)}.$ 

Ионообразование осуществляется электронным током, протекающим между термокатодом 6 и анодом 7. На сетку 5 подается отрицательный потенциал U<sub>5</sub>, ускоряющий ионы в пространстве дрейфа заземленными сетками 4 И между 3. Проходя сетку 5, ионы получают



Рис. 3.17. Времяпролетный газоанализатор (хронотрон ): а - схема; б - диаграмма напряжений

одинаковые приращения энергии и в соответствии со своими массовыми числами приобретают различную скорость. В промежутке между заземленными сетками 4 и 3 ионы разделяются на группы с одинаковыми массовыми числами.

Пройдя пространство дрейфа, группы ионов, если сетка 2 заземлена, поочередно достигают приемника ионов 1, которым служит вторичный электронный умножитель. Длительность импульса, образующего масс-спектр, очень мала (~ 0,1 мкс), а частота импульсов может быть до 10 кГц. Умножитель связан с широкополосным усилителем, выходной сигнал которого подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. По промежутку времени между выталкивающим импульсом и моментом появления пика ионного тока можно определить массовое число.

Для непрерывной регистрации только одного компонента спектра на сетку 2 подается положительный потенциал, чередующийся, с отрицательным импульсом напряжения  $U_2$  (рис.3.17,6), во время которого группа ионов с определенным массовым

числом достигает приемника 1. Остальные ионы задерживаются положительным потенциалом сетки. Изменяя промежуток времени *t*<sub>1</sub>, *t*<sub>2</sub> и т. д. между импульсами на сетках 5 и 2, можно выделять отдельные составляющие масс-спектра.

Разрешающая способность времяпролетного газоанализатора

$$\rho_{\rm M} = M {\rm e} \, / \, \Delta M {\rm e} = t \, / \, (2\Delta t),$$

где  $\Delta t$  - длительность прохождения группой ионов с одним массовым числом пространства дрейфа; t - длительность ионизирующего или вытягивающего импульса. Разброс начальных скоростей ионов приводит к необходимости уменьшения  $\Delta t$ .

Рассмотренный газоанализатор называется хронотроном. Современные хронотроны имеют разрешающую способность (на половине высоты пика)  $\rho_{\rm M} = 100$ ; диапазон массовых чисел 1..600 а.е.м.; минимальное измеряемое давление $10^{-8}$  Па. Недостатком хронотрона является большая длина пространства дрейфа  $l_0 \ge 0,5$ м. Для ее уменьшения используются отражатели ионов. Такие приборы называются рефлектронами.

Другая конструкция времяпролетного газоанализатора, представленная на рис 3.18, известна под названием радиочастотного масс-спектрометра или топатрона, Положительные ионы, образовавшиеся в области ионизации (катод 3 и анод 2), ускоряются сеткой  $C_5$  в направлении трехсеточного каскада  $C_2$ - $C_4$ . Между сеткой  $C_3$  и соединенными вместе сетками  $C_2$  и  $C_4$  подается высокочастотное напряжение. Расстояния между сетками  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_3$ ,  $C_4$  одинаковы и равны  $\delta$ .

Между сетками C<sub>4</sub> и C<sub>3</sub> на ионы действует сила высокочастотного электрического поля

$$F_1 = qE\sin(\omega t + \Theta)$$

где E - максимальная напряженность электрического поля между сетками;  $\Theta$  - начальная фаза высокочастотного поля, соответствующая моменту пересечения ионом плоскости сетки



Рис. 3.18. Радиочастотный газоанализатор ( топатрон )

условие  $\omega \delta / v + \Theta = \pi$ .

 $C_4$  при t =0. Между сетками  $C_3$  и  $C_2$  действует такая же сила, но с обратным знаком

$$F_2 = -qE\sin(\omega t + \Theta).$$

Максимальное приращение энергии получают ионы, пересекающие сетку  $C_3$  в момент изменения полярности, для которых выполняется Для таких ионов время пролета трехсеточного каскада и периода высокочастотного напряжения совпадают. Такие ионы называются резонансными. Остальные ионы получают меньшее приращение энергии или замедляются. Сетка  $C_1$  имеет отрицательный потенциал, который могут преодолеть на пути к коллектору 1 только резонансные ионы, получившие приращение энергии. Индикация масс-спектра осуществляется осциллографом, подключенным к выходу умножителя. Развертка по массам производится изменением высокочастотного напряжения.

В этом приборе часто измеряют ионный ток сетки  $C_5$ , пропорциональный общему давлению смеси газов, поэтому прибор удобен для измерения как общих, так и парциальных давлений. Так как разрешающая способность трехсеточного каскада мала, то последовательно устанавливают несколько каскадов. При четырех каскадах  $\rho_M = 45$ . Диапазон регистрируемых массовых чисел 2..200 а.е.м., минимальное измеряемое давление  $10^{-6}$  Па.

В электрическом фильтре масс разделение ионов по массам осуществляется В высокочастотном электрическом поле квадруполя, образуемого четырьмя параллельными электродами круглого



Рис.3.19. Масс-фильтр: а - квадрупольный, б - монополярный

сечения (рис.3.19,а). Противоположные электроды соединены попарно, и между ними прикладывается напряжение  $\pm (U+V\cos(\omega t))$ . Уравнения движения ионов в квадрупольном фильтре масс имеют следующий вид:

$$m\ddot{x} + 2q(U + V\cos(\omega t))\frac{x}{r_0^2} = 0;$$
  

$$m\ddot{y} - 2q(U + V\cos(\omega t))\frac{y}{r_0^2} = 0;$$
  

$$m\ddot{z} = 0.$$
  
(3.18)

Из последнего уравнения системы (3.18) следует, что скорость ионов вдоль оси анализатора *z* остается неизменной. Первые два дифференциальных уравнения известны под названием уравнений Матье. При подстановке новых переменных

 $\varepsilon = \omega t / 2;$   $a = 8qU / (mr_0^2 \omega^2),$   $g = 4qV / (mr_0^2 \omega^2)$ 

систему уравнений (3.18) можно переписать в другом виде



Рис. 3.20. Диаграмма устойчивости

$$\ddot{x} = (a + 2g\cos(2\varepsilon))x;$$
  
$$\ddot{y} = -(a + 2g\cos(2\varepsilon))y;$$
 (3.19)  
$$\ddot{z} = 0.$$

Для значений *а* и *g*, лежащих внутри заштрихованной области на рис 3.20, уравнения (3.19) имеют стабильные решения  $x(\varepsilon)$  и  $y(\varepsilon)$ . При этом ионы, движущиеся в камере анализатора, совершают колебания с амплитудой, меньшей радиуса  $r_0$ , и достигают

коллектора ионов. Ионы, движущиеся по неустойчивым траекториям, неограниченно увеличивают амплитуду колебаний и нейтрализуются на электродах анализатора.

Разрешающая способность анализатора зависит от отношения напряжений  $\gamma = U/V$ :

$$\rho_M = \frac{M_e}{\Delta M_e} = \frac{0.75}{1 - \gamma / \gamma_{max}} \tag{3.20}$$

Максимальное значение разрешающей способности достигается при  $\gamma \sim \gamma_{max} = 0,168$ . При  $\gamma \geq \gamma_{max}$  ионы всех масс имеют неустойчивые траектории. Из (3.20) следует, что для получения большой разрешающей способности необходимо в процессе работы поддерживать соотношение  $\gamma = 0,999 \gamma_{max}$ . Таким образом, напряжения *U* и *V* при развертке масс-спектра изменяются совместно, а их соотношение должно поддерживаться с большой точностью.

Массовое число ионов, соответствующих  $\gamma_{max}$  и имеющих устойчивую траекторию, связано с параметрами поля следующим соотношением :

$$M_e = \frac{1,39.10^{-5}V}{f^2 r_0^2},$$

где f - частота, МГц; V - амплитуда высокочастотного напряжения, B; r - радиус поля, м.

Развертка масс-спектра осуществляется изменением амплитуды переменного напряжения на электродах. Ускоряющее напряжение в источнике ионов, обеспечивающее начальную скорость ионов по оси *z*, не должно превышать следующего значения:

$$U_{\rm y} = 4,2.10^2 \, L^2 f^2 \, M_e \, \rho_{\rm M}^{-1}; \tag{3.21}$$

здесь *L* - длина анализатора, м.

При превышении ускоряющим напряжением данного значения ионы, движущиеся по неустойчивым траекториям, не будут успевать уходить на электроды анализатора. Из (3.21) видно, что разрешающая способность прямо пропорциональна массовому числу.

Разновидностью электрического фильтра масс является монополярный анализатор (рис.3.19,б), использующий один квадрант квадруполя. Такой анализатор состоит из цилиндрического электрода с отрицательным напряжением и уголкового заземленного электрода, рабочая поверхность которого расположена по нулевым эквипотенциальным линиям квадруполя, показанным пунктиром на рис.3.19,а. Через монополярный анализатор проходят только ионы, входящие в анализатор во время отрицательной полуволны высокочастотного напряжения. Во время положительной полуволны ионы попадают на уголковый электрод и нейтрализуются.

Современные квадрупольные и монополярные газоанализаторы (см. табл. П.6) работают в диапазоне массовых чисел от 1 до 500, разрешающая способность на уровне 10% от высоты пика  $\rho_M$ >500, коэффициент чувствительности 10<sup>-2</sup> А/Па, максимальное и минимальное рабочие давления 10<sup>-2</sup> и 10<sup>-9</sup> Па соответственно.

## 3.6. Сорбционные методы

Анализ остаточных газов, присутствующих в вакуумных камерах, основанный на различиях в их теплотах адсорбции, называется термодесорбционной масс-спектрометрией. Для проведения анализа в камеру с исследуемым газом, имеющую обычный манометрический преобразователь, необходимо поместить прогреваемую прямым пропусканием электрического тока вольфрамовую нить, которая перед началом работы обезгаживается прогревом до 2500 К. После охлаждения на поверхности нити адсорбируются молекулы остаточных газов. Степень покрытия поверхности молекулами остаточных газов, согласно (1.62), при  $\theta_0 = 0$  можно рассчитать по формуле

$$\theta_{i} = \frac{b_{i} p_{i}}{1 + b_{i} p_{i}} (1 - \exp(-A_{i} t_{a})), \qquad (3.22)$$

где  $p_i$  - парциальное давление *i*-го газа;  $t_a$  - время установления адсорбционного равновесия;

$$b_{i} = \frac{\gamma_{i}\tau_{i}}{a_{mi}\sqrt{2\pi mkT}}; \qquad A_{i} = \frac{1}{\tau_{i}} + \frac{\gamma_{i}\tau_{i}}{a_{mi}\sqrt{2\pi mkT}};$$

$$\tau_i = \tau_0 \exp(Q_{\lambda i} / (RT));$$

 $\tau_i$  - среднее время нахождения молекулы в адсорбированном состоянии;  $Q_{ai}$  - теплота адсорбции *i* - го газа. Время  $t_a$  выбирается достаточным для того, чтобы экспонентой в выражении (3.22) можно было пренебречь. Минимально необходимое время определяют экспериментально. При увеличении  $t_a$  выходной сигнал сначала линейно возрастает, а затем при  $t_a > 4,6/A_i$  принимает постоянное значение. В этом случае формулу (3.22) можно упростить:

#### $\theta_{\rm i} = b_{\rm i} p_{\rm i} / (1 + b_{\rm i} p_{\rm i}).$

При нагревании нити происходит десорбция поглощенных газов. При этом в камере, внутри которой находятся нить и манометрический преобразователь, давление повысится на величину

$$\Delta p_{\rm i} = a_{\rm mi} \theta_{\rm i} A k T / V, \qquad (3.23)$$

где *А* - поверхность нити; *a*<sub>mi</sub> - число молекул, необходимых для образования мономолекулярного слоя *i* - го газа; *V* - объем камеры.

Повышение давления  $\Delta p_i$  для газов с различной теплотой адсорбции происходит при различных температурах нити, что и используется для определения состава и количества остаточных газов.  $\Delta p, om \mu. e \partial$ 

Если адсорбирующую поверхность предварительно охладить до температуры жидкого азота, то можно провести анализ газов, имеющих малое значение теплоты адсорбции. На рис. 3.21 представлен пример масс-спектра, полученного



Рис.3.21. Термодесорбционный масс-спектр

термодесорбционным масс-спектрометром. Там же показано изменение температуры нити .

Существенное отличие этого масс-спектра от получаемых на ионизационных газоанализаторах состоит в том, что пики располагаются не в последовательности возрастания массовых чисел, а в порядке увеличения теплот адсорбции. Этим прибором хорошо разрешаются пики газов N<sub>2</sub> и CO, имеющих одинаковое массовое число.

При расшифровке масс-спектров смеси газов следует учитывать наличие на поверхности адсорбционных центров с различной теплотой десорбции. При этом каждый газ может иметь несколько термосорбционных пиков. Для повышения чувствительности прибора следует увеличивать адсорбирующую поверхность, например путем нанесения активных адсорбентов или травления.

Если на атом воздействует излучение, энергия которого достаточна для ионизации одной из его внутренних электронных оболочек, то образовавшееся при этом вакантное место может быть заполнено электроном с меньшей энергией связи из другой оболочки. Энергия, освобождающаяся при указанном переходе, может превысить энергию связи электрона в одной из внешних оболочек атома, что сопровождается эмиссией электрона. Так, если образовавшаяся в результате внешнего воздействия вакансия на *K*-уровне заполняется электронами с *M*-уровня, а выделяющаяся энергия передается электрону с N - уровня, то этот процесс называют *KMN* - Оже-переходом. Кинетическая энергия электрона, эмиттированного в результате этого перехода, определяется выражением

$$E_{KMN} = E_K - E_M - E_N,$$

где  $E_K$ ,  $E_M$  - энергии связи электронов на K - и M - оболочках атома;  $E_N$  - энергия связи на уровне N в атоме с однократно ионизированным уровнем M.

Абсолютное значение энергии эмиттируемых электронов в зависимости от атомного номера элемента и типа перехода может изменяться от 20 до 3000 эВ.



Рис.3.22. Электростатический анализатор Оже-спектрометра



Рис.3.23. Оже-спектр нержавеющей стали

Структурная схема Оже-спектрометра типа "цилиндрическое зеркало" представлена на рис.3.22. Первичный пучок электронов из блока 1 попадает на мишень 2. Вторичные электроны через щели во внутреннем цилиндре попадают на вход электронного умножителя 7. Энергия электронов, проходящих через щели анализатора, зависит от напряжения U, подаваемого от источника 3 на внешний цилиндр 8. Это напряжение и используется для развертки энергетического спектра электронов, записываемого на двухкоординатном самописце 5. Генератор синусоидальных напряжений 4 и усилитель с синхронным детектором 6 позволяют дифференцировать и фильтровать от помех выходной сигнал. На рис.3.23 показан спектр образца из нержавеющей стали, полученный на таком анализаторе. Но оси абсцисс отложена E - энергия эмиттируемых электронов, а по оси ординат - их относительная интенсивность.

# 3.7.Градуировка преобразователей для измерения общих и парциальных давлений

Преобразователи для косвенных измерений давления, показания которых не могут быть рассчитаны с необходимой для практики точностью, градуируются путем сличения их показаний с показаниями образцовых приборов: механических преобразователей и компрессионных манометров. К таким преобразователям относятся тепловые, электронные, магниторазрядные и радиоизотопные.

Приборы для измерения давления, используемые в качестве исходных для градуировки всех других приборов, называются образцовыми средствами измерения первого разряда. Их постоянные или градуировочные кривые рассчитывают по размерам преобразователей и другим значениям, входящим в измерительное уравнение. Приборы, используемые в качестве образцовых, предварительно проградуированные по другим образцовым приборам, называют образцовыми средствами измерения второго разряда. Образцовые средства измерения первого разряда имеют погрешность градуировки не более 1...5%, второго разряда - до 10.. 15 %.

Для расширения диапазона давлений, в котором осуществляется градуировка по образцовым приборам, можно использовать методы изотермического расширения и деления потока. Метод изотермического расширения состоит в том, что камеру малого объема, давление в которой предварительно измеряется образцовым прибором, соединяют с камерой большего объема, начальное давление в котором можно принять равным нулю. По закону Бойля--Мариотта легко подсчитать конечное давление.

Дальнейшее понижение давления можно получить увеличивая число ступеней расширения. При этом важно учесть ошибки, связанные с натеканием, сорбционными процессами на стенках камер и откачивающим действием градуируемого преобразователя. Эти ошибки определяют нижний предел градуируемого давления. Дополнительная погрешность измерения давления, связанная с точностью измерения объемов, обычно не превышает 0,5%. Этот метод часто используется в диапазоне давлений 10<sup>-2</sup>..10<sup>-3</sup> Па, когда натеканием и газовыделением в калиброванном объеме можно пренебречь.

При низких давлениях (<10<sup>-7</sup> Па), когда невозможно непосредственное сличение показаний градуированного прибора и компрессионного манометра, можно воспользоваться методом деления потока. Этот метод состоит в том, что в динамической вакуумной системе поток газа, проходящий через последовательно соединенные ячейки (первая из которых

показана на Рис. 3.24), постепенно уменьшается за счет работы вспомогательных вакуумных насосов. Уравнение потоков для такой ячейки



$$Q = Q_1 + Q_2,$$
 (3.22)

где  $Q = U_1(p_0-p_1)$  - поток газа, поступающий в ячейку через трубопровод с проводимостью  $U_1$ , при разности давлений на его концах

 $p_0$  и  $p_1$ ;  $Q_1 = S_1p_1$  - поток газа, откачиваемый вспомогательным насосом, подключенным к ячейке и имеющим эффективную быстроту откачки  $S_1$ ;  $Q_2 = U_2(p_1-p_2)$  - поток газа, удаляемый из ячейки через трубопровод с проводимостью  $U_2$  при давлениях на его концах  $p_1$  и  $p_2$ .

Рис.3.24. Ячейка вакуумной системы для градуировки манометрических преобразователей методом деления потока

С учетом выражений для  $Q, Q_1$  и  $Q_2$  уравнение (3.22) можно представить в виде

$$U_1(p_0-p_1)=S_1p_1+U_2(p_1-p_2),$$

откуда

$$p_1 = \frac{U_1 p_0 + U_2 p_2}{S_1 + U_1 + U_2}.$$
(3.23)

Если конструктивно обеспечить, чтобы  $S_1 >> U_1 + U_2$ , а  $U_1 p_0 >> U_2 p_2$ , то  $p_0 >> p_1 >> p_2$  и выражение (3.23) можно упростить:

$$p_1 = \frac{U_1}{S_1} p_0.$$

В ряду последовательно соединенных ячеек давление постепенно снижается от ячейки к ячейке и для *n*-ой ячейки может быть определено по формуле

$$p_n = \frac{U_1 U_2 .. U_n}{S_1 S_2 .. S_n} p_0,$$

причем давление  $p_0$  можно измерить компрессионным манометром.

Недостатком этого метода является то, что для его реализации нужны насосы с очень низким предельным давлением и большой быстротой действия, так как для получения

стабильного значения  $S_i$ , где i=1,2,...,n; насос подключается к камере через диафрагму и соблюдается условие  $S_H >> S_i$ .

При градуировке по методу деления стационарного потока сорбционными процессами можно пренебречь. Ошибки, связанными с натеканием, можно не учитывать до тех пор, пока газовый поток в градуировочной камере будет существенно превышать суммарное натекание и газовыделение. Использование насосов с большой быстротой откачки позволяет осуществить градуировку манометрических преобразователей с погрешностью 4..5% до самых низких давлений.

Градуировка анализаторов по газовым смесям затруднена в связи с различной эффективностью ионизации, возможным фракционированием компонентов смеси при напуске, появлением молекулярных осколков, многократной ионизацией, наличием ложных пиков, свойственных отдельным приборам.

При проведении количественного анализа приборы предварительно калибруют по каждому компоненту смеси. Пробу газа вводят в стандартный объем, из которого она поступает в источник ионов. Давление в стандартном объеме измеряют обычным манометрическим преобразователем. Выбирают главную линию спектра этого компонента и по ней определяют чувствительность прибора. После этого находят отношение интенсивностей всех линий спектра данного газа к интенсивности главной линии β<sub>ji</sub>, где j - главное массовое число. Результаты такого исследования для омегатрона даны в табл. 3.3.

Имея спектры чистых газов, можно по интенсивностям масс-спектра смеси определить состав и парциальные давления ее компонентов. Считая, что масс-спектр смеси образуется аддитивным наложением масс-спектров отдельных компонентов, можно составить систему линейных уравнений:

$$I_{j} = \sum_{i=1}^{n} I_{ji} = \sum_{i=1}^{n} K_{ji} p_{i};$$
(3.24)

здесь  $I_j$  - интенсивность линии масс-спектра газовой смеси, соответствующая массовому числу j;  $I_{ji}$  - интенсивность линии масс-спектра i-го газа, соответствующая массовому числу j;  $p_i$  - парциальное давление i-го компонента смеси; n - число компонентов в смеси;  $K_{ji}$  - коэффициент чувствительности по i-му газу для j - массового числа:

$$K_{\rm ji} = \beta_{\rm ji} K_{\rm i}, \qquad (3.25)$$

здесь *K*<sub>i</sub> - коэффициент чувствительности по главной линии спектра; *i* - порядковый номер компонента смеси.

## Таблица 3.3

Газ		Массовое число,а.е.м.									
	2	3	4	12	13	14	15	16	17	18	
$H_2$	1,00	0,01									
He			1,00								
CH <sub>4</sub>	0,01			0,20	0,60	0,14	0,80	1,00			
H <sub>2</sub> O	0,01							0,02	0,25	1,00	
Ne											
N <sub>2</sub>						0,08					
CO				0,02		0,01		0,01			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>				0,02	0,04	0,06					
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>					0,01	0,03	0,05				
02								0,10			
Ar											
CO <sub>2</sub>				0,03		0,03		0,08			

Относительные интенсивности спектральных линий чистых газов  $\beta_{ji}$ 

Продолжение таблцы

Газ	Массовое число, а.е.м.									
	20	22	25	26	27	28	29	32	40	44
$H_2$										
He										
CH <sub>4</sub>										
H <sub>2</sub> O										
Ne	1,00	0,10								
$N_2$						1,00	0,01			
CO						1,00	0,02			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>			0,12	0,62	0,65	1,00	0,02			
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>			0,04	0,23	0,33	1,00	0,22			
02								1,00		
Ar	0,15								1,00	
CO <sub>2</sub>		0,02				0,14				1,00


Рис.3.25. Схема понижения давления

В расчетах используют относительные коэффициенты чувствительности (см.табл. 3.2) по главным линиям:

$$C_{\rm i} = K_{\rm i} / K_{\rm o},$$
 (3.26)

где  $K_0$  - коэффициент чувствительности по главной линии для опорного газа (обычно азот или аргон); величины  $C_i$ , зависят

только от типа газоанализатора, а K<sub>o</sub> определяют индивидуально для каждого прибора. Подставляя (3.25) и (3.26) в (3.24), получим

$$I_{j} = K_{o} \sum_{i=1}^{n} \beta_{ji} C_{i} p_{i}.$$
(3.27)

Система уравнений (3.27) не имеет решения, если j < i; имеет одно решение при j = i и несколько при j > i. Решением в последнем случае, который обычно встречается на практике, считаются значения парциальных давлений  $p_i$ , для которых квадраты невязок уравнений (3.27) имеют минимальное значение.

Для проведения газового анализа в диапазоне давлений  $10^5..10^{-1}$  Па используют схему понижения давления (рис.3.25). Из баллона 1, заполненного исследуемой смесью газов, через капилляр U, смесь газов поступает в камеру 2, откуда откачивается насосом 3 через трубопровод U<sub>2</sub>. К камере 2 подключается газоанализатор, к который попадает смесь газов при давлении p<sub>2</sub>, отличном от давления p<sub>1</sub>. Если p<sub>1</sub> >> p<sub>2</sub> и проводимость трубопровод U<sub>2</sub> значительно меньше быстроты откачки насоса для всех газов, составляющих анализируемую смесь, то из условия равенства потоков, входящих и выходящих из камеры 2,

$$U_1p_1 = U_2p_2,$$
 откуда  $p_2 = p_1U_1 / U_2.$ 

Это соотношение не учитывает влияния натекания и откачивающего действия анализатора на измеряемое давление.

Отношение проводимостей  $U_2 / U_1$ , а следовательно, и степень снижения давления  $p_1 / p_2$  могут достигать значений  $10^3 ..10^6$ . При молекулярном режиме течения газа в трубопроводах отношение  $U_2 / U_1$  не зависит от давления и молекулярной массы газа, т.е парциальное давление каждого компонента смеси в камере 2 пропорционально ее парциальному давлению в камере 1. При этом процентный состав смеси в камере анализатора сохранится таким же, как и в исследуемом объеме.

## 3.8. Измерение газовых потоков

Метод постоянного давления может использоваться в нескольких модификациях. Способ двух манометров основан на измерении перепада давлений на элементе, с известной проводимостью в соответствии с уравнением (2.35) и применяется для измерения стационарных или медленно изменяющихся во времени газовых потоков.

На рис.3.26 показана схема измерения производительности и быстроты действия вакуумных насосов методом двух манометров. Поток газа, откачиваемый насосом 5,



Рис.3.26. Схема измерения газового потока способом двух манометров

измеряется по перепаду давления на диафрагме 3 известной проводимости U. Диафрагма установлена в измерительном колпаке рекомендуемые размеры 6, которого показаны на рисунке. Давления р<sub>1</sub>, и р<sub>2</sub> измеряются соответственно манометрами 2 и 4. Регулировка потока газа осуществляется с помошью 1. натекателя подключенного К вспомогательной вакуумной системе. Рабочее давление вспомогательной вакуумной системы больше, чем основной. Производительность насоса или

газовый поток, проходящий через его входной патрубок, рассчитывается по уравнению (2.35), а быстрота действия

$$S = \frac{Q}{p_2} = \frac{U(p_1 - p_2)}{p_2}.$$
(3.28)

Для расширения пределов измерения проводимость диафрагмы можно изменять непрерывно, например с помощью конструкции ирисовой диафрагмы, применяемой в фотоаппаратах, или ступенчато, используя поворотные диски с отверстиями различных диаметров. Для элементов с малой проводимостью вместо отверстий, изготовление которых сопровождается технологическими трудностями обеспечения формы, используют длинный трубопровод - капилляр.

Способ масляной бюретки (рис. 3.27,а) является разновидностью метода постоянного давления. Давление в измерительном объеме 5 жидкостной бюретки 6

$$p_{\rm H3M} = p_{\rm B} - \rho g h, \qquad (3.29)$$

где  $p_{\rm B}$  - давление внешней среды;  $\rho$  - плотность жидкости в бюретке; h - разность уровней жидкости в измерительном объеме и внешнем цилиндре бюретки. Если выполняется условие, что  $p_{\rm B} >> \rho g h$ , то можно считать, что  $p_{\rm изм}$  = const и требование постоянства давления выполняется. Тогда газовый поток согласно (3.2) определяют по уравнению

$$Q = p_{\hat{e}\hat{\varsigma}\hat{\imath}} \frac{\Delta V}{\Delta t} = K_{\hat{a}} p_{\hat{e}\hat{\varsigma}\hat{\imath}} \frac{\Delta h}{\Delta t}; \qquad (3.30)$$

здесь  $\Delta h$  и  $\Delta V$  - изменения уровня жидкости и величины объема измерительного цилиндра бюретки за время  $\Delta t$ ;  $K_{\delta}$  - постоянная бюретки;  $K_{\delta} = \pi R^2_{\mu_{3M}}$ ;  $R_{\mu_{3M}}$  - радиус измерительного объема.



Рис.3.27. Схема измерения газового пока методом постоянного давления: а - способ бюретки, б - способ газовых пузырей

Кран 4 необходим для опускания жидкости в бюретке и повторения экспериментов. Натекатель 3 предназначен для регулирования потока газа. Бюретка обычно заполняется вакуумным маслом, имеющим низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре.

Использование масляной бюретки для определения производительности и быстроты действия насоса показано на рис 3.27,а. Вакуумный насос 1 через клапан или диафрагму подключается к откачиваемому объекту, давление *p* в котором измеряется вакуумметром 2. Поток газа регулируется натекателем 3.



Рис.3.28. Определение газового потока методом постоянного объема: а - вакуумная схема, б - кривые откачки

Схема измерении газового потока постоянного методом давления, использующая образование газовых пузырей, показана на рис.3.27,б. При вытекании газа из объема 2 в объем 1 при *p*<sub>2</sub> > *p*<sub>1</sub> газовый поток может быть рассчитан скорости dN/ dt по возникновения и объему  $V_{\Pi}$  газовых пузырей 4, возникающих в жидкости 3:

$$Q = V_n p_1 \, dN \,/ \, dt. \tag{3.31}$$

Вакуумирование пространства над жидкостью увеличивает чувствительность измерения, так как сопровождается увеличением объема пузырьков.

Для определения газового потока методом постоянного объема можно использовать схему на рис.3.28,а. В этом случае насос 1 и клапан 2 используются в качестве вспомогательной вакуумной системы для получения вакуума в объеме 3. В процессе измерения клапан 2 закрывается. Газ из баллона 6 через натекатель 4, поступающий в объем 3, вызывает увеличение давления *p*. Если поток газа постоянен, то происходит линейное повышение давления (кривая 2 на рис.3.28,б). По скорости повышения давления определяют газовый поток:

$$Q = V \, dp \,/ \, dt. \tag{3.32}$$

Во время откачки или наполнения вакуумной камеры (*t* = 0) в ней могут возникать сорбционные процессы, приводящие к нелинейному повышению давления ( кривая 3 на рис. 3.28,6). Суммарное изменение давления показано на кривой 1. Для надежного измерения потока методом постоянного объема газовыделение должно быть мало по сравнению с измеряемым газовым потоком.





Рис.3.29. Определение быстроты действия вакуумных насосов методом постоянного объема

Рис.3.30. Экспериментальное определение быстроты действия вакуумных насосов методом постоянного объема: а - кривая откачки, б - быстрота действия (1) и производительность (2) вакуумного насоса

Метод постоянного объема можно использовать для определения производительности и быстроты действия вакуумных насосов. Насос 1 (рис. 3.29) непосредственно подключается к откачиваемому объекту 2. По кривой откачки (рис. 3.30,а) определяется в каждый момент времени  $t_i$  значение  $p_i$  и по tg  $\varphi$  - значение (dp / dt)<sub>i</sub>. Если выполняется условие  $V >> S_H$ , то производительность насоса (рис. 3.30,б) в каждый момент времени можно рассчитать по формуле (3.32). Быстрота откачки насоса

$$S_{\mathrm{Hi}} = Q_{\mathrm{i}} / p_{\mathrm{i}}.$$

Методы постоянного давления постоянного объема являются абсолютными. Косвенные методы определения газовых потоков для обеспечения требуемой точности нуждаются в предварительной градуировке. Чувствительность по потоку приборов для косвенных измерений

$$K_{\rm Q} = \alpha / Q, \qquad (3.33)$$

где α - показания прибора в делениях самой чувствительной шкалы; *Q* - газовый поток, определенный абсолютным методом.



Рис.3.31. Конструкция гелиевой калиброванной течи

Конструкций гелиевых калиброванных течей показана на рис.3.31. Она представляет собой стеклянный баллон 1. заполненный гелием при давлении 10<sup>5</sup> Па. В баллон 2 впаяна через переход кварцевая трубка 3. Гелий диффундирует сквозь плавленый кварц. Для потоков 10<sup>-6</sup> ..10<sup>-9</sup>

м<sup>3</sup>.Па / с проверка течей может производиться один раз в год.

Примером косвенного метода измерения газовых потоков является тепловой метод. Теплопередача в области низкого вакуума при вынужденной конвекции зависит от скорости течения газа, а температура нагретой нити следовательно, от потока газа. В связи с тем что точный расчет зависимости между температурой и газовым потоком выполнить сложно, потокомер градуируют по абсолютному прибору.

## 3.9. Методы течеискания

При изготовлении вакуумных систем из-за пор или трещин в материалах возможно появление течей. Из-за малых размеров дефектов, вызывающих течи, визуально их нельзя обнаружить. Для определения места течей разработано несколько методов течеискания: пробного вещества, высокочастотного разряда, люминесцентный; радиоизотопный, пузырьковый.

Метод пробного газа получил наиболее широкое распространение. После получения вакуума в испытуемом объекте он обдувается пробным газом, который при наличии течи вместо воздуха начинает поступать в вакуумную систему. Изменение состава остаточных газов можно зарегистрировать с помощью вакуумметра, показания которого зависят от рода газа, или масс-спектрометра, настроенного на пробный газ. Для предотвращения повышения давления проверяемый объект должен находиться под непрерывной откачкой.

Для нахождения геометрических размеров течи необходимо провести два независимых испытания одной и той же течи. Испытания могут отличаться различными условиями или родом пробного газа. В результате этих испытаний будут получены два потока q<sub>1</sub> и q<sub>2</sub>, позволяющие записать систему уравнений

$$q_1 = f_1(p_1, p_2, T, M, \eta, d_{yc}, l_{yc}), \qquad (3.34)$$
  
$$q_2 = f_2(p_1, p_2, T, M, \eta, d_{yc}, l_{yc}).$$

Решение системы определяет геометрические размеры течи d<sub>yc</sub> и l<sub>yc</sub>. Если задать длину условной течи равной толщине стенки камеры, то достаточно провести одно испытание. Функция для расчета величины течи может быть выбрана с учетом результатов анализа формы дефекта, приводящего к появлению течи. Это может быть круглый канал, щель и т.д.

Выберем наиболее простой случай – круглый канал. Тогда с учетом (2.35) и (2.59) функция течи может быть представлена в виде

$$q = \frac{p_1 - p_2}{RT} \left( \frac{\pi d_{\delta \hat{n}}^4 p_{\hat{n} \hat{\partial}}}{128\eta l_{\delta \hat{n}}} + b \cdot 38.1 \frac{d_{\delta \hat{n}}^3}{l_{\delta \hat{n}}} \sqrt{\frac{T}{M}} \right),$$
(3.35)

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление газа у входа и выхода течи соответственно, Па;  $p_{cp}$  – средне давление в канале течи, Па; b = 0.9;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Нсм<sup>-2</sup>; q в (3.35) измеряется в кмолях/с.

Для  $q=4.10^{-16}$  кмоля/с,  $p_1 = 2.10^6$  Па,  $p_2 = 10^5$  Па, T = 298 К, M = 4 кг/кмоль,  $l = 10^{-3}$  м из (3.34) можно определить диаметр условной течи  $d_{yc} = 0,1$ мкм, что соответствует молекулярно-вязкостному режиму течения газа.

Схема испытания методом пробного газа показана на рис.3.32. Источник пробного газа 1 осуществляет локальный обдув внешней поверхности испытуемого объекта 4. В вакуумируемом объекте с негерметичной оболочкой разность показаний вакуумметра при изменении давления воздуха и пробного газа

$$\Delta \alpha = \frac{q_{\tau}}{K_{\tau}S_{\tau}} - \frac{q_{a}}{K_{a}S_{a}} = \frac{q_{a}}{K_{a}S_{a}} \left( R \frac{q_{\tau}S_{a}}{q_{a}S_{\tau}} - 1 \right),$$

где  $q_{\rm B}$  и  $q_{\rm n}$  - потоки воздуха и пробного газа;  $S_{\rm B}$  и  $S_{\rm n}$  - эффективные быстроты откачки насоса в вакуумируемом объекте по воздуху и пробному газу;  $K_{\rm B}$  и  $K_{\rm n}$  - чувствительность измерителя давления по воздуху и пробному газу; R - относительная чувствительность измерителя давления к пробному газу. Для получения максимального сигнала необходимо так выбирать пробный газ, чтобы выражение  $Rq_nS_6/q_6S_n$  максимально возможно отличалось от единицы.

При использовании ионизационного манометра для определения герметичности вакуумной системы, откачиваемой пароструйным насосом, замещение воздуха на аргон или гелий вызывает 50% увеличение, а в случае диоксида углерода - 50% уменьшение показаний манометра.

Отношение потока пробного газа  $q_{\pi}$  к потоку воздуха  $q_{B}$  можно записать в следующем виде:

$$\frac{q_{i}}{q_{a}} = \frac{\Delta p_{i} U_{i}}{\Delta p_{a} U_{a}},$$
(3.36)

где  $U_{\rm B}$  и  $U_{\rm n}$  - проводимость течи по воздуху и пробному газу;  $\Delta p_{\rm B}$  и  $\Delta p_{\rm n}$  - перепад давления при испытаниях по воздуху и пробному газу.



Рис.3.32. Метод пробного газа: 1 - щуп, 2 - манометр, 3 - газоанализатор, 4 – испытываемый объект, 5 - затвор, 6 - насос

Основным пробным газом. применяемым при течеискании, является гелий. Благодаря химической инертности он безопасен в работе, малая молекулярная обеспечивает масса его хорошее течи, проникновение через а низкая адсорбируемость позволяет уменьшить постоянную времени испытаний.

Электрической компенсацией показаний вакуумметра при измерении давления воздуха до его замещения пробным газом можно повысить чувствительность измерения газового потока. В этом случае скомпенсированный фоновый сигнал определяется лишь шумом

и дрейфом электрометрического усилителя и вакуумной системы.

Существенное снижение фонового сигнала можно обеспечить в манометре, отделенном от вакуумной системы селективной мембраной, пропускающей только пробный газ. Например, палладиевая мембрана, нагретая до 700..800°С, хорошо пропускает водород, оставаясь непроницаемой для всех остальных газов. Чувствительность по потоку в этом случае определяется остаточным давлением газов в объеме манометрического преобразователя.

Для того чтобы увеличить чувствительность испытаний нужно использовать насосы, быстрота откачки которых зависит от рода газа. Например, адсорбционный насос, охлаждаемый жидким азотом, значительно хуже откачивает гелий, неон и водород, чем воздух.

При использовании газоанализатора для регистрации пробного газа фоновый сигнал определяется парциальным давлением пробного газа в воздухе, и разность показаний

$$\Delta \alpha = \frac{q_{\tau} - q_{\delta}}{K_{\tau} S_{\tau}},$$

где  $q_{\phi}$  - фоновый поток пробного газа. При выборе пробного газа, содержание которого в атмосферном воздухе мало, можно считать  $q_{\phi} = 0$ . Значение  $\Delta \alpha$  при этом много больше, чем в случае применения вакуумметра.

Для индикации появления пробного газа в вакуумной системе используют специальные датчики, чувствительные к выбранному пробному газу. Например, в диоде, анод которого выполнен из платины, нагретой до температуры 800..900°С, при появлении галогенов возникает электрический ток эмиттируемых анодом положительных ионов.

Высокочастотный разряд в среднем вакууме изменяет цвет в зависимости от рода газа. Если в вакуумную систему вмонтирована стеклянная разрядная трубка, то замена воздуха на пары бензина или ацетона меняет цвет разряда в трубке с розового на серый.

Пробные вещества, способные путем захвата электронов из газового разряда образовывать отрицательные ионы, используются в вакуумных электроннозахватных датчиках. К таким веществам относятся хладон и элегаз (SF<sub>6</sub>). Электроны и отрицательные ионы разделяются по различному отклонению в постоянном магнитном поле.

При использовании метода пробного газа необходимо учитывать инерционность испытаний. Время, в течение которого достигается установившийся сигнал, в 5..6 раз больше постоянной времени откачки  $\tau = V/S_s$ , где V - объем вакуумной системы. Возможности применения этого метода ограничены малыми натеканиями, так как для нормальной работы вакуумметров и газоанализаторов требуется наличие в проверяемом объекте высокого вакуума.

Точность нахождения места течи при обдуве пробным газом невысока. Для уточнения места расположения течи проверяемую поверхность покрывают легко удаляемой вакуумной замазкой (вакуумпласт, тушь и т. д.), которая в момент прекращения проникновения пробного газа фиксирует место течи. Таким путем течь может быть локализована с точностью до нескольких миллиметров.

Определение негерметичности вакуумных объектов методом пробного газа можно проводить также при повышенном давлении внутри объекта. В этом случае щуп с устройством для всасывания смеси, содержащей пробный газ, снабжается электроннозахватным, газоаналитическим или галогенным датчиком пробного газа. В электроннозахватных атмосферных датчиках ток газоразрядного диода, работающего в газе-носителе, например аргоне, снижается при появлении пробного газа за счет рекомбинации положительных ионов газа-носителя И отрицательных ионов пробного газа. Газоаналитические датчики используют разность коэффициентов теплопроводности воздуха и пробного газа. Чувствительность испытаний при высоких давлениях обычно ниже, чем при вакуумных испытаниях.

Вместо пробных газов иногда пользуются пробными жидкостями: спиртом, эфиром, бензином, ацетоном и т. д. Большая инерционность испытаний, связанная с временем

148

проникновения жидкости через тонкие капилляры, является существенным недостатком применения пробных жидкостей. При радиусе капилляра 10<sup>-4</sup> см время проникновения пробной жидкости достигает нескольких часов, возрастая пропорционально уменьшению радиуса капилляра. Применение пробных жидкостей и испытаний при высоких давлениях целесообразно при индикации грубых течей.

Метод высокочастотного разряда заключается в том, что при приближении электрода высокочастотного трансформатора к месту течи образуется направленный разряд. Появление разряда связано с понижением давления воздуха в месте течи и улучшением условий электрического пробоя газового промежутка. Этот метод удобен для определения течей в стеклянных вакуумных системах.

Люминесцентный метод использует проникновение раствора люминофора в капиллярные течи. Проверяемый объект длительное время выдерживается в растворе люминофора. После удаления люминофора с поверхности объекта заполненные капилляры легко обнаруживаются в виде точек или полос при облучении ртутно-кварцевыми лампами. Люминофор - люмоген дает желтое или красное свечение, которое легко отличить от ложных сигналов зеленоватого свечения, возникающего от воздушных пузырьков в стекле, или голубого свечения жировых поверхностных загрязнений.

Радиоизотопный метод обнаружения течей состоит в том, что испытуемые объекты в течение некоторого времени выдерживаются в атмосфере радиоактивного газа После удаления радиоактивного газа и тщательной очистки поверхности от радиоактивных загрязнений излучающими остаются только негерметичные приборы. Метод применяется для автоматической проверки на герметичность малогабаритных полупроводниковых приборов.

Пузырьковый метод относится к числу наиболее простых. В испытуемом объекте создается избыточное давление газа, а объект погружается в жидкость. Место течи совпадает с местом образования пузырьков. Диаметр пузырька в месте его образования равен диаметру капилляра. Погружение испытуемых объектов в нагретую жидкость сопровождается повышением давления в соответствии с уравнением газового состояния

$$(p_2 - p_1) / p_1 = (T_2 - T_1) / T_1$$
,

где  $p_1, T_1$  и  $p_2, T_2$  - давление и температура газа соответственно до и после нагревания.

Вода может быть нагрета без образования пузырей до 80°С, что соответствует избыточному давлению 2.10<sup>4</sup> Па. При использовании масла температура может быть повышена до 200°С, что позволяет получить избыточное давление 6,8.10<sup>4</sup> Па.

149

Требования к герметичности вакуумных систем формулируются с учетом условий их дальнейшей эксплуатации. В техническом задании на разработку вакуумной системы, работающей под непрерывной откачкой, задается рабочее давление p<sub>раб</sub>, при котором должен осуществляться технологический процесс. Для обеспечения эффективного использования откачных средств необходимо обеспечить предельное давление

$$p_{\rm np} \ge 0.1 \ p_{\rm pa\delta}$$
 . (3.37)

Предположим, что вакуумная система хорошо обезгажена и газовыделением можно пренебречь по сравнению с натеканием, тогда допустимый газовый поток, поступающий через все течи, имеющиеся в вакуумной установке,

$$Q_{\rm H} \le p_{\rm np} S_{\rm o} = 0.1 \ p_{\rm pab} S_{\rm o}, \tag{3.38}$$

где S<sub>o</sub> - быстрота откачки объекта.

Если технические требования связаны с поддержанием не общего, а парциального давления p<sub>п</sub> какого-то компонента смеси, долевое содержание которого равно γ, то

$$Q_{\rm H} \le 0.1 \ p_{\rm II} S_{\rm o} / \gamma.$$
 (3.39)

В вакуумных объектах объемом V, работающих в течение времени  $\Delta t$  без непрерывной откачки, для допустимого возрастания давления  $\Delta p$  газовый поток

$$Q_{\rm H} \le V \Delta p / \Delta t. \tag{3.40}$$

Если требования ставятся по парциальным давлениям, то аналогично (3.38) получим

$$Q_{\rm H} \le V \Delta p_{\rm II} / (\Delta t \, \gamma). \tag{3.41}$$

Условия испытаний на герметичность обычно не совпадают с рабочими условиями. Если же контроль герметичности проводится с помощью пробного газа или при другой температуре и перепаде давлений, то требования к пороговой чувствительности необходимо уточнить по уравнению (3.36).

Требования к герметичности сборочных единиц и деталей зависят от требований к герметичности установки в целом. При индивидуальной проверке герметичности элементов в процессе изготовления, считая маловероятным одновременное наличие в собранной установке более двух одинаковых течей, можно принять допустимое натекание элемента

$$Q_{\rm H3} = 0.5 Q_{\rm H}. \tag{3.42}$$

Рассмотрим примеры определения требований к герметичности.

Пример 1. Рабочий объем непрерывно откачивается с эффективной быстротой  $S_o = 0,1 \text{ м}^3$ /с. По техническим условиям рабочее давление  $p_{\text{раб}}$  в установке должно составлять  $10^{-4}$  Па. Каковы требования к пороговой чувствительности течеискателя?

Предельное давление установки, согласно (3.37),  $p_{\rm np} = 0.1 \ p_{\rm pa\delta} = 0.1.10^{-4} = 10^{-5}$  Па. Поток, откачиваемый насосом при предельном давлении,  $Q = p_{\rm np}S_{\rm o} = 10^{-5}.0.1 = 10^{-6}$  м<sup>3</sup>.Па/с.

Если считать, что установка хорошо обезгажена и газовыделением можно пренебречь, то натекание в установку не должно превышать  $Q_{\rm H} = 10^{-6} \, {\rm m}^3.\Pi {\rm a/c}.$ 

С учетом того, что сборочные единицы проходят самостоятельную проверку на герметичность, согласно (3.42), допустимое натекание в них  $Q_{\rm H2} = 5.10^{-7}$  м<sup>3</sup>.Па/с.

Проверку на герметичность осуществляют методом вакуумных испытаний, с пробным газом. В качестве пробного газа выберем гелий, Тогда, согласно (3.36), при одинаковых перепаде давления и температуре пороговая чувствительность течеискателя не должна быть меньше 10<sup>-6</sup> м<sup>3</sup>Па/с.

Пример 2. Вакуумный прибор объемом  $V = 0,01 \text{ м}^3$  не имеющий непрерывной откачки, должен храниться в течение года  $\Delta t = 3,5.10^7$  с в атмосфере водорода при перепаде давлений  $\Delta p = 2.10^5$  Па. За время хранения допустимое повышение давления из-за негерметичности равно  $10^{-2}$  Па. Каковы требования к пороговой чувствительности течеискателя?

Поток, который может вызвать указанное повышение давления, согласно (3.40)

$$Q_i = \frac{Vp}{\Delta t} = \frac{0.01.10^{-2}}{3.5.10^7} = 2.9.10^{-12} i^{-3}. \ddot{I}\dot{a} / c.$$

Если проводить вакуумные испытания с гелием в качестве пробного газа, то методика испытаний должна обеспечивать согласно (3.36) пороговую чувствительность 10<sup>-12</sup> м<sup>3</sup>Па/с.

В настоящее время широко применяется масс-спектрометрический течеискатель, обладающий самой высокой чувствительностью. Минимальные течи, которые можно обнаружить этим прибором, равны 10<sup>-14</sup> м<sup>3</sup>.Па/с. На рис.3.33 показана массспектрометрическая камера течеискателя, предназначенного для работы с гелием в качестве пробного газа. Электроны, эмиттируемые катодом 9, попадают в камеру ионизации 8. Источник питания катода 11 подключен к анализатору через фланец 10. В случае негерметичности вакуумной системы, обдуваемой пробным газом, молекулы гелия через фланец 5 проникают в камеру ионизации. Положительные ионы гелия ускоряющим напряжением направляется в камеру магнитного анализатора 6.



Рис.3.33. Камера масс-спектрометрического течеискателя

Рис.3.34. Вакуумная схема массспектрометрического течеискателя

Ускоряющее напряжение Е<sub>у</sub> и магнитная индукция В подбираются таким образом, чтобы ионы гелия, прошедшие через входную щель 7, двигаясь по траектории 4, попали в выходную щель 2. Остаточные газы по траектории 3 разряжаются на стенках анализатора. В отличие от анализаторов парциальных давлений, которые должны иметь высокую разрешающую способность и перестраиваться на различные массовые числа, датчик течеискателя настраивается только на пробный газ. При этом входная и выходная щели могут быть расширены, что увеличивает чувствительность течеискателя. Этот способ повышения чувствительности можно применять для гелия, не имеющего в составе воздуха веществ с близкими массовыми числами. Коллектор ионов 1 соединяется с электрометрическим каскадом 13. Блок измерения ионного тока 12 после дополнительного усиления выходного сигнала электрометрического каскада выводит результаты измерений на стрелочный прибор или дисплей.

Вакуумная система течеискателя подключается к испытуемому объекту с помощью фланца 1(рис 3.34). Для предварительной градуировки может применяться гелиевая течь 12, подключенная через клапан 13. Для дросселирования больших потоков, поступающих в течеискатель, служит клапан-натекатель 2. Ловушка 3 с насосом 10, подключенным через клапан 11, используется для создания рабочего давления 10<sup>-2</sup> Па, измеряемого преобразователем 4 и необходимого для работы масс-спектрометрической камеры 6.

Форвакуумный насос 8 обеспечивает через клапан 9 работу высоковакуумного пароструйного насоса 10 и через клапан 6 - байпасную откачку масс-спектрометрической камеры 5. Работоспособность насоса 8 можно определить при помощи манометра 7.



Рис.3.35. Датчики галогенного течеискателя: а - атмосферный, б - вакуумный

Течеискатель может подключаться к вакуумным системам как со стороны высокого, так и со стороны низкого вакуума. Вакуумная система течеискателя предназначена для откачки массспектрометрической камеры И, как правило, не может быть использована для откачки испытуемого объекта, который собственную должен иметь откачную систему.

Атмосферный датчик галогенного течеискателя представляет собой диод прямого накала (рис.3.35,а), у которого эмиттирующим электродом служит платиновая спираль 1, нагретая до 800..900°C и предварительно насыщенная

ионами щелочных металлов. Коллектором возникающих в присутствии галогенов положительных ионов служит цилиндрический электрод 2, охватывающий нить накала. Ионный ток измеряется усилителем 3. Воздух вместе с галогенами, выходящими из камеры, засасывается в датчик вентилятором 4.

Вакуумный датчик (рис. 3.35, б) подключается к вакуумной системе с помощью фланца 1 и содержит; так же как и атмосферный, платиновую спираль 3 и коллектор ионов 2, соединяемых через электрические выводы в вакуум в корпусе 4 с измерительным блоком 6, индицирующим течь стрелочным прибором или звуковым сигналом, и с источником питания 5. Технические характеристики течеискателей приведены в табл. П.7.

# 3.10. Контрольные вопросы

3.1. В чем состоит разница между абсолютными и косвенными методами измерения низких давлений ?

3.2. Чем определяется диапазон рабочих давлений деформационных преобразователей?

3.3. Какие методы используются при измерении давления деформационными пребразователями ?

3.4.От чего зависит нижний предел измерения тепловых преобразователей ?

3.5. Почему чувствительность ионизационных преобразователей зависит от рода газа ?

3.6 В чем причины возникновения фоновых токов в ионизационных преобразователях ?

3.7. Какие существуют способы повышения чувствительности ионизационных преобразователей ?

3.8. Что такое разрешающая способность анализаторов парциальных давлений ?

3.9. По каким свойствам молекул газов происходит их разделение при сорбционном методе анализа парциальных давлений ?

3.10. Какие методы используются для определения быстроты откачки вакуумных насосов ?

3.11. Нужно ли вводить поправку в показания манометрического преобразователя, отделенного от откачиваемого объекта охлаждаемой ловушкой?

3.12. Какими способами можно уменьшить время зажигания разряда в магнитных преобразователях?

3.13. В каком диапазоне давлений чувствительность тепловых преобразователей, работающих по методу постоянной температуры, выше, чем по методу постоянного тока накала?

3.14. Каким образом можно уменьшить влияние откачивающего действия на точность измерения манометрического преобразователя?

154

3.15. Какие способы применяются для развертки масс-спектров магнитных газоанализаторов?

3.16. Сравните преимущества и недостатки статических и динамических газоанализаторов?

3.17. От чего зависит разрешающая способность омегатрона?

3.18. Чем объяснить большое быстродействие хронотрона?

3.19. Какие существуют методы градуировки измерителей общих давлений ?

3.20. Каким образом можно разделить в ионизационных анализаторах парциальных давлений ионы с одинаковыми массовыми числами ?

### ГЛАВА 4 Механические методы получения вакуума

#### 4.1. Общая характеристика вакуумных насосов

Вакуумные насосы по назначению подразделяются на сверхвысоковакуумные, высоковакуумные, средневакуумные и низковакуумные, а в зависимости от принципа действия - на механические и физико-химические. Основными параметрами любого вакуумного насоса являются: быстрота действия, предельное давление, наименьшее рабочее давление, наибольшее рабочее давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление.

Предельное давление насоса  $p_{\rm np}$  - это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта. Быстрота действия насоса при приближении рабочего давления к предельному стремится к нулю. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется газовыделением материалов, из которых изготовлен насос, перетеканием газов через зазоры и другими явлениями, возникающими в процессе откачки.

Наименьшее рабочее давление вакуумного насоса  $p_{\rm M}$  - это минимальное давление, при котором насос сохраняет номинальную быстроту действия. Наименьшее рабочее давление примерно порядок выше предельного. на Использование насоса для работы при давлениях между предельным и наименьшим экономически из-за невыгодно ухудшения его удельных характеристик.

Наибольшее рабочее давление вакуумного насоса  $p_5$  - это максимальное давление, при котором насос сохраняет номинальную быстроту



Рис. 4.1. Диапазоны рабочих давлений механических вакуумных насосов: — промышленные образцы; - - - лабораторные образцы

действия. В рабочих диапазонах от наименьшего до наибольшего давления (рис 4.1) обеспечивается эффективное использование насоса. Рабочие диапазоны давлений в основном определяются принципом действия насоса, пунктир соответствует лабораторным образцам. Давление запуска вакуумного насоса  $p_3$  - это максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу. Давление запуска обычно

заметно превышает наибольшее рабочее давление. Для некоторых типов насосов, например магниторазрядных, это различие может достигать 2..3 порядков.



Рис.4.2. Основная характеристика вакуумных насосов

Параметры основную определяют характеристику вакуумного насоса быстроты зависимость действия ОТ его давления (рис.4.2 Основную входного ). насоса характеристику можно аппроксимировать, используя его параметры, уравнением

$$\mathbf{S}_{i} = \mathbf{S}_{m} \left( 1 - \frac{p_{i \delta}}{p} - \frac{p}{p_{\varsigma}} \right).$$

$$(4.1)$$



Рис.4.3. Зависимость быстроты откачки (1) и предельного давления (2) от выпускного давления

Среди механических вакуумных насосов можно выделить объемные и молекулярные. Объемные насосы осуществляют откачку за счет периодического изменения объема рабочей камеры. Имеется несколько конструктивных вариантов таких насосов: поршневой, спиральный, вращательный.

Молекулярные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения

от твердой, жидкой или парообразной движущейся поверхности. Среди них различают водоструйные, эжекторные, диффузионные, молекулярные с одинаковым направлением движения откачивающей поверхности и молекул газа, турбомолекулярные с взаимно перпендикулярным движением твердых поверхностей и откачиваемого газа. Характеристики таких насосов могут быть рассчитаны на основании закономерностей внутреннего трения в газах.

Дополнительным обязательным параметром механических вакуумных насосов является наибольшее выпускное давление  $p_{\rm B}$  - максимальное давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять откачку. При выпускных давлениях, меньших давления  $p_{\rm B}$ , быстрота откачки и предельное давление насосов слабо зависят от выпускного давления. Если выпускное давление превысит значение  $p_{\rm B}$ , то происходит так называемый срыв насоса, сопровождающийся резким ухудшением его предельного давления и быстроты откачки (рис. 4.3)

## 4.2. Объемная откачка

В процессе объемной откачки выполняются следующие основные операции: 1) всасывание газа за счет расширения рабочей камеры насоса; 2) уменьшение объема рабочей камеры и сжатие находящегося в ней газа; 3) удаление сжатого газа из рабочей камеры в атмосферу или насос предварительного разрежения Диаграмма работы насосов объемного действия - зависимость объема  $V_{\kappa}$  и давления  $p_{\kappa}$  в камере насоса от времени показана на рис. 4.4. В течение времени  $t_1$ , осуществляется всасывание газа (область I), в промежутке от  $t_1$  до  $t_3$  - сжатие газа (область II), от  $t_3$  до  $t_4$  - выхлоп (область III), затем цикл повторяется вновь. Кривые 1 и 3 представляют собой соответственно зависимости объема и давления в рабочей камере от времени. Кривая 2 соответствует изменению давления в режиме работы с напуском балластного газа в момент времени  $t_2$ .

Балластный газ напускается при откачке паров воды или органических растворителей, давление насыщенных паров которых  $p_{\rm T}$  при рабочей температуре в насосе находится в промежутке от предельного давления  $p_{\rm np}$  до максимального выпускного давления. Напуск балластного газа снижает степень сжатия и предотвращает конденсацию откачиваемых паров в объеме насоса. Геометрическая быстрота объемной откачки равна произведению объема рабочей камеры насоса на частоту циклов откачки п:  $S_{e} = V_{\kappa}n$ .

Сопротивление входного патрубка уменьшает быстроту откачки. Согласно основному уравнению вакуумной техники (2.110), максимальная быстрота действия насоса

$$S_{\rm m} = S_{\rm \Gamma} U / (S_{\rm \Gamma} + U),$$

где *U* - проводимость входного патрубка насоса. Реальная быстрота откачки окажется



Рис.4.4. Диаграмма объемной откачки

еще меньше из-за обратного потока газа в насосе. Обратный поток появляется вследствие перетечек газа и наличия вредного пространства в насосе, а в высоком вакууме - из-за диффузии паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект.

Производительность откачки при молекулярном режиме течения газа равна разности прямого и обратного потоков:

$$Q = Q_{\Pi} - Q_{ob}, \qquad (4.2)$$

где  $Q = S_{\rm H} p; \ Q_{\rm II} = S_{\rm II} p.$ 

При  $p = p_{np}$  производительность откачки Q = 0, что позволяет в этом случае, согласно (4.1), записать

$$Q_{\rm of} = Q_{\rm m} = S_{\rm m} p_{\rm mp}.$$

Подставляя это выражение в (4.2), получим уравнение (4.1) при р<<р<sub>3</sub>

$$S_{\rm H} = S_{\rm m}(1 - p_{\rm np} / p).$$

С учетом (2.110) это выражение можно записать в следующем виде:

$$S_{i} = \frac{S_{\bar{a}}U}{S_{\bar{a}} + U} \left(1 - \frac{p_{\bar{i}\ \bar{o}}}{p}\right) = K_{\lambda}S_{\bar{a}},$$

где  $K_{\lambda} = U(1 - p_{np} / p) / (S_{\Gamma} + U)$  - коэффициент подачи.

Реальная быстрота действия оказывается в  $K_{\lambda}$  раз меньше, чем геометрическая быстрота откачки. Для увеличения быстроты откачки необходимо увеличивать объем рабочей камеры  $V_{\kappa}$  и проводимость входного патрубка U. Частота циклов n имеет оптимальное значение, при превышении которого возможен перегрев насоса или незаполнение рабочей камеры откачиваемым газом. Современные насосы работают при n = 1400 об/мин.

Для определения предельного давления запишем уравнение материального баланса

$$G_{\rm o}+G_{\rm B}=G_1,$$

где G<sub>0</sub> - количество газа в откачиваемом объекте до начала цикла откачки;

*G*<sub>в</sub> -количество газа, поступающего в откачиваемый объем в процессе откачки;

*G*<sub>1</sub> - количество газа в объекте и насосе после выполнения одного цикла откачки.

Это уравнение можно переписать в виде

$$p_o V_p + \alpha_1 V_e p_{\text{BMX}} = p_I (V_p + V_\kappa), \qquad (4.3)$$

где  $V_p$  - объем откачиваемого объекта;  $V_k$  - объем рабочей камеры насоса;  $V_B$  - объем вредного пространства;  $p_{Bblx}$  - давление выхлопа;  $\alpha_1$  - коэффициент, учитывающий газовыделение насоса и степень прорыва газа ;  $p_0$ ,  $p_1$ , - начальное и конечное давления в откачиваемом объекте. Решим уравнение (4.3) относительно давления  $p_1$ :

$$p_1 = p_0 \frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{e}}} + \alpha_1 \frac{V_{\hat{a}}}{V_{\delta}} p_{\hat{a}\hat{a}\hat{o}} \frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{a}}}.$$

Осуществляя еще один цикл откачки, получим

$$p_{2} = p_{1} \frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{a}}} + \alpha_{1} \frac{V_{\hat{a}}}{V_{\delta}} p_{\hat{a}\hat{a}\hat{o}} \frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{a}}} = p_{0} \left(\frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{a}}}\right)^{2} + \alpha_{1} \frac{V_{\hat{a}}}{V_{\delta}} p_{\hat{a}\hat{a}\hat{o}} \left[\frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{a}}} + \left(\frac{V_{\delta}}{V_{\delta} + V_{\hat{a}}}\right)^{2}\right].$$

После откачки п циклов можно получить следующее выражение:

$$p_{n} = p_{0} \frac{1}{\left[1 + (V_{\hat{e}} / V_{\delta})\right]^{n}} + \sum_{m=1}^{n} \alpha_{1} \frac{V_{\hat{a}}}{V_{\delta}} p_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} \frac{1}{\left[1 + (V_{\hat{e}} / V_{\delta})\right]^{m}}.$$
(4.4)

Здесь первое слагаемое при  $n \to \infty$  стремится к нулю, второе может быть подсчитано по формуле для суммы бесконечно убывающей геометрической прогрессии:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left[1 + \left(V_{\hat{e}} / V_{\hat{o}}\right)\right]^m} = \frac{V_{\hat{o}}}{V_{\hat{e}}}.$$

При  $n \to \infty$  (4.4) можно представить в более простом виде:

$$p_{\tilde{i}\ \tilde{o}} = \alpha_1 \frac{V_{\hat{a}}}{V_{\hat{e}}} p_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}.$$

Из этого выражения видно, что предельное давление определяется отношением объема вредного пространства к объему рабочей камеры насоса, давлением выхлопа и коэффициентом α<sub>1</sub>, учитывающим газовыделение насоса и прорыв газов из камеры сжатия



в камеру всасывания насоса. Общий газовый поток самого насоса состоит из газовыделения основных деталей, выделения газов, растворенных в рабочей жидкости, натеканий через соединения в корпусе насоса. Предельное давление объемной откачки можно улучшить уменьшая общий обратный поток из насоса. Этого можно добиться применяя ловушки, предотвращающие проникновение паров рабочей жидкости насоса в откачиваемый объект, или последовательно соединяя две ступени откачки для

уменьшения прорыва газов из камеры сжатия в камеру всасывания.

Потребляемая насосом мощность W расходуется на сжатие откачиваемого газа до выхлопного давления (полезная мощность  $W_{n}$ ) и на преодоление сил трения (мощность потерь  $W_{rp}$ ):  $W = W_n + W_{rp}$ . Диаграмма работы насоса в координатах *p*, *V*, представленная на рис. 4.5, определяет работу единичного цикла сжатия. Как известно из термодинамики, в случае политропического процесса работа сжатия

$$A' = p_1 V_1 \frac{1}{m-1} \left[ \left( \frac{p_{\dot{a}}}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right];$$
(4.5)

здесь  $V_1$  - наибольший объем рабочей камеры насоса; m - показатель политропы;  $p_1$  и  $p_a$  - давления всасывания и выхлопа. Работа одного цикла сжатия (заштрихованная область на рисунке)

$$A = A' + p_a V_a - p_1 V_1 , \qquad (4.6)$$

где  $V_{\rm a}$  - объем рабочей камеры насоса в момент достижения выхлопного давления  $p_{\rm a}$ . Так как для политропического процесса справедливо соотношение  $p_{\rm a}V_{\rm a}^{\rm m} = p_1V_1^{\rm m}$ , то

$$p_{a}V_{a} - p_{1}V_{1} = p_{1}V_{1} \left[ \left( \frac{p_{a}}{p_{1}} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$
(4.7)

Подставляя выражения (4.5) и (4.7) в (4.6), получим

$$A = p_1 V_1 \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_{\dot{a}}}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$
(4.8)

Так как полезная мощность, потребляемая насосом,

$$W_{\rm II} = A / t_{\rm II} = nA,$$

где  $t_{\rm u} = 1 / n$  - время цикла, то, воспользовавшись выражением для A, будем иметь

$$W_{i} = np_1 V_1 \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_{\dot{a}}}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$

Так как  $S_{\Gamma} = V_1 n$ , то можно записать

$$W_{i} = S_{a} p_{1} \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_{a}}{p_{1}} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right].$$
(4.9)

Продифференцируем (4.9) по р<sub>1</sub> и приравняем нулю полученное выражение:

$$\frac{\partial W_{\tilde{i}}}{\partial p_1} = S_{\tilde{a}} \frac{m}{m-1} \left[ \frac{1}{m} p_a^{\frac{m-1}{m}} p_1^{\frac{1-m}{m}} - 1 \right] = 0.$$
(4.10)

Из анализа (4.9) и (4.10) следует, что  $W_{n}=0$  при  $p_{1}=0$  и  $p_{1}=p_{a}$ , а максимальная потребляемая мощность наблюдается при

$$p_1 = \frac{p_a}{m^{\frac{m}{m-1}}}.$$



График зависимости потребляемой мощности давления от показан на рис.4.6. Для *m* = 1,2 и *p*<sub>a</sub> =  $10^{5}$ максимум потребляемой Па мощности соответствует 3,3.10<sup>4</sup> Па. Для низких давлений (менее 10<sup>3</sup> Па) вся потребляемая мощность является мощностью потерь на трение  $W_{\rm Tp}$ . При  $(\sim 10^5)$ Пa) давлениях высоких

потребляемая мощность снижается, так как уменьшается требуемая степень сжатия газа.

# 4.3. Конструкция объемных насосов

Объемные насосы в зависимости от кинематической схемы можно разделить на поршневые, спиральные и вращательные. В поршневых насосах цилиндры могут быть простого или двойного действия с водяным или воздушным охлаждением. Скорость движения поршня обычно не превышает 1 м/с. Для работы без смазки используется покрытие цилиндров полимерными материалами. Одноступенчатые поршневые насосы с самодействующими клапанами имеют предельное давление 5.10<sup>3</sup> Па. Насосы с золотниковым распределением имеют более низкое предельное давление: 3.10<sup>2</sup> Па для одноступенчатых и 10<sup>1</sup> Па для двухступенчатых конструкций. Улучшение предельного давления достигается перепуском газа из мертвого пространства в конце хода поршня во вторую полость цилиндра, которой заканчивается процесс всасывания. B В четырехступенчатых безмасляных насосах достигнуто предельное давление 1 Па. Разновидностью поршневых насосов являются мембранные насосы. Они могут работать без Быстрота действия современных поршневых насосов достигает 4000 л/с. смазки. Мембранные насосы имеют быстроту откачки от 1 до 30 л/с.Насосы обычно начинают работать от атмосферного давления. Они могут применяться в 1..4х ступенчатом исполнении с предельным давлением соответственно 10<sup>3</sup>..10<sup>2</sup> Па. Недостатками поршневых насосов являются неравномерность процесса откачки, неполная уравновешенность, большие потери на трение ~200 Вт/(л/с) и большая удельная масса 10..20 кг/(л/с).



Рис.4.7.Принцип действия спирального насоса: 1..7 – последовательные положения спиралей, 8 – подвижная спираль, 9 – неподвижная спираль, 10 – откачиваемый газ, 11 – выход, 12 - вход.

В спиральных насосах Одна из двух спиралей закреплена на корпусе, в то время как вторая совершает плоскопараллельное котором движение, при ee центр вращается вокруг центра неподвижной спирали. При таком движении каждая спирали точка также движется по окружности такого же радиуса, как и центр спирали. Поверхности неподвижной и движущейся спиралей разделены зазором и не соприкасаются во время работы. Смазка

насоса не требуется. В связи с большой длиной канала между спиралями зазор имеет большое вакуумное сопротивление. На диаграмме работы насоса (Рис.4.7) позиция 1 соответствует началу рабочего цикла. Серповидные полости, образованные спиралями, уменьшаются в размерах при движении спирали. Выпускное отверстие расположено в центре неподвижной спирали. Движущаяся спираль должна совершить пять циклов орбитального движения прежде, чем газ достигнет выхлопного отверстия в центре насоса.. Увеличение числа орбитальных циклов за время сжатия газа уменьшает перепад давления в зазоре между спиралями и соответственно улучшает предельное давление. Предельное давление 10 Па. Быстрота откачки составляет 1-3 л/с.



Рис.4.8. Конструкция спирального насоса: 1 – крышка, 2 – движущаяся спираль, 3 – неподвижная спираль, 4 – выход, 5 - вход.

В конструкции спирального насоса (Рис.4.8.) работают две ступени откачки. Подвижная спираль удерживается на штырях, закрепленных на валу. Вал вращается в подшипниках, имеющих смазку. Ввод вращения в вакуум имеет неметаллическое уплотнение. Спиральные насосы можно применять только в очень чистых условиях при отсутствии пыли или активных газов. Они объединяют низкое предельное давление, большую быстроту действия, малые габариты, бесшумность и низкие вибрации.

Вращательные насосы делятся на однороторные и двухроторные. Однороторные имеют более простую конструкцию, а двухроторные при синхронном вращении роторов позволяют обойтись без пары трения между роторами и статором. Однороторные насосы широко применяются в разнообразных конструктивных модификациях: жидкостно-кольцевые, пластинчато-роторные, многопластинчатые, пластинчато-статорные и золотниковые.



Рис.4.9. Схема жидкостно-кольцевого насоса

Жидкостно-кольцевые насосы (рис. 4.9) имеют в цилиндрическом корпусе 1 эксцентрично расположенное рабочее колесо 2 с неподвижно закрепленными лопатками. Находящаяся внутри корпуса жидкость во время вращения под действием центробежных сил прижимается к стенкам корпуса и образует жидкостное кольцо 4. Между жидкостным кольцом и лопатками насоса образуются отдельные ячейки неодинакового размера. Вначале их объем увеличивается и газ через всасывающее отверстие 3 в торцевой крышке поступает в насос. Затем объем ячеек уменьшается и сжатый газ через выхлопное отверстие 5 удаляется из насоса. В качестве рабочей жидкости для откачки смеси воздуха с водяным паром используется вода, для откачки хлора - концентрированная серная кислота и т. д. По конструкции и условиям эксплуатации эти насосы проще поршневых, так как не имеют клапанов и распределительных устройств. Предельное давление таких насосов определяется давлением паров рабочей жидкости. Водокольцевые насосы имеют предельное давление (2..3)10<sup>3</sup> Па.

Насосы могут работать от атмосферного давления. В компрессорном режиме они обеспечивают давление (2..3)10<sup>3</sup> Па. Быстрота действия лежит в пределах от 25 до 500 л/с. Удельный расход мощности из-за необходимости перемещения жидкости составляет ~100 Вт/(л/с). Удельная масса насосов около 10 кг/(л/с).



Пластинчато-роторный насос (рис. 4.10) содержит цилиндрический корпус 7 с впускным 4 и выхлопным 3 патрубками и эксцентрично расположенный ротор 6, в пазах которого установлены пластины 5. Под действием центробежной силы пластины прижимаются к корпусу, обеспечивая изменение объема рабочей камеры насоса. Насосы с малой быстротой действия (~1 л/с) работают в масляной обеспечивающей герметизацию ванне, соединений насоса и снижение потерь на

трение. Для предотвращения заполнения маслом рабочей камеры служит клапан 2. Начальное прижатие пластин к поверхности статора осуществляется пружиной 1. Предельное давление таких насосов в одноступенчатом варианте равно 10 Па, а в двухступенчатом – 10<sup>-3</sup> Па.

Многопластинчатые насосы с быстротой откачки до 10<sup>3</sup> л/с выполняются по схеме рис. 4.11 с большим числом пластин. В этих насосах нет масляной ванны, а для уменьшения потерь на трение используются беговые кольца 1, которые приводятся во вращение пластинами 2. Отверстия в беговых кольцах обеспечивают прохождение откачиваемого газа. В некоторых конструкциях, имеющих пластины из антифрикционных материалов, можно обойтись без беговых колец. Предельное давление таких насосов определяется кроме



Рис.4.11. Схема многопластинчатого роторного насоса пластинчато-роторного насоса газовыделения материалов насоса объемом вредного пространства и давлением насыщенных паров масла и составляет 10<sup>3</sup> Па.

Вредное пространство насоса обозначено на рис.4.12 буквой *B*. В пластинчато роторных насосах объем вредного пространства частично заполняется рабочей жидкостью. В корпусе насоса, выполненного по схеме рис. 4.11, из объема вредного пространства делается перепускной канал в одну из рабочих камер, не соединяющихся с откачиваемым объектом. Удельная масса таких насосов от 10 до 30 кг/(л/с), удельный расход мощности от 0,1 до 0,3 кВт/(л/с), причем меньшие значения имеют многопластинчатые роторные насосы.

Однороторные насосы бывают двух типов: пластинчато-статорные и золотниковые.



Рис.4.13. Схема пластинчато-статорного насоса





Пластинчато-статорный насос (рис. 4.13) состоит из следующих основных элементов: корпуса 1, эксцентричного ротора 2, выпускного патрубка 3, пластины 5, пружины 4, входного патрубка 6. Рабочая камера насоса образуется между эксцентрично установленным ротором и корпусом. При вращении по часовой стрелке за первый оборот ротора газ всасывается из откачиваемого объекта, а за второй происходит сжатие и выхлоп газа.

Пластина под воздействием пружины герметично разделяет области всасывания и сжатия откачиваемого газа.

Золотниковый насос (рис. 4.14) состоит из корпуса 1, эксцентрично установленного ротора 2, золотника 6, выпускного патрубка и обратного клапана 3, шарнира 7 и входного патрубка 4. Газ из откачиваемого объекта через входной патрубок и отверстия 5 в золотнике поступает в камеру всасывания A, увеличивающуюся при вращении ротора по часовой стрелке. В это же время объем камеры E уменьшается и находящийся в ней газ сжимается и выталкивается через выхлопной патрубок.

Пластинчато-статорный и золотниковый насосы работают в масляной ванне. Характеристики этих насосов примерно одинаковы, но золотниковые насосы имеют большие быстроты откачки. Быстроты действия этих насосов в зависимости от давления показаны на Рис. 4.15. Кривая 1 соответствует работе одноступенчатого насоса, кривая 2 - двухступенчатого без ловушки, кривая 3 - двухступенчатого с ловушкой. Давление запуска и выпускное давление насосов обычно равны атмосферному, но при герметичной перекачке газов они могут изменяться в широких пределах. Зависимость предельного давления от выпускного показаны на рис. 4.16. Наибольшее выпускное давление  $p_{\rm H} = 2.10^5$  Па. При выпускных давлениях, больших  $p_{\rm H}$ , нарушается герметичность масляного уплотнения в зазорах насоса и наблюдается резкое ухудшение предельного давления. При выпускного.



Рис.4.15. Зависимость быстроты действия от входного давления



Рис.4.16. Зависимость предельного давления от выпускного

В качестве рабочей жидкости насосов обычно применяются вакуумные масла, полученные из обычных смазочных материалов отгонкой как легких, так и тяжелых фракций. Характеристики вакуумных масел отечественного производства приведены в табл. П.4. Температура вспышки масел должна быть не ниже 200 °C, что соответствует отсутствию

в масле легкоокисляющихся фракций. Полусухое трение, существующее в насосах, сопровождается разогревом отдельных соприкасающихся микронеровностей вплоть до температуры плавления металла. В таких условиях наблюдается крекинг масла с образованием легких углеводородов, ухудшающих предельное давление насоса. Характеристики выпускаемых промышленностью однороторных вакуумных насосов различных типов приведены в табл. П.5 и на рис. П.1.

Для работы с большой быстротой действия при малых степенях сжатия удобны двухроторные вакуумные насосы с обкатываемыми профилями. Вращение роторов обеспечивается синхронизирующей передачей. Профили роторов в этих насосах таковы, что при взаимной обкатке они не соприкасаются. Они не нуждаются в смазке и обеспечивают безмасляную откачку. Двухроторные насосы имеют при тех же габаритах значительно большие быстроты действия, чем однороторные, так как из-за отсутствия трения между ротором и статором можно значительно увеличить их частоту вращения.

По способу сжатия газа двухроторные насосы можно разделить на насосы с внешним, частичным внутренним и внутренним сжатием. В насосах с внешним сжатием газ сжимается только в процессе нагнетания. К таким насосам относятся насосы Рутса, имеющие роторы с леминискатными профилями (рис. 4.17). За один оборот каждый из роторов дважды перебрасывает заштрихованный объем газа из области высокого вакуума в область предварительного разрежения. Роторы вращаются в разные стороны Синхронность их вращения обеспечивается зубчатой передачей с передаточным числом, равным единице (обозначена на рисунке пунктиром).

Объем рабочей камеры насоса

$$V_{\kappa} = 2\pi R^2 l K_{\lambda}, \qquad (4.11)$$

где *R* - максимальный радиус ротора; *l* - длина ротора;

$$K_{\lambda} = \Delta/\pi R^2;$$

 $\Delta$  - площадь впадин в площади круга, описанного вокруг ротора. Умножая объем рабочей камеры насоса  $V_{\kappa}$  на частоту вращения роторов n, можно определить геометрическую быстроту откачки насоса  $S_{\Gamma}$ . Обратный поток газа в этих насосах



Рис.4.17. Схема двухроторного насоса (насос Рутса)

определяется технологическими зазорами в роторном механизме:

$$Q_{\rm of} = U_3(p_{\rm BMX} - p_{\rm BX}), \tag{4.12}$$

 $U_3$  - проводимость зазоров в роторном механизме.

Считая зазоры тонкими щелями, запишем проводимость (для воздуха) (2.48) при молекулярном режиме в  $M^3/c$ :  $U_3 = 116 A$ , где  $A = l(\delta_p + 2\delta_{p\kappa})+4R(\delta_{T1}+\delta_{T2})$  - суммарная площадь зазоров,  $M^2$ . Здесь  $\delta_p$  - зазор между роторами ;  $\delta_{p\kappa}$  - зазор между роторами и корпусом;  $\delta_{T1}$  и  $\delta_{T2}$  - торцевые зазоры между роторами и крышками. Величина зазоров между ротором и статором обычно равна 0,004*R*, а между роторами и торцевыми крышками - 0,006*R*.

Обратный поток газа в насосе можно также выразить через предельное давление и максимальную быстроту действия насоса:  $Q_{obp} = S_{max} p_{np}$ . Решая это уравнение совместно с (4.12) при  $p_{Bx} = p_{np}$  найдем коэффициент компрессии насоса

$$K = p_{\text{вых}} / p_{\text{пр}} = 1 + S_{\text{max}} / U_3.$$

Значение коэффициента компрессии зависит от проводимости зазоров, возрастающей с повышением давления. В высоком вакууме для одной ступени *K* ~ 50, а при атмосферном давлении ~ 1,5. В многоступенчатом варианте они обеспечивают выхлоп газа на атмосферу. Для увеличения коэффициента компрессии роторы в насосах Рутса могут выполняться с тремя и более зубьями. При большом количестве зубьев насос Рутса превращается в



Рис.4.18. Двухроторный кулачковый насос

шестеренчатый насос.

Для несимметричных валов с кулачками И впадинами (рис.4.18) получить большие можно коэффициенты компрессии за счет снижения объема рабочей камеры и быстроты откачки. На одних и тех же валах при наличии перегородок могут располагаться несколько последовательно соединенных ступеней

откачки. Трехступенчатые насосы при безмасляной откачке обеспечивают выхлоп непосредственно на атмосферу.

Зависимость быстроты действия от входного давления для двухроторного насоса, представленная на рис. 4.19 имеет характерный спад в области высоких давлений. Предельное давление этих насосов при наличии насоса предварительного разрежения равно  $10^{-2}$  Па. При работе с ловушкой предельное давление составляет  $10^{-3}$  Па. Наибольшее выпускное давление одноступенчатых насосов от  $10^2$  до  $10^3$  Па. Быстрота действия двухроторных насосов лежит в пределах от 5 до 5000 л/с. Удельные характеристики

насоса 0,5..3 кг/(л/с) и 6..30 Вт/(л/с), причем меньшие значения удельной мощности имеют насосы с большой быстротой действия. Характеристики двухроторных насосов различных типов приведены на рис. П.1. и в табл. П.6.

Для работы при высоких давлениях используются винтовые насосы. Один из роторов таких насосов имеет многозаходные спиральные канавки, а другой - выступы. Длина рабочей части вала больше шага резьбы. Откачка идет в осевом направлении за счет перемещения точки контакта между двумя валами. Насосы обеспечивают высокие коэффициенты компрессии, но из-за больших габаритов плохо компонуются в многоступенчатые агрегаты.

Работа объемных вакуумных насосов может сопровождаться проникновением паров рабочих жидкостей из насоса в откачиваемый объект; загрязнением насоса откачиваемыми веществами с высоким давлением насыщенных паров; потерей рабочей жидкости через выхлопной патрубок. Для ограничения этих явлений служит специальное сервисное оборудование, которым в случае необходимости снабжаются объемные насосы: ловушки, влагопоглотители, натекатели, конденсаторы, фильтры.

При высоких давлениях (более 100 Πa) обратный поток паров рабочей жидкости задерживается встречным потоком откачиваемого газа И В применении защитных устройств не возникает необходимости. При более низких давлениях, когда длина свободного пути молекул газа становится больше диаметра входного патрубка насоса, рабочей пары жидкости могут основному двигаться навстречу



Рис.4.19. Зависимость быстроты откачки двухроторного насоса от входного давления: 1-одноступенчатый,

2 - двухступенчатый, 3 - двухступенчатый с ловушкой

потоку и проникать в откачиваемый объект. Для защиты откачиваемого объекта от паров рабочей жидкости используются ловушки - устройства для парциальной откачки паров рабочих жидкостей.

При откачке вакуумных систем с высокими значениями давления насыщенного пара при комнатной температуре возникает опасность загрязнения насоса откачиваемыми веществами. В этом случае насосы снабжаются газобалластным устройством, позволяющим снизить коэффициент компрессии откачиваемого пара в насосе и предотвратить его конденсацию в рабочей камере насоса. В пластинчатых насосах используется в качестве газобалластного устройства натекатель для подачи атмосферного воздуха в рабочую камеру.

Пример конструктивного решения устройства для напуска балластного газа показан на рис. 4.10. В корпусе насоса со стороны торцевой части ротора делается отверстие С в атмосферу, расположенное таким образом, что при вращении ротора оно открывается только во время сжатия в камере насоса. При всасывании торцевая часть ротора закрывает отверстие, предохраняя камеру от заполнения атмосферным воздухом. Для регулирования количества напускаемого балластного газа отверстие С соединяется с атмосферой через натекатель. Если натекатель закрыт, то насос работает в обычном режиме. Использование газобалластного устройства ухудшает предельное давление насоса из-за увеличения перетечек газа из камеры сжатия в камеру разрежения.

Для защиты от пылевых частиц на входе в насос можно устанавливать впускной фильтр из шерстяной ткани, который задерживает пылевые частицы размером более 10 мкм. Потеря рабочей жидкости через выхлопной патрубок уменьшается брызгоуловителями, устанавливаемыми в насосе. При откачке больших газовых потоков они могут оказаться неэффективными. В этом случае устанавливают фильтры для конденсации масляного тумана.

При откачке кислорода необходимо пользоваться негорючими маслами или другими невоспламеняющимися жидкостями, например фосфатными эфирами. Для радиационноопасных помещений разработаны масла, стойкие к радиации. Для откачки ценных и радиоактивных газов требуются насосы с герметичным уплотнением всех элементов на выходе из насоса. В таких конструкциях вакуумные уплотнения установлены в маслоналивном патрубке, сливных пробках, смотровом стекле, и корпус насоса проверяется на герметичность.

## 4.4. Молекулярная откачка

Удаление газа из вакуумной системы с помощью движущихся поверхностей называется молекулярной откачкой. Существуют две схемы молекулярной откачки. Первая (рис. 4.20) представляет собой откачку через канал, одна из стенок которого совершает относительное перемещение со скоростью  $v_p$  параллельно оси канала. Молекулы газа соударяются с движущейся поверхностью, получая приращение количества движения в направлении насоса предварительного разрежения. При этом создается перепад давлений:  $p_2 > p_1$ . Максимальная быстрота действия, которая может быть получена в такой схеме, пропорциональна скорости стенки  $v_p$ :

$$S_{\max} = \gamma F_{\kappa} v_{\rm p} , \qquad (4.13)$$

где *F*<sub>к</sub> - площадь поперечного сечения канала; *γ* - коэффициент, учитывающий соотношения движущейся и неподвижной частей периметра канала.

Принимая число соударений молекул с движущимися и неподвижными поверхностями одинаковым, определим долю молекул, непрерывно получающих приращение скорости, в виде

$$\gamma = f_{\pi} / (f_{\pi} + f_{\mathrm{H}}), \qquad (4.14)$$

где  $f_{\rm d}$  и  $f_{\rm h}$  - движущаяся и неподвижная части периметра поперечного сечения канала. Для прямоугольного канала с размерами: a = 2,5 см; b = 1 см и  $v_{\rm p} = 165$  м/с, согласно (4.13) и (4.14), получим  $S_{\rm max}=23$  л/с.

Дифференциальное уравнение течения газа через канал постоянного поперечного сечения в установившемся режиме (Q = const) можно записать в виде разности прямого и обратного потоков:

$$Q = S_{max}p - C\frac{dp}{dl} , \qquad (4.15)$$

где  $C = U_{\kappa} l_{\kappa}$ ;  $U_{\kappa}$  - проводимость канала с неподвижными сторонами;  $l_{\kappa}$  - длина канала.







Рис.4.21.Характеристики молекулярных насосов: а - зависимость быстроты действия насоса от коэффициента компрессии, б - зависимости максимальных быстроты действия и коэффициента компрессии от размера канала *a* при a = b, l = 1 м,  $v_p = 200$  м/с.

Перепишем уравнение (4.15) в новых обозначениях:

$$\frac{dp}{dl} + Ap - B = 0,$$

$$A = -\frac{S_{max}}{C}; B = -\frac{Q}{C}.$$
(4.16)

С учетом граничного условия  $p = p_1$ , при l = 0 решение (4.16) может быть записано в виде

$$p = \frac{B}{A}(1 - \exp(-Al) + p_1 \exp(-Al)),$$

тогда в конце канала при  $l = l_{\kappa}$  давление

$$p_2 = \frac{Q}{S_{max}} (1 - \exp(S_{max}/U_{\hat{e}})) + p_1 \exp(S_{max}/U_{\hat{e}}).$$

Учитывая, что  $Q = p_1 S_{\rm H}$ , из последнего выражения для быстроты действия получим следующую формулу:

$$S_{e} = S_{max} \frac{p_{2} / p_{1} - exp(S_{max} / U_{\hat{e}})}{1 - exp(S_{max} / U_{\hat{e}})}.$$
(4.17)

Из (4.17) следует линейная зависимость между быстротой действия и коэффициентом компрессии  $p_2 / p_1$ , показанная на рис. 4.21,а. При равенстве давлений  $p_1 = p_2$  быстрота действия максимальна:  $S_{\rm H} = S_{\rm max}$ , а при  $S_{\rm H} = 0$  и  $p_1 = p_{\rm np}$ ,  $p_2 = p_{\rm B}$  имеет место наибольший коэффициент компрессии

$$K_{max} = p_{\hat{a}} / p_{\cdot \hat{\delta}} = \exp(S_{max} / U_{\hat{e}}).$$

$$(4.18)$$

В связи с тем, что проводимость каналов  $U_{\kappa}$  при молекулярном режиме течения пропорциональна  $\sqrt{T/M}$  максимальный коэффициент компрессии возрастает с увеличением молекулярной массы и снижением температуры газа. Зависимость  $K_{\text{max}}$  и  $S_{\text{max}}$ от стороны канала *a* при *a* = *b*,  $v_{\rm p}$  = 200 м/с, *l* = 1 м показана на рис. 4.21,6. Для прямоугольного канала *a* = 2,5 см, *b* = 1 см при  $l_{\kappa}$  = 55 см и  $v_{\rm p}$  = 165 м/с по формуле (4.18) максимальное значение коэффициента компрессии  $p_{\rm B} / p_{\rm np}$  = 10<sup>10</sup>. Таким образом, данная схема молекулярной откачки удобна для получения больших коэффициентов компрессии при малых быстротах откачки. При увеличении молекулярной массы откачиваемого газа  $K_{\rm max}$  возрастает, а  $S_{\rm max}$  остается без изменения. Таким образом, насос более эффективно откачивает тяжелые газы.



Рис. 4.22. Схема откачки при взаимно перпендикулярном перемещении пластины и газового потока

Вторая схема молекулярной откачки (рис.4.22,а) использует для удаления газов зависимость проводимости наклонного канала, движущегося перпендикулярно газовому потоку со скоростью  $v_p$ . Для упрощения задачи примем, что пластину с наклонным каналом с обеих сторон бомбардируют перпендикулярно поверхности пластины потоки молекул газа  $q_1$  и  $q_2$ . Остановив пластину и сложив вектор относительной скорости молекул  $v_p$  с векторами тепловых скоростей молекул  $v_a$ , получим измененное направление движения молекул (рис. 4.22,б). Поток  $q_1$ , при tg $\alpha = v_a/v_p$  входит по оси канала, а поток  $q_2$  перпендикулярно оси. Это приводит к тому, что проводимости канала для потоков  $q_1$ , и  $q_2$
различны. Приближенно можно принять, что для потока  $q_1$ , канал имеет форму трубы, а для потока  $q_2$  - форму трубы с поворотом на 90°.



Рис.4.23. Вероятности прохождения канала молекулами газа *P*<sub>12</sub> и *P*<sub>21</sub> в зависимости от относительной скорости и угла наклона паза

Для установившегося режима течения газа

$$Q = S_{\rm H} p_1 = U_{12} p_1 - U_{21} p_2 , \qquad (4.19)$$

где U<sub>12</sub> и U<sub>21</sub> - проводимости канала для потоков  $q_1$ , и  $q_2$  соответственно. Значение указанных проводимостей можно определить пользуясь справочными данными 0 проводимостях прямых труб и труб с коленом или непосредственным математическим моделированием методом Монте-Карло. На рис. 4.23 в безразмерной форме приведены результаты определения вероятности прохождения канала молекулами полученные газа, математическим моделированием для

каналов с соотношением сторон *a* / *b* = 1. Из (4.19) следует выражение для быстроты действия

$$S_i = U_{12} - U_{21} \frac{p_2}{p_1}.$$
(4.20)

Зависимость быстроты действия насоса от коэффициента компрессии аналогична такой же зависимости для первой схемы. Максимальная быстрота действия при  $p_2 / p_1 = 1$  составляет

$$S_{max} = U_{12} \left( 1 - \frac{U_{21}}{U_{12}} \right) = U_{12} \left( 1 - \frac{P_{21}}{P_{12}} \right).$$
(4.21)





Рис.4.24. Зависимость быстроты откачки от коэффициента компрессии для насоса с параметрами  $a = b = 2.10^{-2}$  м,  $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $v_{\rm p} = 200$  м/с: 1 - N<sub>2</sub>, 2 - CO<sub>2</sub>

Рис.4.25. Зависимость максимальной быстроты откачки и максимального коэффициента компрессии насоса с параметрами a = b, от размера канала  $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $v_p / v_a = 0,5$ : 1 -  $K_{\text{max}}$ , 2 -  $S_{\text{max}}$ 

Здесь  $P_{12}$  и  $P_{21}$ - вероятности перехода молекул через канал в прямом и обратном направлениях, пропорциональные соответствующим проводимостям. Наибольший коэффициент компрессии наблюдается при  $S_{\rm H} = 0$ . Если  $p_1 = p_{\rm np}$ , а  $p_2 = p_{\rm B}$ , то из (4.19)  $K_{\rm max} = p_{\rm B} / p_{\rm np} = U_{12} / U_{21} = P_{12} / P_{21}$ . Величина  $p_{\rm B} / p_{\rm np}$  для одной ступени невелика (обычно 2..4), поэтому данная схема более удобна для получения больших быстрот действия. Повышение коэффициента компрессии достигается последовательным соединением нескольких ступеней откачки.

Быстрота откачки насоса слабо зависит от молекулярной массы (рис 4.24), особенно в рабочих режимах. Зависимость  $K_{\text{max}}$  и  $S_{\text{max}}$  от размера канала *а* показана на рис. 4.25.

### 4.5. Конструкции молекулярных насосов

Молекулярные насосы с одинаковым направлением движения газа и стенки канала имеют много конструктивных разновидностей. Насос (рис.4.26,а) имеет в статоре 3 набор цилиндрических канавок, входные и выходные отверстия в которых разделены перегородкой 1. Ротор 2 вращается с большой частотой так, что его линейная скорость близка к тепловой скорости молекул. Спиральный паз 1 на поверхности статора 2 и цилиндрическая поверхность ротора 3 образует рабочий канал (схема на рис. 4.26,б). Спиральные канавки на торцевых поверхностях статора 1, отстоящие на минимальном расстоянии от вращающегося диска 2, используются для молекулярной откачки в схеме рис.4.26,в. Через зазор между статором и ротором происходит возврат газа из камеры сжатия в камеру всасывания, что ухудшает реальные характеристики насосов. Нормальная работа таких насосов возможна при зазоре между ротором и статором, не превышающем 0,1 мм.

Проникновение паров масел, применяемых для смазки подшипниковых узлов, в откачиваемый объект во время работы насоса очень мало, но возрастает при остановке насоса.

Быстрота действия насосов прямо пропорциональна частоте вращения ротора, которая достигает 30..60 тысяч об/мин. Максимальная быстрота действия обычно не превышает 100 л/с из-за малого поперечного сечения каналов. Предельное давление составляет 10<sup>-5</sup> Па при коэффициенте компрессии 10<sup>5</sup>..10<sup>6</sup>.



Рис.4.26. Схемы молекулярных насосов

Молекулярные насосы с взаимно перпендикулярным движением рабочих поверхностей и потока откачиваемого газа получили широкое распространение. Конструкции турбомолекулярных насосов классифицируются по расположению вала ротора горизонтальные или вертикальные; по устройству и форме рабочих органов цилиндровые, конусные, дисковые с радиальным потоком, с дисковые осевым потоком, барабанные Большое

влияние на характеристики насоса оказывает конструкция опорных узлов на смазываемых подшипниках качения, на магнитных опорах или газовой подушке.

Схемы насосов с горизонтальным И вертикальным расположением вала ротора показаны на рис. 4.27, а,б. В корпусе 2 установлены неподвижные статорные колеса 4, между которыми вращаются колеса 3, закрепленные на роторе 1. Роторные колеса выполняются в виде дисков с прорезями. В статорных колесах имеются зеркально



Рис.4.27. Схемы турбомолекулярных насосов

расположенные прорези такой же формы. Для удобства монтажа статорные колеса разрезаются по диаметру. При горизонтальном положении ротора движение газа в насосе после входа во всасывающий патрубок разветвляется на два потока, которые соединяются в выхлопном патрубке.

Малые коэффициенты компрессии каждой ступени позволяют увеличить рабочие зазоры. При диаметре рабочих колес 200 мм осевой (между колесами) и радиальный (между корпусом и роторным колесом или ротором и статорным колесом) зазоры могут составлять 1 ... 1,2 мм, что позволяет значительно повысить надежность работы. Увеличение зазоров, снижая коэффициент компрессии насоса, слабо влияет на быстроту действия. Диапазон рабочих давлений: 10<sup>-6</sup> ..10 Па.

Быстрота откачки турбомолекулярных насосов слабо зависит от рода газа, Предельное давление насосов 10<sup>-7</sup> .. 10<sup>-8</sup> Па. С увеличением молекулярной массы коэффициент компрессии растет за счет уменьшения перетечек через зазоры и увеличения отношения линейной скорости ротора к тепловой скорости молекул v<sub>p</sub>/v<sub>ap</sub>. Наибольшее выпускное давление таких насосов для воздуха 1 ..10 Па. Удельная быстрота действия - 2 л/с на 1 см<sup>2</sup> площади входного сечения. Достоинства турбомолекулярного насоса: быстрый запуск насоса в течение 5..10 мин; практически безмасляный спектр остаточных газов при условии напуска сухого азота во время запуска и остановки насоса. Для защиты подшипников при откачке активных газов в них производится напуск инертного газа. Недостатком насоса является наличие высокоскоростного ротора быстро изнашивающимися подшипниками или сложными системами подвеса. Гибридные насосы имеют в одном корпусе ступени обоих типов, что позволяет обеспечить выпускное давление (2..4)10<sup>3</sup> Па. Дополнительное использование вихревых ступеней позволяет им работать с выхлопом атмосферу. Характеристики современных турбомолекулярных насосов приведены на рис. П.2 и табл. П7.

## 4.6. Пароструйная откачка

При пароструйной откачке (рис. 4.28) молекулы откачиваемого газа, поступающие в насос через входной патрубок 1, взаимодействуя со струей пара, имеющей звуковую или сверхзвуковую скорость, приобретают дополнительную скорость в направлении насоса предварительного разрежения, присоединяемого к выходному патрубку 6.

В камере 3 происходит смешение откачиваемого газа и паровой струи, выходящей из сопла 2. Запирающий канал 4 создает сопротивление обратному потоку газа, обеспечивая коэффициент компрессии насоса. Разделение откачиваемого газа и рабочего пара осуществляется в камере 5 в процессе конденсации рабочего пара на охлажденных поверхностях, после чего откачиваемый газ выходит из насоса через выходной патрубок, а сконденсировавшийся пар поступает по трубопроводу 7 в кипятильник 8, где вновь испаряется и по паропроводу 9 попадает в рабочее сопло 2, обеспечивая непрерывность процесса откачки.

Взаимодействие откачиваемого газа с паровой струей зависит от степени вакуума. При низком вакууме молекулы, находящиеся в пограничном с паровой струей слое, за счет внутреннего трения увлекают другие слои газа. Такие насосы называют эжекторными.

В области высокого вакуума все молекулы откачиваемого газа, перемещаясь за счет самодиффузии, непосредственно взаимодействуют с движущейся струей пара, а насосы, работающие в таких условиях, называют диффузионными.

Рассмотрим принцип действия эжекторного насоса. Быстрота действия насоса при заданных значениях давлений на входе в насос  $p_2$  и на выходе из насоса  $p_5$ , а также производительности рабочего пара  $G_1$  определяется по  $IS_3$  - диаграмме рабочего пара.



Рис.4.28. Схема пароструйной откачки

Кривая AB 4.29,a на рис. определяет давление насыщенного пара рабочей жидкости. Из начального состояния в кипятильнике (точка 1 на кривой AB, давление  $p_1$ , сечение 1 на схеме сопла) рабочий пар адиабатически расширяется и переходит в состояние (точка 2), соответствующее давлению  $p_2$ струи рабочего пара в откачиваемом объекте (сечение 2).



Рис.4.29. *IS*-диаграмма рабочего пара (а), схема и рабочие характеристики сопла эжекторного насоса (б)

Адиабатические процессы на *IS*<sub>э</sub> - диаграмме соответствуют прямым линиям, параллельным оси *I*. Закон сохранения энергии для адиабатического истечения газа, при котором работа расширения газа равна приращению его кинетической энергии, можно записать в виде

$$G_1(I_1 - I_2) = G_1 \omega_2^2 / 2, \tag{4.22}$$

где  $\omega_2$  -скорость паровой струи на выходе из сопла в сечении 2. Откачиваемый газ (для простоты считаем, что откачиваются пары рабочей жидкости) находится в состоянии, соответствующем точке и сечению 3. Смешение потока откачиваемого газа  $G_2$  с паровой струей по закону сохранения энергии приведет к изменению скорости:

$$G_1 \frac{\omega_2^2}{2} = (G_1 + G_2) \frac{\omega_4^2}{2}, \qquad (4.23)$$

где  $\omega_4$  -скорость смеси в сечении 4 (рис. 4.29, б).

В диффузоре, расположенном между сечениями 4 и 5, парогазовая смесь адиабатически сжимается до давления *p*<sub>5</sub>, причем точка 5, соответствующая сечению 5, должна лежать на кривой *AB*. Это можно использовать для нахождения точки 4 графическим построением. В процессе адиабатического сжатия кинетическая энергия струи переходит в энтальпию, что позволяет записать

$$(G_1 + G_2)\frac{\omega_4^2}{2} = (G_1 + G_2)(I_5 - I_4),$$
 (4.24)

где *I*<sub>4</sub> и *I*<sub>5</sub> - энтальпии в точках 4 и 5.

Из уравнений (4.22)..(4.24) можно найти выражение для теоретической быстроты действия насоса:

$$S_{T} = \frac{G_{2}}{\rho_{2}} = \frac{G_{1}(I_{1} - I_{2} - I_{5} + I_{4})}{\rho_{2}(I_{5} - I_{4})}, (4.25)$$

где  $\rho_2$  - плотность газа в сечении 2;  $I_1$  и  $I_2$  -энтальпии в точках 1 и 2. Быстрота действия насоса зависит от производительности сопла и свойств рабочего пара. В эжекторных насосах она лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч литров в секунду.



Рис.4.30. Сопло диффузионного насоса

Максимальное выпускное давление не может быть больше  $p_1$  - давления рабочего пара в кипятильнике насоса, поэтому в случае паромасляного насоса оно не превышает (1..5)10<sup>2</sup> Па, а для парортутного - (20..40)10<sup>2</sup> Па. Увеличить максимальное выпускное давление паромасляного насоса нельзя, так как температура пара в кипятильнике ограничивается температурой разложения масла. В парортутных насосах возможно повышение максимального выпускного давления до атмосферного, но из-за больших потерь и токсичности ртути этого обычно не делают.

Предельным остаточным давлением эжекторного насоса является давление перехода из среднего в высокий вакуум, когда происходит расширение паровой струи и нарушение оптимального режима работы. Значение предельного давления составляет 10<sup>-1</sup>..10<sup>-2</sup> Па.

При истечении струи пара в высокий вакуум происходит ее расширение за счет тепловых скоростей молекул. При равенстве скорости истечения струи и скорости звука струя выходит из сопла под углом 45° к его оси (рис. 4.30). Давление пара в струе значительно больше, чем давление откачиваемого газа. Наилучшие условия для захвата молекул откачиваемого газа обеспечиваются тогда, когда давление пара в струе соответствует среднему вакууму. При этом все молекулы откачиваемого газа проникают в паровую струю при первом соударении. При большей плотности паровой струи вероятность захвата молекул снижается.

Теоретическая быстрота деиствия диффузионного насоса в связи с малым количеством откачиваемого газа определяется не изменением термодинамических характеристик паровой струи, как в эжекторном насосе, а геометрическими размерами сопла и парциальным давлением откачиваемого газа в паровой струе:

181

$$S_{\rm o} = \frac{A}{n} (N_{q1} - N_{q2}), \qquad (4.26)$$

где A - проекция поверхности паровой струи, доступной для молекул откачиваемого газа, на плоскость, перпендикулярную оси x;  $N_{q1}$  и  $N_{q2}$  - количество молекул откачиваемого газа, ударяющихся и вылетающих в единицу времени с единицы площади A; n - концентрация газа у входа в насос.

В соответствии с выражениями для  $N_q$  из (1.34) и  $v_a$  из (1.18) формулу для быстроты действия насоса (4.26) можно переписать:

$$S_{\rm d} = A \frac{\sqrt{8k / (\pi m)}}{4n} (n\sqrt{T} - n_{\rm a} \sqrt{T_{\rm a}}), \qquad (4.27)$$

здесь T и  $T_r$  - температура газа в паровой струе и у входа в насос;  $n_r$ - концентрация газа а паровой струе.

Так как  $n_{\Gamma} / n = p_{\Pi p} / p$ , то

$$S_{\delta} = \left(\frac{R}{2\pi}\right)^{1/2} \sqrt{\frac{T}{M}} A \left(1 - \frac{p_{\tilde{\tau}\,\delta}}{p} \sqrt{\frac{T_{\tilde{a}}}{T}}\right). \tag{4.28}$$

Таким образом, быстрота действия диффузионного насоса зависит от температуры и рода газа, при этом тяжелые молекулы откачиваются с меньшей быстротой действия. Реальная быстрота действия оказывается меньше теоретического значения, рассчитанного из (4.28), из-за неполного захвата молекул откачиваемого газа паровой струей. Это связано с наличием у струи "паровой опушки", появляющейся в результате потока молекул пара, имеющих тепловые скорости больше, чем скорость паровой струи.

Если ввести коэффициент захвата струи *H*<sub>o</sub>, то выражение для расчета быстроты действия может быть записано в следующем виде:

$$S_{i} = H_{o}S_{o} = H_{i}\sqrt{\frac{RT}{2\pi M}}A\left(1 - \frac{p_{i}}{p}\sqrt{\frac{T_{a}}{T}}\right).$$
(4.29)

Среднее значение коэффициента захвата  $H_0 = 0,3$ .

Для определения коэффициента компрессии и предельного давления рассмотрим более подробно процессы, происходящие в паровой струе диффузионного насоса. Концентрацию газа в точке х паровой струи обозначим  $n_r(x)$  (см.рис.4.30), а составляющую скорости паровой струи по направлению оси *x* - через *W*.

Производительность откачки равна разности прямого и обратного потоков:

$$Q = Q_{\pi} - Q_{\rm ob},\tag{4.30}$$

где  $Q_{\rm np} = n_{\rm r}(x)$  W;  $Q_{ia} = D \frac{dn_{\rm a}(x)}{dx}$ ; D - коэффициент диффузии газа в струе пара. Прямой поток молекул откачиваемого газа в диффузионном насосе движется за счет соударений молекул газа и пара совместно с паровой струей, а обратный возникает за счет теплового движения молекул, диффундирующих в противоположном направлении. Если достигнуто предельное давление, то Q = 0, откуда



$$n_{\tilde{a}}(x)W - D\frac{dn_{\tilde{a}}(x)}{dx} = 0.$$
 (4.31)

Считая, что газ в струе пара подчиняется уравнению газового состояния, получим

$$\frac{\mathrm{dn}_{\tilde{a}}(x)}{\mathrm{n}_{\tilde{a}}(x)} = \frac{\mathrm{dp}_{\tilde{a}}(x)}{\mathrm{p}_{\tilde{a}}(x)}.$$
(4.32)

Проинтегрировав выражение (4.31) с учетом (4.32) в пределах от  $x_1$ , до  $x_2$  и от  $p_1$  до  $p_2$  имеем

$$\ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{W}{D} (x_2 - x_1).$$

Рис.4.31. Принципиальная схема эжекторного насоса

Обозначая длину паровой струи  $b = (x_2 - x_1)$ , перепишем полученное выражение в виде

$$p_2 / p_1 = \exp(W. b / D)$$

Таким образом, коэффициент компрессии для заданной геометрии струи определяется отношением проекции скорости паровой струи на ось *x* к коэффициенту диффузии откачиваемого газа в паровой струе. Для увеличения коэффициента компрессии необходимо повышать скорость паровой струи и увеличивать ее плотность, так как коэффициент диффузии *D* обратно пропорционален плотности паровой струи.

Рассмотрим конструкции пароструйных насосов. Схема эжекторного насоса показана на рис.4.31. Насос состоит из кипятильника 1, сверхзвукового эжекторного сопла Лаваля 2, камеры смешения 5, впускного и выпускного фланцев 3 и 4. Камера смешения теплоизолирована от корпуса насоса. На выпускном патрубке имеется холодильник 6, охлаждаемый проточной водой. Сконденсировавшийся на стенках холодильника пар стекает в кипятильник по трубке 7, обеспечивающей непрерывную циркуляцию рабочей жидкости в насосе.

диффузионный Простейший насос (рис. 4.32состоит ИЗ 1. кипятильника диффузионного 2. сопла закрепленного на паропроводе 6, холодильника 4, впускного и выпускного патрубков 3 и 5. Пары рабочей кипятильника жидкости ИЗ проходят по паропроводу через зонтичное сопло И конденсируются на стенках насоса, охлаждаемых холодильником. За время движения пара от конца сопла до стенок насоса в струю пара диффундирует откачиваемый газ.



После конденсации образовавшейся парогазовой смеси выделившийся газ откачивается через выпускной патрубок насосом

Рис.4.32. Принципиальная схема диффузионного насоса

предварительного разрежения, а сконденсированный пар стекает по стенкам насоса в кипятильник через зазор между паропроводом и корпусом насоса. Влияние зазора *a* и угла наклона сопла α на предельное давление и быстроту действия диффузионных насосов показано на рис.4.33, а, б.



Рис.33. Зависимости быстроты действия (а) и предельного давления (б) от кольцевого зазора при различных углах наклона сопла.

При превышении зазором a своего оптимального значения  $a_0$  уменьшается скорость струи у стенок насоса, что приводит к увеличению обратного потока. Аналогичная зависимость существует и от угла  $\alpha$ , который сильно влияет на осевую составляющую скорости струи.

насосы,

Диффузионные

предназначенные для работы в диапазоне давлений  $10^{-1}$ ..10 Па, называются бустерными. В этих насосах увеличена мощность подогревателя, применены термостойкие рабочие жидкости, что позволяет увеличить выпускное давление и сдвинуть характеристику насоса  $S_{\rm H} = f(p)$  в сторону более высоких давлений.



Рис.4.34. Характеристики пароструйных насосов

Основной характеристикой пароструйных насосов является зависимость быстроты действия от давления на входе в насос (рис.4.34,а). В средней области рабочих давлений быстрота действия постоянна и равна  $S_{max}$ . При приближении рабочего давления к предельному она стремится к нулю из-за наличия обратного потока газов и паров из насоса в откачиваемый объект. При увеличении рабочего давления за верхнюю границу молекулярного режима течения быстрота действия уменьшается в связи со снижением скорости диффузии молекул газа в струю пара и при максимальном входном давлении  $p_3$  стремится к нулю.

Предельное давление (рис. 4.34,6) слабо зависит от выпускного. Срыв характеристики насоса наступает при равенстве выпускного давления и давления паровой струи, соответствующего давлению  $p_{\rm kp}$ .

При увеличении мощности N подогрева насоса за счет увеличения скорости паровой струи быстрота действия вначале возрастает (рис.4.34,в), достигает максимального значения при  $N_{\text{опт}}$ , а затем уменьшается из-за увеличения плотности паровой струи. Максимальное выпускное давление насоса  $p_{\text{кр}}$  при увеличении мощности подогревателя непрерывно возрастает (рис.4.34,г).

#### 4.7. Рабочие жидкости

К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляются следующие требования:

- минимальная упругость паров при комнатной температуре и максимальная при рабочей температуре в кипятильнике;

- стойкость к разложению при нагревании;

- минимальная способность растворять газы;

- химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам и по отношению к материалам насоса;

- малая теплота парообразования.

Минимальная упругость паров при комнатной температуре требуется для получения наименьшего предельного давления насоса. Максимальное давление паров при рабочей температуре кипятильника увеличивает выпускное давление насоса и уменьшает требуемую мощность подогревателя. Стойкость к разложению рабочей жидкости при нагревании влияет на срок службы рабочей жидкости и максимальное выпускное давление. Растворимость газов в рабочей жидкости приводит к увеличению обратного потока газов через сопло вместе с паровой струей. Химическая стойкость определяет срок службы рабочей жидкости и ограничивает выбор конструкционных материалов насосов. При малой теплоте парообразования требуется меньшая мощность подогревателя насоса.

В качестве рабочей жидкости пароструйных насосов применяется ртуть, минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот, кремнийорганические соединения.

Ртуть (P-1, P-2), как рабочая жидкость пароструйных насосов, имеет следующие достоинства: не окисляется воздухом, однородна по составу и не разлагается при рабочих температурах насоса, растворяет малое количество газов и имеет высокую упругость пара при рабочей температуре в кипятильнике. Недостатки ртути: токсичность, химическая активность по отношению к цветным металлам, высокая упругость паров при комнатной температуре (10<sup>-1</sup> Па).

Минеральные масла для пароструйных насосов (ВМ-1, ВМ-5) получают вакуумной дистилляцией продуктов переработки нефти. Они характеризуются низкой упругостью пара при комнатной температуре (10<sup>-6</sup> Па), удовлетворительной термостойкостью, но имеют невысокую термоокислительную стойкость и образуют смолистые налеты на внутренних деталях насоса.

Эфиры, применяемые в качестве рабочей жидкости пароструйных насосов, представляют собой продукты синтеза фталевой и себациновой кислот с высшими спиртами,

186

а также полифениловые соединения, состоящие из бензольных радикалов, соединенных в цепи через атомы кислорода. Полифениловые эфиры (ПФЭ) имеют очень низкое давление паров при комнатной температуре (10<sup>-9</sup> Па) и высокую термоокислительную стойкость.

Кремнийорганические жидкости для пароструйных насосов (ВКЖ-94, ПФМС-2) - это полисилоксановые полимерные соединения, состоящие из функциональных групп (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>SiO. Они обладают высокой термоокислительной стойкостью и достаточно низкой упругостью пара при комнатных температурах (10<sup>-5</sup> Па).

В насосах чаще всего используют дешевые минеральные масла, кремнийорганические жидкости используются в системах с частым напуском атмосферного воздуха. Эфиры, стоимость которых еще высока, применяются для систем, где требуется получение сверхвысокого вакуума. Ртуть из-за токсичности используют в пароструйных насосах только для откачки ртутных систем, например ртутных выпрямителей. Основные типы рабочих жидкостей приведены в табл.П.4.

В насосах, работающих на неоднородных по составу или термически нестабильных жидкостях, часто применяют фракционирующие устройства, выделяющие более тяжелые фракции с низкой упругостью пара для работы в первой ступени откачки пароструйного насоса.

## 4.8. Конструкции пароструйных насосов

Конструкции пароструйных насосов достаточно просты и надежны. Имеется возможность объединять в одном корпусе диффузионный и эжекторный насосы, что позволяет значительно увеличить коэффициент компрессии и расширить диапазон рабочих давлений. На рис. 4.35 показана конструкция многоступенчатого пароструйного насоса, в котором все ступени откачки питаются от одного кипятильника 5. Корпус насоса охлаждается водой, подаваемой в холодильник 3. В насосе используется две диффузионных ступени 1 и 2, работающие в области высокого вакуума, а также эжекторная ступень 4, работающая в области среднего вакуума. Коэффициент компрессии таких насосов может достигать 10<sup>5</sup>..10<sup>6</sup>.

Ha 4.36,а,б рис. показаны конструкции стеклянного И металлического фракционирующих насосов. Гидравлическое сопротивление, препятствующее перемешиванию рабочей жидкости, стеклянной В конструкции создается тонкими трубками, последовательно соединяющими кипятильники различных ступеней откачки, начиная со ступени, работающей при максимальном давлении откачиваемого газа. В металлической конструкции ту же роль выполняет зазор между цилиндром паропровода и основанием насоса.



Рис.4.35. Многоступенчатый пароструйный насос



Рис.4.36. Фракционирующие пароструйные насосы: а - стеклянный, б - металлический

Сконденсировавшаяся на стенках корпуса насоса рабочая жидкость из-за большого гидравлического сопротивления достигает кипятильника первой ступени насоса за достаточно длительное время, необходимое для испарения легких фракций.

Основные технические характеристики пароструйных насосов, выпускаемых промышленностью, приведены на рис. П.3 и в табл. П.8, П.9.

#### 4.9 Ловушки

Предельное давление масляных насосов обусловлено обратным потоком паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект. Его можно значительно уменьшить, если на пути обратного потока установить ловушки. К ловушкам предъявляются следующие основные требования: максимальное защитное действие на заданном сроке службы и минимальное сопротивление основному потоку откачиваемого газа. В качестве дополнительных требований можно назвать возможность регенерации, надежность, простоту и технологичность конструкции, удобство эксплуатации. По принципу действия ловушки можно разделить на конденсирующие, сорбирующие и диссоциирующие.



Рис. 4.37 Ловушки для низковакуумных насосов

Конденсирующие механические ловушки (рис. 4.37,а) представляют собой устройства, препятствующие прямому пролету паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект. Для получения заметного защитного действия вплоть до атмосферного давления в ловушке должны выполняться условия молекулярного режима течения газа, что соответствует наибольшему расстоянию между элементами ловушки 0,1 мкм. В защитных экранах 1 такие размеры можно обеспечить применением пористых материалов: пористого стекла, стекловолокнистых материалов, пористых меди и нержавеющей стали. Наиболее часто используемые в ловушках материалы приведены в табл. 4.1.

#### Характеристики пористых материалов

Таблица 4.1

Параметры	Материалы							
	тонкопористое	широкопористое	медные					
	стекло	стекло	сталь	фильтры				
Размеры	3.10 <sup>-3</sup>	1.10-1	$1,5.10^{1}$	$2.10^{1}$				
пор,мкм								
Удельная	$1.10^{-10}$	1.10 <sup>-8</sup>	$2.10^{-5}$	1.10 <sup>-4</sup>				
проводимость,								
$M^{3}/(c.cM^{2})$								

Габариты ловушек зависят от удельной проводимости пористых материалов. Поглощение паров масла в ловушках осуществляется конденсацией на стенках капиллярных каналов. Период непрерывной работы ловушки составляет несколько сотен часов, по истечении которых элемент должен быть заменен, очищен продувкой атмосферным воздухом или прогрет до высоких температур (~500 °C). Термостатирование ловушек во время их работы осуществляется проточной водой. Снижение температуры ловушек дополнительно повышает их защитное действие, но несколько снижает удельную проводимость.

службы H20 Увеличения срока форвакуумных ловушек с пористыми фильтрами (рис.4.37,б) можно достигнуть добавляя В них адсорбционные материалы: активные угли, цеолиты с размерами пор ~ 9А, активную окись алюминия. Ловушки с адсорбентом нельзя подвергать воздействию атмосферного воздуха, так как они могут поглотить большое количество атмосферной воды. которая затем будет выделяться во время работы насоса. Для удаления



насосов

поглощенных в адсорбционном элементе 1 масла и воды ловушку прогревают нагревателем 2 до 300 °C. Клапан 3 помещают в одном корпусе с ловушкой и закрывают во время обезгаживания адсорбента, защищая от загрязнения вакуумную систему.

На нагретых поверхностях диссоциирующих ловушек углеводороды разлагаются на легкооткачиваемые газы: водород, оксид углерода, диоксид углерода и твердый углерод, который осаждается на стенках ловушки, а легкие газы откачиваются насосами. Диссоциирующие поверхности разогреваются прямым пропусканием электрического тока. Работа электронных диссоциирующих ловушек основана на возбуждении или ионизации молекул рабочей жидкости в разряде с холодным или горячим катодом. Возбуждение увеличивает склонность молекул к диссоциации и последующей полимеризации на стенках ловушки. При достаточной энергии электронов сложные молекулы масла после взаимодействия могут распадаться на более легкие составляющие и углерод. Легкие составляющие откачиваются насосом, а углерод осаждается на стенках ловушки. Эффективность ловушек зависит от плотности электронного тока. Диссоциирующие ловушки могут использовать каталитическое разложение паров масла на окисленных металлических поверхностях.

В диссоциирующих ионных ловушках (рис. 4.37, в) корпус, имеющий форму цилиндра, служит заземленным катодом для холодного разряда. Анодом является стержень 1, расположенный вдоль оси цилиндра. Разряд горит при напряжении на аноде ~3 кВ и наличии осевого магнитного поля, создаваемого внешними магнитами. Электроны, эмиттируемые катодом, движутся по удлиненной траектории к аноду, ионизируя остаточный ионы. Положительные бомбардирующие поверхность газ. корпуса, разрушают поверхностную пленку масла. Это приводит к выделению водорода и полимеризации углеводородов в твердые вещества. Охлаждение корпуса и защитного экрана 2 осуществляется водой. Такая ловушка может уменьшить парциальное давление паров масла в 10..100 раз.

Одним из видов конденсирующих ловушек для пароструйных насосов является отражательный колпачок 1 (рис.4.38,а), охлаждаемый водой. Использование отражательного колпачка снижает обратный поток паров масла, проходящий через единицу площади зазора между первым соплом и корпусом насоса от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>-5</sup> мг/(с.см<sup>2</sup>). Жалюзийные и конические дисковые ловушки (рис.4.38,б) уменьшают обратный поток до 1.10<sup>-6</sup> мг/(с.см<sup>2</sup>). Скорость испарения паров масла с поверхностей таких ловушек, охлаждаемых водой, значительно меньше, чем с разогретого до температуры 200 °C верхнего сопла пароструйного насоса.

192

Сорбционные ловушки поглощают пары масел поверхностями пористых адсорбентов: активных углей, цеолитов, силикагелей и т.д. Адсорбенты должны быть очищены от посторонних веществ, адсорбированных в порах молекулярных размеров при обычных атмосферных условиях прогревом в вакууме при температуре около 300 °C. Адсорбция паров масел на очищенных поверхностях осуществляется обычно при комнатной температуре до тех пор, пока равновесное давление паров масла меньше допустимого. После этого ловушку необходимо регенерировать прогревом. Основные составляющие воздуха - азот и кислород - при комнатной температуре адсорбируются в очень малых количествах.

Можно ориентировочно рассчитать срок службы сорбционной ловушки, принимая с запасом, что в ней поглощается весь обратный поток паров масла. Воспользовавшись уравнением изотермы полимолекулярной адсорбции (1.56) равновесное давление паров масла в ловушке запишем в следующем виде:

$$p = p_T \frac{C(\theta - 1) + \sqrt{C^2(\theta - 1)^2 + 4\theta^2(C - 1)}}{2\theta(C - 1)},$$
(4.34)

где *p*<sub>T</sub> - давление насыщенных паров масла при рабочей температуре ловушки;

$$C = \exp\left(\frac{Q_a - E}{RT}\right);$$

θ - степень покрытия поверхности адсорбента мономолекулярным слоем; *Q* и *E* - теплоты адсорбции и конденсации Так как

$$\theta = \frac{1}{a_m A} \int_0^{t_c} q dt,$$

где q - обратный поток паров масла; A - активная поверхность адсорбента, то при постоянном обратном потоке паров масла (q = const) легко определить срок службы ловушки

: 
$$t_{\rm c} = a_{\rm m} A \theta_{\rm max} / q$$

Здесь  $\theta_{\text{max}}$  определяется из (4.34) при  $p = p_{\text{max}}$ , где  $p_{\text{max}}$  - максимально допустимое давление паров масла в откачиваемом объекте.

Конструктивная схема высоковакуумной адсорбционной ловушки, показанная на рис.4.38,в; состоит из корпуса 4, нагревателя 3, адсорбента 2, отражателей 1, которые обеспечивают оптическую плотность ловушки. Материалы, из которых изготовлена ловушка, должны допускать прогрев до 300..400°С. Адсорбент необходимо располагать так, чтобы предотвратить миграцию паров масла в откачиваемый объект по стенкам ловушки. При проектировании ловушек следует конструктивными методами снижать ее тепловую инерцию, ухудшающую условия эксплуатации.

Охлаждаемые ловушки имеют рабочие температуры ниже комнатной. В качестве хладоагента часто используются лед и NaCl(-18 °C), лед и CaCl<sub>2</sub> (- 48 °C), твердая углекислота со спиртом (-78 °C), фреон (- 120 °C), жидкий воздух (-183 °C), жидкий азот (- 196 °C). Для получения низких температур (до -70 °C) можно применять полупроводниковые элементы, работающие на эффекте Пельтье. Понижение температуры конденсирующей поверхности уменьшает упругость паров рабочей жидкости. Например, для воды при температурах +15; -78; -196 °C упругость паров соответственно 2.10<sup>3</sup>; 7.10<sup>-2</sup>; 10<sup>-19</sup> Па; для ртути при +18 и –196 °C упругость паров равна 10<sup>-1</sup> и 10<sup>-30</sup> Па.

Быстрота откачки единицы поверхности конденсирующих ловушек определяется разностью молекулярных потоков, ударяющихся  $N_1$  и вылетающих  $N_2$  с конденсирующей поверхности:

$$S = \frac{N_1 - N_2}{n_1} = \sqrt{\frac{kT_1}{2\pi m}} \left( 1 - \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \right), \tag{4.33}$$

где  $n_1$  и  $n_2$  - молекулярные концентрации паров рабочей жидкости в газовой фазе и на конденсирующей поверхности;  $T_1$  и  $T_2$  - температуры паров рабочей жидкости в газовой фазе и на конденсирующей поверхности; m - масса молекулы рабочей жидкости, кг. При  $T_1 = 298$  К (4.33) можно преобразовать к виду:

$$S = 116\sqrt{\frac{29}{M}} \left( 1 - \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{298}{T_2}} \right),$$

где  $p_1$  и  $p_2$  - давления паров рабочей жидкости в газовой фазе и на конденсирующей поверхности; *М* - молекулярная масса рабочей жидкости, кг/кмоль. Конструкция металлических ловушек, охлаждаемых жидким азотом 1, показана на рис. 4.38,г.

Общей проблемой проектирования ловушек любого типа является выполнение двух противоречивых требований: максимального защитного действия и наибольшей удельной проводимости. Защитное действие ловушек мощно оценивать средним числом соударений молекулы, прошедшей через ловушку, с ее защитными элементами. Повышение защитного действия обычно сопровождается снижением удельной проводимости ловушки. Задаваясь весовыми коэффициентами значимости этих параметров для соответствующего технологического процесса, можно выбрать оптимальные размеры ловушки. Удельные проводимости и оптимальные соотношения размеров различных защитных элементов ловушек приведены в табл. 4.2.

Наименование	Схема	Оптимальные	Удельная проводимость
ловушки		размеры	$M^{3}/(c.cM^{2})$
Жалюзийная		D/B>5;	4,8.10 <sup>-3</sup>
		$\theta = 60^{\circ}$	
Шевронная		D/B>5;	3,16.10-3
		$\theta = 60^{\circ}$	
Коническая	45 <sup>0</sup>	$\theta = 60^{\circ}$	4,5.10-3
кольцевая			
Угловая		A=B=3R	3,27.10 <sup>-3</sup>

# ГЛАВА 5 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

### 5.1. Общая характеристика

Физико-химические методы получения вакуума позволяют в определенном диапазоне рабочих давлений создавать насосы с лучшими, чем у механических, техникоэкономическими показателями. Существенное преимущество физико-химических насосов перед механическими заключается в возможности устранения загрязнения откачиваемой камеры парами рабочих жидкостей, которые применяются для смазки и герметизации во многих механических насосах.

Направленное движение предварительно заряженных молекул газа под действием электрического поля является основой работы ионных насосов. Испарительные насосы работают на принципе хемосорбции. Физическая адсорбция и конденсация используются для откачки газов криосорбционными насосами: криоадсорбционными и криоконденсационными.



конденсации обычно меньше теплоты адсорбции, конденсация одного и того же количества газа наблюдается при более низких температурах, чем адсорбция, что делает техническую реализацию криогенной системы криоконденсационного насоса более сложной, чем криоадсорбционного. Преимуществом конденсационной откачки перед адсобционной является большая быстрота откачки на единицу площади охлаждаемой поверхности.

В связи с тем, что теплота

Принцип ионной откачки совместно с сорбционным используется в конструкциях ионно-сорбционных насосов. Диапазоны рабочих давлений промышленных и лабораторных образцов насосов, работающих на принципах физико-химической откачки, показаны на рис. 5.1.

### 5.2. Ионная откачка

Для передачи молекулам импульса скорости в направлении насоса предварительного разрежения можно использовать воздействие постоянного электрического поля, если нейтральные молекулы газа предварительно превратить в заряженные частицы. Для ионизации газа можно использовать α -, β - и γ -излучение.

Наиболее часто используется β-излучение, осуществляемое за счет электронной бомбардировки. Эффективность ионизации электронами средних энергий (см. рис. 1.19), прошедшими разность потенциалов 100 В, в зависимости от рода газа составляет от 3 до 25 пар ионов на пути 1 м при давлении 1 Па. С понижением давления наблюдается пропорциональное уменьшение количества образовавшихся ионов.

На рис. 5.2. показана схема работы ионного насоса. Газ. поступающий в насос, ионизируется в пространстве ионизации 1, а затем с помощью ускоряющих электродов 2, к которым приложена разность потенциалов Υ, направляется выходному патрубку насоса. Здесь ионы нейтрализуются и откачиваются насосом предварительного разрежения.



Рис.5.2. Схема ионной откачки

В таком насосе существует прямой поток откачиваемого газа *Q*<sub>1</sub>, определяемый ионным током I<sub>+</sub> в цепи ускоряющих электродов 2:

$$Q = k \dot{O} I_{+} / q \tag{5.1}$$

где *q* – электрический заряд иона. Обратный поток нейтральных молекул зависит от проводимости насоса *U* и разности давлений на входе *p*<sub>вх</sub> и выходе *p*<sub>вых</sub> насоса:

$$Q_{\rm ofp} = U \,(\, p_{\rm Bbix} - p_{\rm Bx}\,). \tag{5.2}$$

Производительность насоса определяется разностью прямого и обратного потоков:

$$Q_{\rm H} = Q_{\rm np} - Q_{\rm of} = k T I_+ / q - U \left( p_{\rm BMX} - p_{\rm BX} \right),$$

а быстрота действия насоса

$$S_{i} = \frac{Q_{i}}{p_{\hat{a}\tilde{o}}} = \frac{kTI_{+}}{qp_{\hat{a}\tilde{o}}} - U\left(\frac{p_{\hat{a}\hat{a}\tilde{o}}}{p_{\hat{a}\tilde{o}}} - 1\right).$$
(5.3)

При  $\hat{E} = p_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} / p_{\hat{a}\hat{o}} = 1$  быстрота действия насоса максимальна:

$$S_{\max} = \frac{kTI_+}{qp_{\hat{a}\hat{o}}}.$$

При *S*<sub>н</sub> = 0 максимален коэффициент компрессии:

$$\hat{E}_{max} = 1 + \frac{S_{max}}{U} \,.$$

Таким образом, уравнение (5.3) можно записать еще в таком виде:

$$S_{i} = S_{\max} - U(\hat{E} - 1).$$
(5.4)

Откачная характеристика (5.4) аналогична откачной характеристике молекулярного насоса (рис. 4.21). Однако из-за трудности обеспечения эффективной ионизации газа при низких давлениях и малой проводимости насоса для обратного потока газа удельные энергетические затраты на единицу быстроты откачки ионных насосов пока еще слишком велики, что препятствует их промышленному применению.

## 5.3. Хемосорбционная откачка

Хемосорбционная откачка осуществляется путем поглощения активных газов на поверхности металлов. Показателем активности газа является его теплота адсорбции на данном металле. Наибольшее распространение для хемосорбционной откачки получили следующие металлы: Тi, Zr, Ta, Ba, Mo, W, Hf, Er.

Теплота адсорбции Q<sub>a</sub> при малых степенях заполнения поверхности сильно зависит от рода газа; например, для Ті, поглощающего все газы, кроме Не, Ne и CH<sub>4</sub>, имеем:

Газ	$\mathrm{H}_{2}$	CO	$N_2$	$O_2$	$\mathrm{CO}_2$	Аг	Кг	Xe
Q <sub>a</sub> , кДж/моль	19,3	419	356	813	461	8,38	16,8	33,5

Для увеличения поверхности металла, взаимодействующей с откачиваемыми газами, используется его нанесение в виде тонких пленок на электроды или корпус насоса. Возможность непрерывного обновления напыленной пленки увеличивает срок службы насоса.

Напыление происходит при давлениях паров вещества, больших давления насыщенного пара над поверхностью напыления, когда на единице поверхности в единицу времени конденсируется большее число молекул, чем испаряется. Скорость конденсации из газовой фазы можно рассчитать по уравнениям (1.47) и (1.49).

Рассмотрим особенности процесса конденсации молекул, испаряемых из бесконечно малых источников на плоскую подложку в высоком вакууме. Скорость конденсации при этом

$$dG_{\kappa} = G_{\mu}dP.$$

Если молекула испаряется из точечного источника, то dP определяется согласно (1.36)

$$dP = d\omega/4\pi, \qquad \qquad d\omega = dS \cos \gamma/R^2,$$

где *R* – расстояние от источника до площадки *dS* на подложке (рис. 5.3, а). При этом выражение для скорости конденсации

$$dG_{eR} = G_{e} dP = G_{e} \cos \gamma dS / (4\pi R^{2}).$$

Поток молекул, попадающих на площадку *dS*, расположенную на кратчайшем расстоянии *l* от источника,

$$dG_{\ell l} = G_{\ell} dS / (4\pi l^2).$$
(5.5)

Тогда отношение толщин пленок конденсата, нанесенных за одинаковый промежуток времени на участки поверхности, отстоящие от источника на *l* и *R*,

$$\frac{h_l}{h_R} = \frac{dG_{el}}{dG_{eR}} = \frac{R^2}{l^2 \cos\gamma} = \frac{R^3}{l^3} = \left[1 + \left(\frac{\rho}{l}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}, \quad (5.6)$$



Рис. 5.3. Схема процесса напыления на плоскую поверхность из различных источников: а - точечного, б - плоского

Из (5.6) следует, что при  $\rho = l$ толщины слоев конденсата в центре и на краю подложки будут отличаться в 2,8 раза. Для допускаемой неравномерности толщины покрытия, равной 5%, минимальное расстояние между источником и подложкой должно быть 3,6  $\rho$ .

При конденсация молекул, вылетающих из бесконечно малого плоского источника *O* (рис. 5.3, б),

вероятность вылета определяется из (1.37). Тогда, аналогично (5.5) и (5.6), получим

$$dG_{\kappa l} = G_{\mu} dS / (\pi l^2); \ dG_{\kappa R} = G_{\mu} \cos^2 \gamma dS / (\pi R^2).$$

Отношение толщин конденсата при нанесении из плоского источника

$$h_l/h_R = R^4/l^4 = \left[1 + \left(\rho/l\right)^2\right]^2.$$
 (5.7)

При  $\rho = l$  толщины пленки в центре и на краю подложки будут отличаться в четыре раза. При получении пленки с неравномерностью толщины 5% необходимо располагать подложку на расстоянии 6,3 $\rho$  от источника. Плоский источник дает большую, чем точечный, скорость нанесения покрытия (в четыре раза при  $\gamma = 0$ ), но неравномерность покрытия при этом возрастает. Неравнотолщинные покрытия, равнодоступные молекулам откачиваемого газа, хуже используют запас активного вещества в насосе.

Быстрота поглощения газа пленкой  $S_0$  зависит от ее материала, рода газа и температуры пленки. Для 1 см<sup>2</sup> титановой периодически напыляемой пленки  $S_0$  для H<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> при 77 К соответственно равны 26 · 10<sup>-3</sup> и 7 · 10<sup>-3</sup>, а при 293 К – 15 · 10<sup>-3</sup> и 1 · 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup> /(с · см<sup>2</sup>).

Поглощение газов пленками может носить поверхностный или объемный характер. При поверхностном поглощении для небольших степеней покрытия количество сорбированного газа прямо пропорционально времени сорбции. Объемное поглощение

происходит за счет диффузии газов в пленку, и количество поглощенного газа на начальном участке сорбционной кривой пропорционально корню квадратному из времени сорбции.

Поверхностный характер сорбции наблюдается обычно при низких температурах, объемный - при высоких. Титановая пленка при температурах выше 150 К водород поглощает объемно. Коэффициент диффузии водорода при температуре 220 К составляет  $10^{-15}$  см<sup>2</sup>/с, а при 300 К - 2 ·  $10^{-11}$  см<sup>2</sup>/с.

При поверхностном поглощении водорода на титановых пленках при T>77 К за счет каталитических реакций со свободным углеродом, растворенным в пленке, происходит образование и выделение метана CH<sub>4</sub>.

Такие газы, как N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO и CO<sub>2</sub>, начинают поглощаться объемно титаном только при температурах более 1000 К. Поглощение воды сопровождается выделением водорода.

Сорбционные характеристики пленок сильно зависят от условий их образования. Пленка, осажденная при низкой температуре, имеет пористую структуру, что приводит к значительному повышению скоростей поглощения газов.

## 5.4. Конструкции испарительных насосов

Конструкция испарительного насоса в основном определяется типом испарителя. Испарители бывают прямоканальные, подогревные, электронно-лучевые и дуговые. В качестве прямонакального испарителя (рис. 5.4, а) используется биметаллическая проволока с молибденовым керном, на который иодидным способом осажден слой титана.

Подогревный испаритель (рис. 5.4, б) представляет собой сферическую оболочку из активного материала, внутри которой вставлен проволочный нагреватель. Для титана максимальная рабочая температура таких испарителей составляет 1150<sup>0</sup> С, что обеспечивает максимальную скорость испарения 1 мг/с.



Рис.5.4. Конструкции электротермических испарителей: а -прямонакальный, б - подогревный

Электронно-лучевой испаритель (рис. 5.5, а) представляет собой электронную пушку с вольфрамовым катодом 1, помещенную в поперечное магнитное поле. Магнитное поле позволяет разместить пушку вне зоны нанесения активного материала. Между пушкой и мишенью прикладывается ускоряющее напряжение в несколько тысяч вольт. Максимальная скорость испарения из жидкой фазы может достигать 30 мг/с.

В дуговых испарителях (рис. 5.5, б) активный материал распыляется в катодном пятне дуги постоянного тока. Катодное пятно хаотически перемещается по поверхности охлаждаемого водой катода из титана. Плотность тока в пятне достигает  $10^6$  A/cm<sup>2</sup>. Дуга горит в парах испаряемого материала, что позволяет поддерживать разряд даже в условиях сверхвысокого вакуума. Возбуждение дуги происходит, например, при коротком замыкании подвижного электрода. Питание дуги осуществляется от источника постоянного тока с U=30..50 В и I=100..180 А. Максимальное давление запуска не превышает 10 Па. При больших давлениях анодное пятно становится неподвижным и может расплавить стенку насоса. Скорость испарения в дуговых испарителях может достигать 20 мг/с.



Рис.5.5. Конструкции электронно-ионных испарителей: а - электронно-лучевой, б - дуговой.

Рис.5.6. Испарительный насос

В насосах испарительного типа, не имеющих устройств для ионной откачки, предельное давление составляет обычно  $10^{-7}$  Па. Охлаждение активной пленки до температуры жидкого азота снижает предельное давление до  $10^{-11}$  Па. Верхний предел рабочих давлений, равный  $10^{-2}$  Па, лимитируется образованием во время работы испарителя оксидов, нитридов и карбидов на поверхности активного материала, что приводит к уменьшению скорости испарения. Максимальная быстрота действия насосов такого типа при откачке водорода достигает  $2.10^5$  л/с. Применение испарительных насосов неэффективно при откачке продуктов органического происхождения и инертных газов.

Испарительный насос (рис. 5.6) состоит из корпуса 4, в котором размещается испаритель 5. Атомы активного металла, вылетающие из испарителя, конденсируются на экранах 2 и обеспечивают откачку химически активных газов. Экран 3 защищает откачиваемый объект, присоединяемый к насосу через фланец 1, от проникновения паров испаряемого материала. Экраны 2 для повышения быстроты откачки могут охлаждаться жидким азотом.

## 5.5. Криоконденсационная откачка

Криоконденсационная откачка - это удаление газов из вакуумной системы за счет их конденсации на охлажденных поверхностях насоса. Скорость конденсации на единице поверхности согласно (1.47) можно определить выражением

$$G_{\hat{e}} = \gamma_{1} p_{\tilde{a}} \sqrt{\frac{\dot{I}}{2\pi R T_{\tilde{a}}}},$$

где  $p_{\Gamma}$  и  $T_{\Gamma}$  – давление и температура газа, а  $\gamma_1$  - вероятность конденсации(1.46) газа на свободной поверхности, имеющей температуру  $T_{\Pi}$  Воспользуемся выражением(1.48) для скорости испарения

$$G_{e} = \gamma_2 p_{b} \sqrt{\frac{\dot{I}}{2\pi R \dot{O}_{i}}}$$

где  $p_{\rm T}$  – давление насыщенных паров адсорбата при температуре поверхности  $T_{\rm n}$ ,  $\gamma_2$  – вероятность конденсации при  $T_{\rm r} = T_{\rm n}$ . Принимая во внимание, что плотность газа  $\rho = p_{\rm r} M/(RT_{\rm r})$ , запишем выражение для быстроты конденсационной откачки:

$$\mathbf{S}_{\kappa} = \frac{\beta}{\rho} \left( \mathbf{G}_{\kappa} - \mathbf{G}_{\mu} \right) = 36,4\beta \sqrt{\frac{\mathbf{T}_{r}}{\mathbf{M}}} \left( \gamma_{1} - \gamma_{2} \frac{\mathbf{p}_{T}}{\mathbf{p}_{r}} \sqrt{\frac{\mathbf{T}_{r}}{\mathbf{T}_{n}}} \right), \tag{5.8}$$

где β – коэффициент, учитывающий входное сопротивление.

Криоконденсационная откачка возможна при условии, что давление откачиваемого газа в вакуумной системе выше давления его насыщенных паров в насосе. Используя зависимость (1.44) давления насыщенного пара вещества от температуры в виде  $\ln p = \hat{I} - N / \hat{O}_{i}$ , где M и N – постоянные коэффициенты, после преобразований получим

$$S_{\hat{e}} = 36,4\beta_{\gamma} \sqrt{\frac{\dot{O}_{\tilde{a}}}{\dot{l}}} \left( \gamma_{1} - \frac{\gamma_{2} \exp(\dot{l} - N/\dot{O}_{\tilde{i}})}{p_{\tilde{a}}} \sqrt{\frac{\dot{O}_{\tilde{a}}}{\dot{O}_{\tilde{i}}}} \right),$$
(5.9)

При  $p_{\tilde{a}} >> p_{\tilde{i}}$  наблюдается максимальная быстрота действия криоконденсационного насоса, равная скорости конденсации. При  $\beta = \gamma_1 = \gamma_2 = 1$ 

$$S_{max} = 36.4 \sqrt{\dot{O}_{\tilde{a}} / \dot{I}}, \qquad (5.10)$$

где величина  $S_{\text{max}} [\text{м}^3/(\text{c} \cdot \text{м}^2)]$  в зависимости от температуры и рода газа имеет следующие значения: при T=293 и 78 К соответственно для N<sub>2</sub> – 118 и 61; для O<sub>2</sub> – 110 и 57; для Ne – 139 и 72; для H<sub>2</sub>– 442 и 228).



Рис.5.7. Удельная быстрота откачки азота в зависимости от температуры поверхности при давлениях: 1 -  $10^{-10}$  Па, 2 -  $10^{-6}$  Па, 3 -  $10^{-4}$  Па, 4 -  $10^{-1}$  Па



Рис.5.8. Предельное давление криоконденсационного насоса в зависимости от времени работы для  $T_r = T_n$ ,  $A = 0,01 \text{ м}^2$ ,  $Q = 10^{-1} \text{ м}^3 \Pi \text{a/c:} 1 - 35 \text{ K}$ , 2 - 30 K, 3 - 25 K, 4 - 20 K

На рис. 5.7 приведена удельная быстрота откачки азота, имеющего температуру 293 К, при  $\beta = \gamma = 1$  в зависимости от давления и температуры криоповерхности в соответствии с (5.9). Предельное давление криоконденсационной откачки зависит от температуры поверхности, на которой происходит конденсация откачиваемого газа. При  $S_{e} = 0, \gamma_{1} = \gamma_{2}, p_{\bar{a}} = p_{r, \delta}$  воспользуемся уравнением (5.9) для определения предельного давления :

$$p_{\tau \delta} = \sqrt{\dot{O}_{\rm a}} / \dot{O}_{\rm r} \exp(M - N / T_{\rm r}).$$
(5.11)

При работе насоса происходит образование криоосадка на конденсирующей поверхности. Толщина криоосадка

$$h = \frac{t(G_{\hat{e}} - G_{\hat{e}})}{A\rho_{\hat{o}}}$$

где *t* – время работы насоса; *A* – площадь конденсирующей поверхности;  $\rho_{\delta}$  –плотность газов в твердом состоянии

Газ	$N_2$	$H_2$	$\mathrm{CH}_4$	Аг	Кг	Ne
$ρ_{\rm T}$ , κγ/m <sup>3</sup>	950	80	520	1690	2960	1440

При откачке азота с производительностью  $10^{-2}$  м<sup>3</sup> Па / с на площади 0,1 м<sup>2</sup> за  $10^{6}$  с образуется слой конденсата толщиной 1,5 мм.

Тепловой поток на поверхность криоосадка приводит к появлению градиента температуры в конденсированном слое

$$q = \lambda \frac{\dot{O}_i - \dot{O}_{\hat{e}}}{h};$$

здесь *q* – удельный тепловой поток на поверхности криоосадка; *T*<sub>к</sub> и *T*<sub>п</sub> – температуры криоагента и внешней поверхности криоосадка; λ-коэффициент теплопроводности криоосадка:

Γa3 N<sub>2</sub> H<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> Ar Kr Ne  
λ, Bt/(M·κ) 
$$10^{-1}$$
 1  $8 \cdot 10^{-2}$  2 2 1

Решая уравнение теплового баланса относительно Т<sub>п</sub>, получим

$$\dot{O}_{i} = \dot{O}_{\hat{e}} + qh/\lambda$$
.

Для  $q = 50 \text{ Bt/m}^2$  после образования криоосадка азота толщиной 1,5 мм превышение температуры криоповерхности над температурой криоагента составит 0,75 К.

Подставляя выражение для Т<sub>п</sub> в (5.11), получим

$$p_{i\delta} = \sqrt{\frac{\dot{O}_{a}}{\dot{O}_{e} + qh/\lambda}} \exp\left(\dot{I} - \frac{N\lambda}{\dot{O}_{e}\lambda + qh}\right).$$
(5.12)

Таким образом, предельное давление насоса ухудшается с ростом толщины криоосадка. На рис. 5.8 показаны зависимости предельного давления от времени работы насоса, рассчитанные по уравнению (5.12).

## 5.6. Криоадсорбционная откачка

Криоадсорбционная откачка осуществляется адсорбцией газов на охлаждаемых адсорбентах. Равновесное давление откачиваемых газов определяется изотермами адсорбции, устанавливающими связь между количеством поглощенного газа и давлением при постоянной температуре. Количество адсорбированного газа должно составлять значительную часть газа в объеме вакуумной системы, что обычно наблюдается при температурах адсорбирующих поверхностей ниже температуры кипения газа при атмосферном давлении.

Уравнение материального баланса криоадсорбционной откачки неподвижным адсорбентом можно записать в виде равенства количества газа в адсорбционной и газовой фазах до и после процесса откачки:

$$p_0 \upsilon + K_{T1} p_0 + \int_0^t q_1 dt = p_1 \upsilon \frac{T_1}{T_2} + K_{T2} p_1, \qquad (5.13)$$

где  $p_0$  и  $p_1$  – начальное и конечное давления;  $\upsilon = V_{\kappa}/V_a$  – объемная нагрузка насоса;  $V_{\kappa}$  – объем откачиваемой камеры;  $V_a$  – объем адсорбента в насосе;  $q_1$  – газовыделение и натекание на единицу объема адсорбента,  $T_1$  и  $T_2$  – начальная и конечная температура адсорбента в насосе,  $T_2 < T_1$ ;  $K_{T1}$  и  $K_{T2}$  – коэффициенты адсорбируемости газа при температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

Если  $q_1$  = const, тогда

$$p_1 = \frac{p_0(\upsilon + K_{T1}) + q_1 t}{\upsilon T_1 / T_2 + K_{T2}},$$
(5.14)

Если  $\int_{0}^{t} q dt \ll p_0 \upsilon + K_{T1} p_0$ , тогда

$$p_1 = p_0 \frac{\upsilon + K_{T1}}{\upsilon T_1 / T_2 + K_{T2}}.$$
(5.15)

Для обычных вакуумных систем ( $V_{\rm K} = 50$ л;  $V_{\rm a} = 1$ л)  $\upsilon \approx 50$ . При откачке азота от атмосферного давления активным углем СКТ-2 при  $T_1 = 293$  К,  $K_{293} = 10^2$  и при  $T_2 = 77$  К,  $K_{77} = 10^8$  (табл. 5. 1) получим, согласно (5.15),  $p_1 = 1,5 \cdot 10^{-1}$  Па. Таким образом, давление снижается почти в  $10^6$  раз.

Подбирая температуру десорбции, можно обеспечить, чтобы  $\hat{E}_{\rm dl}$  <<  $\upsilon$  <<  $\hat{E}_{\rm d2}$ , тогда

$$p_1 \approx p_0 \frac{\upsilon}{\hat{E}_{\delta 2}},\tag{5.16}$$

Таблица 5.1.

	_	-					
Адсорбент	Кт		Н,		a,		Примечание
			2		2		
			м <sup>2</sup> /с		м <sup>2</sup> /с		
		1		T		n	
	77К	298К	77К	298К	298К	77К	
Активный уголь	$10^{8}$	$10^{2}$	10 <sup>-11</sup>	10-9	10 <sup>-8</sup>	10-8	
5							
CKT-2							
Цеолит Са А-4В	$10^{8}$	$10^{3}$	$10^{-10}$	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>	10-8	
1	_	_	_	_	_	_	
Силикагель КСМ-6	$10^{7}$	$10^{2}$	$10^{-11}$	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-7</sup>	10-7	$p=10^{-1}10^{-5}$
	10	10	10	10	10	10	P 100
							Па
Алюмосиликатный	$10^{7}$	$10^{2}$	$10^{-11}$	$10^{-9}$	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>	
	10	10	10	10	10	10	
катализатор АС							
Kurumsurop ne							

Характеристики адсорбентов при поглощении азота.

Если к откачиваемому объекту параллельно подключено n адсорбционных насосов, для каждого из которых и для всех вместе выполняются условия, указанные для уравнения (5.16), то многоступенчатая (*n*-число ступеней) откачка, при которой последовательно запускается и после достижения предельного давления перекрывается клапаном каждый из насосов, обеспечит конечное давление

$$p_n = p_0 \left(\frac{v}{K_{T2}}\right)^n.$$

Для n = 2,  $\upsilon = 50$  и  $p_0 = 10^5$  Па при откачке азота  $K_{77} = 10^8$  получим для  $p_n$  значение 2.5 · 10<sup>-8</sup> Па.

При температуре жидкого азота коэффициенты адсорбируемости гелия, неона и водорода, представленные в табл. 5.2, значительно меньше, чем для азота. При одноступенчатой откачке этих газов не удается достичь заметного снижения давления. При откачке атмосферного воздуха происходит обогащение остаточных газов плохо адсорбируемыми компонентами: гелием, неоном и водородом, которые ограничивают возможность снижения предельного давления насоса. Для эффективной адсорбционной откачки всех газов, входящих в состав атмосферного воздуха, требуются температуры ~30..20 К.

Быстрота адсорбционной откачки определяется процессом нестационарной диффузии газа в пористой структуре адсорбента. Диффузия идет как в газовой фазе, так и по поверхности пор.

Таблица 5.2

# Коэффициенты адсорбируемости различных газов на активном угле при температуре жидкого азота.

Коэффициент	He	Ne	$H_2$	$N_2$	Примечание
К <sub>77</sub> ,	2	20	1600	10 <sup>8</sup>	р=10 <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> Па
(м <sup>3</sup> ·Па)/м <sup>3</sup> ·Па					

Рассмотрим поглощение газа в адсорбционном слое при постоянном натекании. Процесс стационарной диффузии в объеме и по поверхности адсорбента запишем в виде дифференциального уравнения

$$q = -D_{\tilde{a}}\frac{dp}{dx} - D_{\tilde{i}}\frac{da}{dx},$$

где q – газовый поток через единицу поверхности адсорбционного слоя, м<sup>3</sup>Па/(с.м<sup>2</sup>);  $D_{\Gamma}$  – коэффициент диффузии в газовой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $D_{\Pi}$  – коэффициент поверхностной диффузии, м<sup>2</sup>/с; a – количество поглощенного вещества в единице объема адсорбционного слоя, м<sup>3</sup>Па/м<sup>3</sup>. Предположим, что справедлив закон Генри для адсорбции, т.е.  $a = \Gamma p$ , где  $\Gamma$  – коэффициент адсорбируемости. При выбранных размерностях для a и p коэффициент  $\Gamma$  безразмерен. Тогда можно записать

$$q = -D_c \frac{dp}{dx},$$

где  $D_{\rm c}$  – стационарный коэффициент диффузии,  $D_{\rm c} = D_{\rm r} + \Gamma D_{\rm n}$ .

Для нестационарной диффузии газа в объеме и по поверхности пор адсорбента справедливо дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial s}{\partial t} = (D_{\tilde{a}} + \tilde{A}D_{\tilde{r}}) \cdot \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{k_1}{x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}\right),$$

где  $s = a + p = p(1+\Gamma)$ .

Таким образом, можно записать

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D_c \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{k_1}{x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right), \tag{5.17}$$

при граничных условиях:

$$p(x,0) = 0, \quad \frac{\partial p(0,t)}{\partial x} = 0, \quad -D_c \frac{\partial p(R,t)}{\partial x} = k_2 R Q_V ,$$

где x – текущая координата по сечению адсорбционного слоя, м;  $D_{\rm H}$  – коэффициент нестационарной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$$D_i = \frac{D_{\tilde{n}}}{1 + \tilde{A}}.$$

*R* – характерный размер слоя адсорбента,м; *k*<sub>1</sub> и *k*<sub>2</sub> – коэффициенты формы (см. таблицу
5.3); *Q<sub>V</sub>* – удельная газовая нагрузка, м<sup>3</sup>Па/(с.м<sup>3</sup>).

Решение уравнения 5.17 с заданными граничными условиями имеет вид:

$$p(R,T) = p_0 + \frac{Q_V R^2}{D_c} \left[ k_3 F o + k_4 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_5}{\mu_n^2} exp(-\mu_n^2 F o) \right],$$
(5.18)

где  $p_0$  – предельное давление, которое установится в насосе после захолаживания адсорбента при отсутствии газовой нагрузки, *Fo* –безразмерное время,  $Fo = \frac{D_i t}{R^2}$ ;  $\mu_n$  - корни характеристических уравнений: tg $\mu$  = 0 - для неограниченной пластины,  $I_1(\mu)$ =0 – для неограниченного цилиндра, tg $\mu$  =  $\mu$  - для шара.

Количество газа, поглощенного в единице объема адсорбционного слоя

$$Q_{V} = \frac{S \cdot p(R,t)}{V_{a}},$$

где  $V_a$  – объем адсорбционного слоя, м<sup>3</sup>; S – быстрота действия насоса, м<sup>3</sup>/с. Из (5.18) можно определить безразмерную быстроту действия адсорбционного слоя в виде.

$$\Theta = \frac{S \cdot R^2}{D_c \cdot V_a} = \Theta_m \left( 1 - \frac{p_0}{p(R,t)} \right), \tag{5.19}$$

где  $\Theta_{\rm m}$  – максимальная безразмерная быстрота откачки единицы объема адсорбционного слоя (рис.5.9).



Рис.5.9. Зависимость максимальной удельной быстроты действия адсорбционного слоя от безразмерного времени: 1 – неограниченная пластина, 2 – неограниченный цилиндр, 3 - шар

$$\Theta_{m} = \frac{1}{k_{3}Fo + k_{4} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{5}}{\mu_{n}^{2}} exp(-\mu_{n}^{2}Fo)}$$

(5.20)

Анализ уравнения (5.20) показывает, что для Fo<0,42; Fo<0,27; Fo<0,19 соответственно для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара уравнение (5.20) можно преобразовать к виду

211
$$\Theta_m = \frac{1}{2k_6\sqrt{\frac{Fo}{\pi}}}$$

Коэффициенты формы

Таблица 5.3

Форма адсорбционного слоя	Коэффициенты формы					
	$k_1$	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	<b>k</b> <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>
Неограниченная пластина	0	1	1	1/3	2	1
Неограниченный цилиндр	1	2/π	4/π	$1/2\pi$	4/π	2(1+0,44√Fo+0,17Fo+)/π
Шар	2	$2/\pi$	6/π	$2/5\pi$	$4/\pi$	2(1+0,89√Fo+Fo+)/π

Для Fo ≥ 0,42; Fo ≥ 0,27; Fo ≥ 0,19 соответственно для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара уравнение (5.20) можно преобразовать к виду

$$\Theta_m = \frac{1}{k_3 F o + k_4}.$$

Удельная быстрота адсорбционной откачки в 5..10 раз меньше, чем конденсационной, и имеет более сильную зависимость от количества поглощенного газа.

Непрерывная регенерация адсорбента во время работы насоса реализуется в адсорбционных насосах непрерывного действия, обеспечивающих постоянную быстроту действия независимо от продолжительности работы насоса.

Количество поглощаемого и десорбированного газов в неравновесном состоянии определяется решением нестационарного уравнения адсорбции аналогичного (5.17) при начальных и граничных условиях:  $a(0,x) = a_0$ ;  $a(t,R) = a_R$ ;  $\partial a(t,0) / \partial x = 0$ . При адсорбции  $a_R = a_m$ , при десорбции  $a_R = a_0$ . Безразмерное время  $\tau = D_c t/R_a^2$ , где  $R_a$ -характерный размер гранулы адсорбента.

Решение уравнения адсорбции при указанных граничных условиях можно представить в следующем виде:

$$a = \left(a_{R} - a_{0}\left(1 - \frac{6}{\pi^{2}}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k^{2}}\exp\left(-k^{2}\pi^{2}\tau\right)\right) = \left(a_{R} - a_{0}\right)v.$$

При малых  $\tau < 2.10^{-2}$  степень заполнения адсорбента

$$v = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp\left(-k^2 \pi^2 \tau\right) = 6\sqrt{\tau/\pi} .$$

Быстрота непрерывной адсорбционной откачки

$$S_{i} = \nu S_{max} \left( 1 - \frac{\hat{E}_{T1} p_{2}}{\hat{E}_{T2} p_{1}} \right), \tag{5.21}$$

где  $S_{max} = \upsilon_{e} F K_{T2}$  – максимальная быстрота откачки;  $\upsilon_{\pi}$  – скорость транспортирования адсорбента; *F* – площадь поперечного сечения адсорбционного слоя. Для  $\upsilon_{e} = 0,1$  см/с, *F*=1 см<sup>2</sup>,  $K_{T2} = 10^7$  получим Smax =  $10^3$  л/с.



Рис.5.10. Быстрота действия адсорбционного насоса непрерывного действия при различной скорости транспортирования адсорбента

Так как предельное давление  $p_{i \ \delta} = p_1$ при  $S_i = 0$ , из уравнения (5.21) запишем

$$p_{i\,\delta} = p_2 \frac{\hat{E}_{T1}}{\hat{E}_{T2}},$$

что для угля СКТ-2Б при  $K_{r1} = 10^2$ ,  $K_{r2} = 10^7$ дает величину  $p_{i \ \delta} = 10^{-5} p_2$ . Характерная зависимость  $S_i = f(v_i)$  для насосов непрерывного действия представлена на рис. 5.10.

В первом режиме при малых скоростях транспортирования (v =1) до тех пор, пока  $\tau \ge 0,4,$  что соответствует

$$\upsilon_{a} \leq D_c l_a / (0, 4R_a^2),$$

где  $l_a$  – длина камеры адсорбции;  $R_a$  – характерный размер гранулы адсорбента. Быстрота откачки  $S_{\rm H} = S_{\rm max}$  в этом режиме пропорциональна  $\upsilon_{\rm e}$ . Во втором режиме при средних скоростях транспортирования, адсорбент не успевает насыщаться откачиваемым газом (v < 1), и быстрота действия насоса пропорциональна  $\sqrt{\upsilon_{e}}$ 

$$S_{\mu} = \frac{3,4FK_{T2}}{R_a} \sqrt{D_c l_a v_{\pi}} \left( 1 - \frac{K_{T1} p_2}{K_{T2} p_1} \right).$$

Третий режим работы насоса при больших скоростях транспортирования начинается со скорости, определяемой коэффициентом температуропроводности адсорбента a и безразмерным временем охлаждения  $F_{ox} = 0.8$ :

$$\upsilon_{n2} = al_{ox} = \left(R_{cn}^2 \cdot 0, 8\right),$$

где  $l_{0x}$  - длина камеры охлаждения;  $R_{cn}$  - характерный размер слоя. При скоростях транспортирования, больших  $\upsilon_{\ddot{e}2}$ , адсорбент не успевает охлаждаться и быстрота откачки насоса резко падает. Таким образом,  $\upsilon_{\ddot{e}2}$  является оптимальной скоростью

транспортирования адсорбента в насосе, обеспечивающей получение максимальной быстроты откачки .

# 5.7. Конструкции криогенных насосов

Рассмотрим основные варианты конструкций криогенных насосов. Для работы в низком вакууме используются насосы погружного типа (рис. 5.11, а), а для работы в высоком вакууме - заливного типа (рис. 5.11, б). Адсорбент 1 для предотвращения загрязнения и улучшения условий охлаждения помещается внутри пористого металлического фильтра 2. Нагреватель 3 служит для регенерации адсорбента после его насыщения откачиваемым газом. Разница в конструкции насосов погружного и заливного типов состоит в том, что сосуд Дьюара 4 для размещения криоагената 5 в насосах погружного типа выполняется съемным, а в насосах заливного типа в качестве теплоизоляции между стенками насоса и сосудом с криоагентом используется вакуум, создаваемый самим насосом. В качестве криоагентов используются сжиженные газы (Табл. 5.4)

Схемы криоадсорбционных насосов с неподвижным адсорбентом конструктивно просты, но требуют дополнительной арматуры и дублирования откачных средств для обеспечения непрерывного процесса откачки, имеют высокие эксплуатационные расходы криоагента и электроэнергии на изменение температуры не только самого адсорбента, но и корпуса насоса. Характеристики промышленных адсорбционных насосов приведены в табл. П.8.

Таблица 5.4.

Параметры	N <sub>2</sub>	Ne	H <sub>2</sub>	Не
Температура кипения при атмосферном давлении, К	77,3	27,2	20,4	4,2
Плотность в жидком состоянии г/см <sup>3</sup>	0,81	1,18	0,07	0,13
Теплота парообразования, кДж/л	162	102	31,7	2,7
Скорость испарения при тепловой нагрузке 1 Вт, л/ч	0,021	0,035	0,16	1,4

Свойства сжиженных газов.



Рис.5.11. Конструктивные схемы адсорбционных насосов

Схема криоадсорбционного насоса с движущимся адсорбентом (рис. 5.11, в) обеспечивает постоянство быстроты откачки и предельного давления независимо от времени работы насоса. Адсорбент движется по замкнутому контуру с линейной скоростью  $v_{\pi}$  проходя на своем пути камеру адсорбции 1, шлюз 2, нагреватель 5, камеру десорбции 4, шлюз 3, холодильник 6 и вновь попадает в камеру адсорбции.

Криоконденсационные насосы заливного типа имеют конструктивную схему рис. 5.11, г. В полость 2 заливается низкотемпературный криоагент (жидкий гелий или водород), а в полость 3 – высокотемпературный криоагент (жидкий азот). Экраны 1 защищают поверхность сосуда низкотемпературным криоагентом от излучения стенок насоса, не препятствуя проникновению откачиваемого газа к охлажденной поверхности. Очень часто в криоконденсационных насосах используется адсорбционный способ поглощения неконденсирующихся газов, для чего поверхность сосуда с низкотемпературным криоагентом покрывается адсорбентом в виде пористой оксидной пленки (или в процессе работы насоса на ней осаждается пористый слой хорошо конденсируемых газов).

Криоконденсационные насосы испарительного типа (рис. 5.11, д) имеют криопанели в виде змеевиков, по которым циркулируют пары криоагента, испаряющегося из сосуда Дьюара. Циркуляция может осуществляться за счет создания избыточного давления в сосуде Дьюара или всасывающего действия механического вакуумного насоса. Испаряющийся в криопанели 1 криоагент используется для охлаждения внешнего экрана 2, защищающего криопанель от излучения стенок насоса.

Криосорбционные насосы могут снабжаться автономными криогенераторами (рис. 5.11, е), в которых криопанель 1 охлаждается от автономной газовой машины 2, а экран 3 служит для уменьшения притока теплоты к криопанели.

Для откачки широко применяются адсорбенты с большой площадью внутренней поверхности активные угли, цеолиты, силикагели.

Активные угли – пористые углеродные адсорбенты, которые получают из торфа, каменного угля, опилок и других видов органического сырья путем термической обработки без доступа воздуха для удаления воды и смол с последующей активацией окислением при температуре около  $900^0$  С в присутствии CO<sub>2</sub>. Так как поверхность углерода электронейтральна, то адсорбция на углях в основном определяется дисперсионными силами взаимодействия. Активные угли имеют поры различных размеров. Площадь поверхности активных углей при насыпной плотности 0,5 г/см<sup>3</sup> может достигать 2000 м<sup>2</sup>/г.

Цеолиты – это алюмосиликаты, содержащие в своем составе SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, окислы щелочных и щелочноземельных металлов, а также молекулы кристаллической воды. После удаления кристаллической воды термообработкой при 400 ..  $500^{0}$  С в различных типах цеолитов появляется регулярная структура пор размером от 30 до 90 нм. Поверхность цеолитов полярна, и адсорбция во многом зависит от ориентационного эффекта взаимодействия. Цеолиты бывают природные и синтетические, получаемые кристаллизацией исходных компонентов из раствора при температуре  $100^{0}$  С. Активная поверхность цеолитов может достигать 1000 м<sup>2</sup>/г при насыпной плотности 0,7 г/см<sup>3</sup>.

Силикагель – аморфная форма гидратированного кремнезема (SiO<sub>2</sub>nH<sub>2</sub>O), получаемого при взаимодействии силикатов щелочных металлов и минеральных кислот. При высушивании гидрогеля кремниевой кислоты образуется – структурная сетка из сферических частиц, поверхность пор в которой может достигать 500 м<sup>2</sup> /г при насыпной плотности 0,7 г/см<sup>3</sup>. Размеры пор изменяются от 100 до 700 нм в зависимости от режимов обработки. Технические характеристики криоадсорбционных насосов представлены в табл. П. 10.

# 5.8. Ионно-сорбционная откачка

Ионно-сорбционная откачка использует два способа поглощения газа: внедрение ионов в объем твердого тела под действием электрического поля и химическое взаимодействие откачиваемых газов с тонкими пленками активных металлов. Высокоэнергетические ионы или нейтральные частицы, бомбардируя твердое тело, проникают в него на глубину, достаточную для их растворения. Этот способ удаления газа является разновидностью ионной откачки. На рис. 5.12 показано равновесное распределение концентрации при ионной откачке в объеме неограниченной пластины толщиной 2R, расположенной внутри вакуумной камеры. Максимальную удельную геометрическую быстроту ионной откачки можно рассчитать по формуле

$$S_{a} = \mu N_{+} / n = \mu i_{+} / (nq),$$
 (5.22)

где  $\mu$  – коэффициент внедрения ионов;  $N_{+} = i_{+}/q$  – удельная частота бомбардировки;  $i_{+}$  – плотность ионного тока; q – элементарный электрический заряд; n – молекулярная концентрация газа. Коэффициент

внедрения учитывает частичное отражение И рассеивание, при возникающие ионной бомбардировке. Коэффициент внедрения сильно зависит OT температуры тела и слабо – OT плотности тока И ускоряющего напряжения. Значение  $\mu \rightarrow 1$ Zr наблюдается Ti, для при 300 .. 500 K.

Максимальное значение концентрации растворенного газа при



Рис.5.12. Установившееся распределение концентрации в неограниченной пластине, бомбардируемой ионами

ионной откачке можно определить из условия равновесия газовых потоков

$$\mu N_{+} = N_{I} + N_{2}, \qquad (5.23)$$

$$N_{I} = D \left(\frac{ds}{dx}\right)_{I}; \qquad N_{2} = D \left(\frac{ds}{dx}\right)_{2}$$

*D* – коэффициент диффузии газа в твердом теле). Градиенты концентраций определяются следующими соотношениями:

$$\left(\frac{ds}{dx}\right)_1 = \frac{s_{max} - s_0}{h}; \quad \left(\frac{ds}{dx}\right)_2 = \frac{s_{max} - s_0}{2R - h};$$

здесь h = CE – глубина внедрения ионов (E – ускоряющее напряжение); s<sub>max</sub> и s<sub>0</sub> – максимальная и начальная концентрации поглощенного газа. Так как величина h мала по сравнению с 2R (константа C даже для легких газов не превышает 1 нм/кВ, то величиной  $N_2$  в уравнении (5.23) можно пренебречь:

$$\mu N_{+} \approx D \frac{s_{max} - s_{0}}{CE}.$$

Отсюда следует выражение для максимальной концентрации растворенного газа:

$$s_{max} = s_0 + \frac{\mu N_+ + CE}{D}$$

По известному значению  $s_{\text{max}}$  можно подсчитать общее количество газа, которое будет поглощено единицей поверхности:  $a = (s_{\text{max}} - s_0)R$ . Если величина  $s_{\text{max}}$ , рассчитанная по приведенной формуле, превышает максимально возможную в данных условиях растворимость газа в металле, то поглощенный газ начинает объединяться в газовые пузырьки, вызывая разрыв металла. Это явление получило название б л и с т е р - э ф ф е к т а. В нержавеющей стали водородный блистер-эффект наблюдается при поглощении  $3.10^{-2} \text{ м}^3$ .Па/см<sup>2</sup>, что соответствует при быстроте откачки  $10^{-2} \text{ м}^3/(\text{с.см}^2)$  и давлении  $4.10^{-8}$  Па приблизительно 300 ч непрерывной работы.

Во время ионной бомбардировки наблюдается распыление материала, сопровождающееся нанесением тонких пленок на электроды и корпус насоса. Сорбционная активность этих пленок используется для хемосорбционной откачки. Распыление активного материала может осуществляться независимо от процесса откачки, например с помощью регулирования температуры нагревателя. Расход активного материала в таких насосах осуществляется независимо от потока откачиваемого газа. Более экономно расходуется активный металл в насосах с саморегулированием распыления. В этих насосах распыление производится ионами откачиваемого газа, бомбардирующими катод, изготовленный из активного материала. Распыляемый материал осаждается на корпус и анод, где осуществляется хемосорбционная откачка.

В электронных лампах применяются распыляемые геттеры на основе бария и нераспыляемые геттеры из спеченных порошков активных металлов:Ti, Zi, Al, V. Нераспыляемые геттеры нужно перед началом работы активировать при повышенной температуре. Для геттера из титана и ванадия температура активирования 400°С.

## 5.9. Конструкции ионно-сорбционных насосов.

Пример конструкции насоса с независимым распылением активного материала представлен на рис. 5.13,*а*. Насос состоит из корпуса б, холодильника 5, распылителя 4, управляющей сетки 3, ионизирующей анодной сетки 2, катода 1. Электроны, вылетающие из термокатода, направляются на распылитель и анодную сетку, к которым приложено положительное напряжение в несколько сотен вольт. Электронная бомбардировка распылителя разогревает его до температуры испарения находящегося на нем активного металла. Электроны, направляющиеся к анодной сетке 2, совершают до попадания на нее несколько колебаний, ионизируя молекулы остаточных газов. Сетка 3 служит для поддержания постоянства эмиссионного тока при временном отравлении катода.

Ионизированный газ хорошо сорбируется активным металлом, напыленным на поверхность стенки корпуса, и ионной откачкой путем внедрения положительных ионов в материал стенок корпуса. Основные характеристики насосов такого типа приведены на рис. П.4 и в табл. П.11.

Электродная система, обеспечивающая эффективную ионизацию молекул остаточных газов при ионной откачке, используется в конструкции орбитронного насоса (рис. 5.13, б). Электроны, эмиттируемые небольшим вольфрамовым катодом 5, под действием положительного потенциала анода 4 и сеток 1 направляются в пространство ионизации между концентрично расположенными анодом 4 и коллектором ионов 3. Одновременно благодаря наличию присоединенного к катоду специального электрода 2 электронам сообщаются касательные скорости, обеспечивающие движение электронов по круговым траекториям, что в несколько тысяч раз увеличивает пробег электрона по сравнению с

расстоянием между катодом и анодом. Положительные ионы, образовавшиеся результате В ионизации остаточных газов, под лействием ускоряющего поля внедряются В коллектор ИОНОВ, которым может служить корпус насоса. Одновременно с анода, разогретого до температуры испарения электронной



Рис.5.13. Конструктивные схемы ионно-сорбционных насосов



Рис.5.14. Конструктивные схемы магниторазрядных насосов бомбардировкой, активный материал напыляется на коллектор ионов, что обеспечивает хемосорбционное поглощение откачиваемого газа и "растворение" поглощенных молекул.

Недостатком этих насосов является то, что скорости распыления активного металла и производительность откачки в таких насосах независимы друг от друга. Это часто приводит к непроизводительному расходу активного металла.

Саморегулирование скорости распыления обеспечивается в магниторазрядном насосе (рис. 5.14, а, б), который состоит из двух катодов 1 и проволочного или цилиндрического анода 2, находящихся в магнитном поле с индукцией В. Магнитное поле направлено по оси анода, который имеет положительный относительно катодов потенциал 3..7 кВ. В диодном магниторазрядном насосе, имеющем большую производительность (рис. 5.15), анод 2 выполнен в виде сотовой рамки, каждая ячейка которой вместе с катодами 3, прикрепленными к корпусу 1, соответствует вместе с магнитом 4 схеме рис. 5.14, б.

Откачиваемые газы ионизируются электронами, появляющимися за счет автоэлектронной эмиссии из катода, и вторичными электронами, возникающими при бомбардировке катода ионами откачиваемого газа. Напряженность магнитного поля выбирают таким образом, чтобы радиус траектории электронов был меньше радиуса анода. При этом общая длина траектории электрона до его попадания на анод сильно увеличивается, что ведет к возрастанию вероятности ионизации остаточных газов.

Положительные ионы, слабо отклоняющиеся магнитным полем, бомбардируют катод и распыляют активный металл, который осаждается на аноде. Один ион выбивает в среднем один атом активного материала, что и обеспечивает саморегулируемую скорость распыления при работе насоса.

Активные газы химически взаимодействуют распыляемыми с атомами материала катода и осаждаются на анод в виде химических соединений. Инертные газы откачиваются за счет ионной откачки: положительные ионы внедрением В материал катода, отрицательные ионы И высокоэнергетические ней-



Рис.5.15. Конструкция магниторазрядного насоса

тральные частицы на аноде. Основное количество инертных газов откачивается на аноде, так как из катодов в процессе их распыления наблюдается выделение поглощенных газов. Для повышения эффективности откачки инертных газов один из катодов изготавливается из плохо распыляемого материала, например тантала.

Для повышения эффективности распыления активного материала применяются схемы диодных магниторазрядных насосов с ребристыми катодами (рис. 5.14,в) и триодная схема (рис. 5.14,г) сетчатым катодом 1. Распыление активного материала в этих насосах ведется с больших поверхностей при малых углах падения ионов. В триодном насосе напыление ведется дополнительно на коллектор 2 (корпус насоса), который не бомбардируется положительными ионами.

Магниторазрядные насосы обладают заметной избирательностью в процессе откачки. Быстрота действия этих насосов при откачке водорода в три раза выше, а кислорода в два раза ниже, чем азота. Быстрота действия при откачке инертных газов в диодных насосах составляет для гелия 10%, неона – 4%, аргона, криптона и ксенона - 1..2 % от быстроты откачки азота. В конструкциях насоса триодного типа и в насосах с ребристыми катодами быстрота откачки аргона повышается до 25 и 10% от быстроты откачки азота. При длительной откачке аргона в насосе может возникнуть аргонная нестабильность, сопровождающаяся периодическими колебаниями давления в связи с выделением аргона.

Магнитная система насосов по соображениям экономичности и надежности выполняется на постоянных магнитах из сплава железа с кобальтом ЮНДК35Г5, сплава

ниодим – железо - бор или сплава кобальта с самарием. Максимальная температура обезгаживания этих магнитов 500, 300 и 150<sup>0</sup> С.

Предельное давление магниторазрядных насосов 10<sup>-8</sup>..10<sup>-10</sup> Па. Для облегчения зажигания разряда в насосах при работе в сверхвысоком вакууме используется триггерное устройство на основе радиоактивных изотопов с электронным умножителем.

Верхний предел рабочих давлений определяется газовыделением из-за перегрева электродов насоса. При давлениях более 5.10<sup>-3</sup> Па длительная работа насоса возможна лишь при дополнительном охлаждении его электродов. Кратковременная работа насоса при его запуске возможна от давления 1 Па.

Наличие загрязнений на электродах насоса, особенно органических, уменьшает быстроту действия насоса и ухудшает предельное давление, поэтому предварительная откачка этих насосов должна обеспечиваться безмасляными средствами откачки.

Магниторазрядными насосами трудно обеспечить большую быстроту откачки из-за малой проводимости корпуса насоса, находящегося в магнитном зазоре. В связи с этим распространены многосекционные насосы, в которых магниторазрядные секции устанавливаются по образующей корпуса вакуумного насоса. Быстрота откачки такого насоса пропорциональна количеству секций или диаметру входного патрубка насоса.

Массовая удельная характеристика магниторазрядных насосов составляет 0,4 кг/(л/с). Комбинированные испарительные насосы с магниторазрядными секциями, предназначенными для откачки инертных газов, имеют лучшие массовые характеристики - 0,1 кг/(л/с). Характеристики современных магниторазрядных насосов приведены на рис. П.4 и табл. П.12.

# 5.10. Контрольные вопросы

5.1.В чем состоит принцип ионной откачки?

5.2. Какие способы сорбционной откачки применяются в вакуумных насосах?

5.3. В каких случаях эффективно применение ионно-сорбционной откачки?

5.4. Почему геттерные насосы не откачивают инертные газы?

5.5. Какие материалы используются в качестве геттера в ионно-сорбционных насосах?

5.6. Какие способы распыления активного вещества используются в ионносорбционных насосах?

5.7. Как объяснить аргонную нестабильность быстроты откачки ионно-сорбционных насосов?

5.8. Как увеличить быстроту действия магниторазрядных насосов при откачке инертных газов?

5.9. Как быстрота откачки магниторазрядных насосов зависит от рода газа?

5.10. Чем определяется максимальное количество газа, которое может быть откачено магниторазрядным насосом?

5.11. Чем объяснить свойство саморегулирования скорости распыления катодов магниторазрядных насосов в зависимости от их производительности?

5.12. Укажите способы улучшения верхнего предела рабочих давлений магниторазрядных насосов?

5.13. Какие хладоагенты применяются для охлаждения заливных криосорбционных насосов?

5.14. От чего зависит предельное давление криосорбционных насосов?

5.15. Почему криосорбционные насосы не используются для длительной работы в области низкого вакуума?

5.16. Чем определяется предельное давление криосорбционных насосов?

5.17. Какие типы адсорбентов находят применение в адсорбционных вакуумных насосах?

5.19. В чем заключается преимущество адсорбционных насосов перед конденсационными?

5.20. Чем объяснить наличие оптимальной скорости транспортирования адсорбента в насосах непрерывного действия?

223

# Глава 6. Анализ вакуумных систем

# 6.1. Типовые схемы вакуумных установок

Среди большого количества вакуумных систем, используемых в производстве и научных исследованиях, можно выделить несколько типовых систем, предназначенных для получения низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума. Для принципиальных схем вакуумных установок пользуются условными обозначениями элементов вакуумных систем, приведенными в табл. П.13.

Вакуумная система для получения низкого вакуума (рис. 6.1) обеспечивает в вакуумной камере рабочее давление от  $10^5$  до  $10^1$  Па. Тип насоса 1 выбирают по предельному давлению (таб. 6.1) и составу остаточных газов (рис. 6.2) низковакуумных насосов.

Таблица 6.1

Типы насосов	Обозначения	Предельное давление,	Быстрота действия,
		Па	м <sup>3</sup> /с
Центробежный	NF	10 <sup>4</sup>	$10^{-3}10^{-2}$
Мембранный	NP	$10^210^3$	
Воздухоструйный	NH	$2.10^{3}$	$10^{-3}10^{-2}$
Водоструйный	NH	$2.10^{3}$	$10^{-3}10^{-2}$
Водокольцевой	NW	$2.10^310^4$	$10^{-2}8.10^{-1}$
Многопластинчатый	NL	5.10 <sup>2</sup>	$5.10^{-2}10^{0}$
Пластинчато-статорный	NL	$10^010^2$	$10^{-3}10^{-2}$
Пластинчато-роторный	NL	$10^010^1$	$10^{-4}10^{-1}$
Спиральный	NS	$10^010^2$	10 <sup>-3</sup> 3.10 <sup>-2</sup>
Кулачковый	NZ	$10^010^2$	$10^{-3}10^{-2}$
Криосорбционный	NC	$10^510^0$	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-1</sup>

#### Основные характеристики насосов для получения низкого вакуума

Для повышения надежности, а также в случае применения криоадсорбционного насоса, способного поглотить ограниченное количество откачиваемого газа, элементы схемы 1, 2, 5 дублируются. Дополнительные элементы показаны пунктиром.

Клапан 2 позволяет выровнять давления на входном и выходном патрубках насосов с рабочей жидкостью во время их остановки или выпустить в атмосферу газ, десорбируемый при отогреве криоадсорбционного насоса. Эти клапаны иногда вставляются непосредственно в насосы.



Рис.6.1. Вакуумная система для получения низкого вакуума: 1 - насос, 2,5,10,11 клапаны, 3 - предохранительная камера, 4,9 - манометры, 6 - откачиваемый объект, 7 - ввод движения, 8 - электрический ввод, 12 - газоанализатор, 13 - вспомогательная вакуумная система



Рис.6.3.Оптимальныеые коэффициенты использования вращательных насосов в зависимости от их быстроты действия и числа элементов вакуумной системы (n)



низковакуумных систем: а - механические насосы, б - адсорбционные насосы

Предохранительная камера 3 используется для механических масляных насосов и собой представляет ловушку для паров рабочей жидкости насоса или балластный объем. предотвращающий аварийное проникновение в вакуумную камеру рабочей жидкости насосов. Для насосов других типов не используется.

Манометр 4 позволяет в случае необходимости определить работоспособность вакуумного насоса. Клапан 5 отключает вакуумную камеру от насоса после достижения в ней рабочего давления и



Рис. 6.4. Вакуумная система для получения среднего вакуума: 1 - насос предварительного разрежения, 2,3,6,14,15,17,18,19 - клапаны, 4,8,12,20 - манометры, 5 - маслоотражатель, 7 - насос, 9 - электрический ввод, 10 - ввод движения, 11 - камера, 13 - газоанализатор, 16 - гигроскопатор



Рис.6.5. Оптимальные коэффициенты использования двухроторных насосов в зависимости от быстроты откачки и числа элементов участка вакуумной системы (n) позволяет дросселировать процесс откачки, предотвращая перегрев механических насосов во время работы при высоких давлениях.

В случае необходимости регистрации парциальных давлений присутствующих всех газов. В вакуумной камере, через клапан 11 подключается газоанализатор 12. Вспомогательная вакуумная система 13 необходима для снижения давления анализируемой смеси газов, так как современные вакуумные газоанализамогут работать при общем торы давлении не выше 10<sup>-1</sup> Па.

Стоимость участка вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом зависит от числа последовательно соединенных элементов. На рис. 6.3 приведены значения оптимальных коэффициентов использования механического насоса в зависимости от требуемой эффективности быстроты откачки для различного числа элементов на участке вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом.

Вакуумная система для получения низкого и среднего вакуума (рис.6.4) имеет два вакуумных насоса. Насос 7 обеспечивает получение среднего вакуума, а насос 1 создает

за

предварительное разряжение. В качестве насоса для получения среднего вакуума могут применяться двухроторные, пароэжекторные и адсорбционные насосы (таб. 6.2)

Таблица 6.2

Типы насосов	Обозначения	Предельное давление,Па	Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с
Двухроторный	NZ	5.10-3	5.10 <sup>-3</sup> 5
Бустерный	NB	5.10 <sup>-1</sup>	0,4515
Криосорбционный	NC	$10^{0}10^{-3}$	10 <sup>-3</sup> 5

Основные характеристики насосов для получения среднего вакуума

Насос 1 обеспечивает получение низкого вакуума. Оптимальные значения коэффициентов использования двухроторных насосов в зависимости от эффективной быстроты откачки и числа последовательно соединенных элементов приведены на рис. 6.5. При остановке насоса 1, закрывая клапан 2 и открывая клапан 3, можно выровнять давление на его входном и выходном патрубках и предотвратить выдавливание масла из насоса в вакуумную камеру. Манометр 4 необходим для проверки работоспособности насоса 1. Отражатель 5 предотвращает проникновение паров рабочей жидкости насоса 1 в насос 7 и вакуумную камеру 11. Клапаны 6, 18, 19 позволяют работать в режимах "прямой" и "обходной" откачки, соответствующих прохождению откачиваемого газа через оба насоса или через один насос предварительного разрежения. В последнем случае в откачиваемом объекте обеспечивается получение низкого вакуума.

Манометр 20 позволяет определить эффективность работы отражателя 5, а манометр 8 при закрытом клапане 18 контролирует предельное давление насоса 7. Вакуумная камера снабжена электрическими 9 и механическими 10 вводами, манометром 12, газоанализатором 13, клапаном 14 для подключения течеискателя и клапанами 15, 17 с гигроскопатором 16 для напуска воздуха в вакуумную камеру. Гигроскопатер предотвращает попадание в вакуумную камеру паров воды, содержащихся в атмосферном воздухе, что существенно сокращает время откачки вакуумной камеры до рабочего давления.

Таблица 6.3

Типы насосов	Обозначения	Предельное давление,Па	Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с
Пароструйные	ND	$10^{-4}10^{-5}$	5.10 <sup>-3</sup> 40
Турбомолекулярные	NR	$10^{-6}10^{-7}$	10 <sup>-2</sup> 5
Ионно-сорбционные	NF	5.10 <sup>-7</sup>	5.10 <sup>-1</sup> 5

Основные характеристики высоковакуумных насосов



Рис.6.6. Вакуумная система для получения высокого вакуума: 1 - насос для получения низкого вакуума, 2,5,15,16,17,19,20,21,24,27 клапаны, 3,8,25 - ловушки, 4 - форвакуумный баллон, 6,12,13,22,23,28 - манометры, 7 - насос для получения высокого вакуума, 9 - ввод вращения, 10 - электрический ввод, 11 - камера, 14 - газоанализатор, 18 - гигроскопатор, 26 - насос для получения среднего вакуума





Вакуумная система для получения низкого, среднего и высокого вакуума (рис.6.6) содержит все элементы предыдущей схемы и дополнительный высоковакуумный насос 7 (табл. 6.3). В качестве высоковакуумного насоса могут применяться пароструйные, турбомолекулярные и гетероионные. Состав остаточных газов пароструйного и турбомолекулярного насосов показан на рис.6.7. Ловушка 8 предотвращает проникновение рабочей пароструйных паров жидкости насосов В вакуумную камеру, Для турбомолекулярных и гетероионных насосов ловушка 8 обычно не устанавливается. Но в случае необходимости может применяться для откачки паров воды. Клапан 21 коммутирует насос с вакуумной камерой. Манометр 22 позволяет контролировать эффективность работы



Рис.6.8. Оптимальные коэффициенты использования пароструйных насосов в зависимости от быстроты действия и числа элементов (n)

насоса 7 и ловушки 8 при закрытом клапане 21. Манометры 12 и 13 измеряют давление в вакуумной камере области среднего и соответственно в высокого вакуума. Для обеспечения в вакуумной камере высокого вакуума все насосы включаются последовательно. Если в камере необходимо получить средний вакуум, то насос 26 подключается через клапан 19 к откачиваемому объекту. При этом клапан 24 может быть закрыт. через клапаны 20 и Аналогично, 5 низковакуумный насос непосредственно подключается к откачиваемому объекту или к насосу 26. При работе системы в

режиме высоковакуумной откачки газовые потоки очень малы. Это позволяет отключить насос 1 на длительное время и работать на форвакуумный баллон 4.

Схему можно упростить за счет сокращения коммутационной аппаратуры 5, 19, 20, 21, 24, однако это значительно снизит производительность работы системы в нестационарных режимах. Если система предназначена для работы только в области высокого вакуума, то насос 26 с манометром 23 и клапанами 19 и 24 из схемы можно исключить. В этом случае увеличится время откачки вакуумной камеры до рабочего давления. Рекомендации по выбору оптимальных коэффициентов использования высоковакуумных насосов приведены на рис.6.8.

Вакуумная система для получения сверхвысокого вакуума (рис. 6.9) содержит прогреваемый вакуумный блок 7. Прогрев до 400°С уменьшает газовыделение всех элементов вакуумной системы, непосредственно подключаемых к сорбционному насосу 4. Состав остаточных газов сверхвысоковакуумных систем показан на рис. 6.10. Основные характеристики сверхвысоковакуумных насосов приведены в таб. 6.4. Камера снабжена несколькими манометрами 9, 10, 11, обеспечивающими измерение давления от атмосферного до сверхвысокого вакуума. Манометр 5 контролирует работоспособность насоса 4. Высоковакуумная часть системы собирается на двух насосах: 1 и 18. В качестве высоковакуумного насоса 18 можно использовать пароструйный насос с ловушкой 17 или турбомолекулярный насос без ловушки. Клапан 16 служит для подключения течеискателя к



Рис.6.9. Вакуумная система для получения сверхвысокого вакуума:1 - низковакуумный насос, 2,6,13,16,19 - клапаны, 3,5,9,10,11, 14,15 манометры, 4 – сверхвысоковакуумный насос, 7 - прогреваемый блок, 8 - откачиваемый объект, 12 - газоанализатор, 17 - ловушка, 18 - высоковакуумный насос





вакуумной системе, а манометры 14 и 15 - для измерения давления в области среднего и высокого вакуума. В качестве низковакуумного насоса 1 чаще всего используется механический насос. Схема высоковакуумной откачки максимально упрощена, так как используется только в нестационарном режиме при запуске установки.

В тех случаях, когда требуется повышенная надежность системы по предотвращению попадания паров рабочей жидкости в вакуумную камеру, в качестве предварительной системы откачки используются агрегаты с криоадсорбционными насосами.

Таблица 6.4

#### Основные характеристики сверхвысоковакуумных насосов

Типы насосов	Обозначения	Предельное	Быстрота действия,
		давление,Па	м <sup>3</sup> /с
Пароструйный с	ND	10 <sup>-8</sup>	$5.10^{-3}5.10^{-1}$
ловушкой			
Магниторазрядный	NM	5.10 <sup>-8</sup>	$6.10^{-3}1, 2.10^{0}$
Орбитронные	NE	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-1</sup> 5.10 <sup>-1</sup>
Криоконденсационные	NC	10-11	5.10 <sup>-1</sup> 4.10 <sup>1</sup>

Оптимальные значения коэффициентов использования сверхвысоковакуумных насосов в зависимости от их быстроты действия в откачиваемом объекте и числа элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом приведены на рис. 6.11.

Централизованными системами откачки называют вакуумные системы, в которых

выпускное давление для нескольких включенных параллельно высоковакуумных насосов обеспечивается работой одного насоса предварительного разрежения. Они применяются в помещениях с большим количеством однородного вакуумного оборудования и автоматах откачки.

Трехтрубопроводная централизованная система откачки показана на рис. 6.12. Вакуумные камеры  $V_1..V_n$  откачиваются высоковакуумными насосами  $\Pi_1..\Pi_n$ через автоматические клапаны  $K_1 ...K_n$ .



Рис.6.11. Оптимальные коэффициенты использования сверхвысоковакуумных насосов в зависимости от эффективной быстроты откачки и количества элементов (n)

Присоединение высоковакуумных насосов к трубопроводу *III* предварительного разрежения производится автоматическими клапанами  $B_1...B_n$ . Трубопроводы *I* и *II* служат для предварительной откачки воздуха из вакуумных установок. С помощью трубопровода *I* давление понижается от атмосферного до  $10^2$  Па, а с помощью *II* – от  $10^2$  до 5 Па.

Каждый трубопровод откачивается одним механическим насосом. Трубопроводы II и III имеют двухроторные насосы. Резервный агрегат может быть подключен к любому из трех трубопроводов. Включение и работа централизованной вакуумной системы для откачки вакуумной камеры  $V_1$ , осуществляются в следующем порядке:

1) откачка в течение 2..3 мин от атмосферного давления через трубопровод I, затвор  $D_1$  открыт,  $C_1$ ,  $K_1$ , и  $E_1$  закрыты, клапан  $B_1$  - открыт, высоковакуумные насосы  $\Pi_1$  подготавливаются к работе;

2) с помощью реле времени производится переключение с трубопроводов I на II, при этом затвор  $D_1$  закрывается, затвор C1 открывается, откачка ведется до давления ~ 5 Па;



Рис.6.12. Централизованная трехтрубная система откачки

3) манометрический преобразователь  $M_{11}$ , например типа МТ- 6, в схеме блокировочного вакуумметра при давлении 5 Па подключает к установке паромасляный насос  $\Pi_1$ , при этом затворы  $B_1$ , и  $C_1$  закрываются, затворы  $E_1$  и  $K_1$  открываются;

4) после того как в объеме получено рабочее давление, паромасляные насосы с помощью манометра  $M_{12}$  переключаются на трубопровод *III*, при этом затвор  $E_1$  закрывается, а  $B_1$  открывается.

Для бесперебойной работы централизованной вакуумной системы при аварии могут применяться две защиты:

1) централизованного трубопровода от вакуумных установок;

2) вакуумных установок от централизованного трубопровода.

Первая защита срабатывает от вакуумных реле  $M_{11}$  .. $M_{1n}$  при давлении в вакуумной установке выше допустимого (для пароструйных насосов 6..8 Па); при этом клапаны  $K_1$  ..  $K_n$  автоматически закрываются.

Вторая защита срабатывает от вакуумного реле  $P_2$  или  $P_3$ , установленного в централизованных трубопроводах, если давление в нем превысит то же самое допустимое значение, при этом клапаны  $B_1 ... B_n$  или  $E_1 ... E_n$  автоматически закрываются.

В качестве реле *P*<sub>2</sub>, *P*<sub>3</sub>, *M*<sub>11</sub>..*M*<sub>1n</sub> могут применяться манометрические преобразователи, имеющие релейную характеристику.

Централизованные откачные системы в описанном виде рассчитаны на применение высоковакуумных насосов, требующих непрерывного предварительного разрежения. Для высоковакуумных сорбционных насосов централизованная система откачки может работать без трубопровода *III*.

Если число вакуумных установок не слишком велико или их общий объем соизмерим с объемом централизованного трубопровода, то можно отказаться от трубопровода *I*. Таким образом, могут применяться двух- и однотрубопроводные централизованные системы откачки.

Экономические соображения позволяют определить целесообразность применения защит при аварии. Если вероятность аварии мала, а ее последствия легкоустранимы, то эксплуатация обеих или одной из защит оказывается нерентабельной.

## 6.2. Расчет газовых нагрузок

Стационарный газовый поток, откачиваемый насосом, во время работы вакуумной установки имеет несколько составляющих:

$$Q = Q_{\mathrm{dc}} + Q_{\mathrm{d}\phi} + Q_{\mathrm{H}} + Q_{\mathrm{T}} + Q_{\mathrm{n}},$$

где  $Q_{\rm ac}$  - десорбционное газовыделение,  $Q_{\rm a\phi}$  - диффузионное газовыделение,  $Q_{\rm H}$  - натекание через оболочку вакуумной камеры;  $Q_{\rm T}$  - стационарное технологическое газовыделение;  $Q_{\rm n}$  проницаемость материалов. Десорбционное, диффузионное газовыделение и газопроницаемость могут быть рассчитаны по методике, изложенной в § 2.7.

Упрощенный метод определения газовыделения основан на применении экспериментально определенных значений коэффициентов удельного газовыделения (табл.С19), зависящих от рода газа, материала и его предварительной обработки, а также рабочей температуры. Газовый поток

$$Q_{\tilde{a}} = \sum_{i=1}^{N} q_i F_i = q_{\tilde{n}\,\delta} \sum_{i=1}^{N} F_i$$
(6.1)

где *F*<sub>i</sub> - площадь *i*-го материала, присутствующего в вакуумной системе; *N*-число материалов; *q*<sub>ср</sub>-среднее удельное газовыделение материалов вакуумной системы:

$$q_{\tilde{n}\,\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i F_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i}$$

Количественная оценка процессов стационарной проницаемости газа через стенки вакуумной системы, изготовленные из различных материалов или имеющие различную толщину, может быть сделана с учетом констант проницаемости  $K_{0i}$  и  $Q_{pi}$  -(табл. С.21) по формуле 1.68

$$Q_{i} = \sum_{i=1}^{N} K_{0i} F_{i} \frac{p_{2}^{1/n} - p_{1}^{1/n}}{2h_{1}} \exp \frac{Q_{pi}}{nKT}$$
(6.2)

где  $K_{0i}$  и  $Q_{pi}$ - соответствыно константа проницаемости и теплота активации для материала *i*-й стенки вакуумной системы;  $F_i$  и  $h_i$  - соответственно площадь и половина толщины *i*-й стенки;  $p_i$  и  $p_2$  - давления с внутренней и наружной сторон стенок; *n*-число атомов в молекуле газа, проникающего через стенку; T - абсолютная температура стенки; R = 8,31 кДж/(кмоль·К); *N*-число стенок вакуумной камеры, арматуры и трубопроводов, изготовленных из различного материала или имеющих разную толщину.

Газопроницаемость возрастает при уменьшении толщины стенок вакуумных камер. Особенно это заметно для деталей типа сильфонов, мембран и т.д., где малая толщина детали определяется условиями ее работы.

Конструктивными способами уменьшения газопроницаемости кроме выбора материалов являются использование установок с "двойным" вакуумом и охлаждение деталей во время работы непосредственно в вакуумной камере.

Газовый поток натекания через течь меняется при изменении давления в вакуумной камере:

$$q_{\dot{o}} = U_{\dot{o}}(p_i - p_2)$$

где U<sub>T</sub> проводимость течи; p<sub>1</sub> и p<sub>2</sub> -давления снаружи и внутри вакуумной камеры.

Снижение давления в камере увеличивает поток натекания. Проводимость течи может уменьшаться по мере снижения давления при существовании в ней различных режимов течения газа.

Условный диаметр и длина течи может быть определена из решения системы уравнений (3.14), а поток натекания по (3.35).

Натекание через оболочку вакуумной камеры происходит в основном по разборным и неразборным соединениям которые принципиально не могут обеспечить абсолютную герметичность. Натекание может происходить и по дефектам в структуре сплошного материала Поэтому возможное натекание в вакуумную установку можно оценить по формуле:

$$Q_i = K_{\hat{a}} N Q_{\hat{b}\hat{b}} \, / m \tag{6.3}$$

где  $Q_{\text{тм}}$  - минимальный поток, регистрируемый течеискателем (табл.6.5).  $K_{\text{в}}$  вероятность существования течи, меньшей чувствительности течеискателя; N - число соединений; m-число одновременно проверяемых соединений.

Резервом уменьшения Q<sub>н</sub> при расчете узлов и деталей, проходящих независимые испытания, по формуле (6.3) является уменьшение числа испытаний на герметичность. Предельным случаем является одно испытание, когда m=N, и проверяется негерметичность всей установки.

Тип течеискателей	Наименьший	
	регистрируемый поток,	Назначение
	м <sup>3</sup> Па/с	
Масс-спектрометрический	10-12	Испытание объектов, допускающих
		откачку
То же, с дросселированием	10-13	То же
откачки		
То же, с накоплением	10 <sup>-14</sup>	Испытание небольших объектов
		допускающих откачку
Галогенный с атмосферным	10-7	Проверка полостей, заполненных
преобразователем		галогеносодержащими веществами
Галогенный с вакуумным	10 <sup>-9</sup>	Испытание объектов допускающих
преобразователем		откачку
Искровой течеискатель	10 <sup>-5</sup>	Испытание вакуумных систем со
		стеклянными элементами

### Потоки газов, регистрируемые теченскателями

При работе с гелиевым течеискателем такая проверка производится размещением всей установки в атмосфере гелия с помощью полиэтиленовых колпаков или других вспомогательных средств, зависящих от размеров установки.

Технологическое газовыделение зависит от типа обрабатываемого объекта и способа осуществления технологического процесса. В проектировочных расчетах его максимальное значение и закон изменения во времени должны быть предварительно рассчитан или задан на основании экспериментальных исследований.

# 6.3. Уравнения стационарной откачки

Для стационарного режима откачки характерно постоянство во времени давлений во всех сечениях вакуумной системы. Если газовый поток постоянен во всех сечениях, то мы имеем дело с вакуумной системой с сосредоточенными параметрами (рис.6.13а), для которой справедливо основное уравнение вакуумной техники(2.110).

Если dQ/dx = f(x) зависит только от *x*, то источники газовыделения распределены по длине вакуумной системы. Такими источниками могут быть специально установленные натекатели, течи через неплотности соединений, газопроницаемость и газовыделение материалов (рис. 6.136).



Рис.6.13. Расчетные схемы

В тех случаях, когда 
$$\frac{dQ}{dx} = f(p)$$

. ..

зависит от давления, в вакуумной системе обычно имеются сорбирующие стенки (рис. 6.13,в). Для трубопроводов сложной формы их проводимость может зависеть от *х* (рис.6.13,г).

Уравнение баланса сил записывают из условия, что перепад давления является источником движущей силы, равной при низком вакууме силе сопротивления, возникающей за счет внутреннего трения

между слоями движущегося газа, или при высоком вакууме - силе внешнего трения газа о стенки элемента вакуумной системы:  $dp / dx = \varphi(x, p, Q)$ .

Если dp / dx = const, то мы имеем дело с течением газа в трубопроводе постоянного поперечного сечения при молекулярном режиме. При  $dp / dx = \varphi(x,Q)$  трубопровод имеет переменное поперечное сечение, а в случае зависимости  $\frac{dp}{dx} = \varphi(p,Q)$  режим течения молекулярно-вязкостный или вязкостный. Уравнения баланса массы и баланса сил путем исключения Q могут быть переписаны в виде одного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка:

$$d^2p/dx^2 = \psi(x,p).$$

Граничные условия могут быть заданы в виде постоянных давлений на концах или потока и давления на одном из концов трубопровода.

Решение в виде функции р(х) получают в результате интегрирования записанного уравнения. Для расчета распределения давления по длине трубопровода для схемы на рис 6.13,б запишем дифференциальное уравнение баланса сил

$$Q = \tilde{n} \frac{dp}{dx},$$

где с — коэффициент пропорциональности. Будем считать, что трубопровод по всей длине имеет постоянную форму поперечного сечения с периметром П, а газовыделение с единицы поверхности равно q. Тогда дифференциальное уравнение баланса массы можно записать в виде

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -q\dot{I}$$

Исключая Q из записанных уравнений, получим дифференциальное уравнение стационарной откачки:

$$\frac{d^2p}{dx^2} = -\frac{q}{c}\ddot{I}$$
(6.5)

при граничных условиях:  $x = 0; p = p_2; x = l; \frac{dp}{dx} = \frac{Q_0}{\tilde{n}}$ 

Рассмотрим молекулярный режим течения газа, когда с - постоянная. Интегрируя уравнение (6.5) получим

$$p(x) = p_2 + \frac{q\ddot{l}l + Q_0}{c}x - \frac{q\ddot{l}}{2c}x^2$$
(6.6)

Примеры такого распределения даны на рис. 6.14 (кривые 1 и 2).

Давление  $p_1$  при x = l можно

записать как

$$p_1 = p_2 + \frac{l}{\tilde{n}} \left( Q_0 + \frac{q\ddot{l}l}{2} \right)$$

Если  $Q_0 > q\Pi l/2$ , то влиянием собственного газовыделения трубопровода распределение на давления можно пренебречь. Обозначая c / l = U, с учетом сделанного допущения можно преобразовать к виду

$$Q = U(p_1 - p_2)$$

аналогичному (2.35).Распределение



Px/Pe 0,8 0,6 0,4 0,4 0,6 0,2 0,8 X/l

Рис.6.14. Распределение давления по длине трубопровода при молекулярном режиме: 1 -  $q = 0, Q_0 \neq 0; 2 - q \neq 0, Q_0 = 0;$ при вязкостном режиме: 3 -  $q = 0, Q_0 \neq 0;$  $4 - q \neq 0, Q_0 = 0$ 

давления в этом случае становится линейным, а газовый поток постоянен во всех сечениях вакуумной системы.

Рассмотрим вязкостный режим течения газа по трубопроводу, когда проводимость трубопровода прямо пропорциональна давлению газа, т.е.  $c = Ul = c_0 p$ .

Используя такие же преобразования, как и при выводе уравнения(6.4), найдем давление в произвольном сечении:

$$p^{2}(x) = p_{2}^{2} + \frac{2(q\ddot{l}l + Q_{0})}{\tilde{n}_{0}}x - \frac{q\ddot{l}}{\tilde{n}_{0}}x^{2}$$
(6.7)

Примеры распределения давления по длине трубопровода при вязкостном режиме течения даны на рис.6.14 (кривые 3 и 4). При x = l давление на конце трубопровода, соединенного с откачиваемым объектом

$$p_{1}^{2} = p_{2}^{2} + \frac{2l}{\tilde{n}_{0}} \left( Q_{0} + \frac{q\ddot{l}l}{2} \right)$$
(6.8)

Зависимость давления от длины трубопровода при вязкостном режиме течения в случае  $Q_0 >> \frac{q\ddot{l}l}{2}$  параболическая. Обозначая  $U = c_0 (p_1 + p_2) / (2l)$ , вновь получим уравнение (2.35)

Давление  $p_0$  в откачиваемом объекте можно найти из условия  $Q_0 = U_0 (p_0 - p_2)$ , где  $U_0$  -проводимость входного отверстия при соответствующем режиме течения.

Давление *p*<sub>2</sub> определяется основной характеристикой насоса. Если принять зависимость быстроты откачки насоса *S*<sub>н</sub> от давления *p* в виде функции

$$S_i = S_m (1 - p_{i\delta} / p)$$

где  $S_{\rm m}$  - номинальная быстрота действия насоса;  $p_{\rm np}$  -предельное давление насоса, то рабочее давление насоса

$$p_{2} = \frac{Q}{S_{i}} = \frac{Q}{S_{m}(1 - p_{i \,\delta} / p_{2})}$$

Решая это уравнение относительно р2, получим

$$p_2 = p_{i\,\delta} + Q / S_m \tag{6.9}$$

### 6.4. Соединения арматуры и откачиваемых объектов

Арматура (коммутационные элементы, ловушки, трубопроводы) и откачиваемые объекты, соединяясь друг с другом, образуют сложные вакуумные системы. Место соединения двух элементов и более называют узлом вакуумной системы. В узле сумма газовых потоков, проходящих через все *К* соединенные каналы, равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^{K} Q_i = 0, (6.10)$$

Если в узле находится вакуумный насос, то (6.10) можно переписать в виде

$$\sum_{i=1}^{K-1} Q_i = S_i p_i, \qquad (6.11)$$

где S<sub>н</sub> и p<sub>н</sub> - быстрота действия и давление насоса. При наличии в вакуумной системе нескольких узлов для каждого из них можно записать уравнение вида (6.10). Решая систему алгебраических уравнений, можно определить давления во всех узлах вакуумной системы.

Параллельное соединение трубопроводов (рис. 6.15) позволяет поток увеличить газа между двумя соседними узлами вакуумной системы. Давления  $p_1$  и  $p_2$ на концах всех трубопроводов одинаковы, а суммарный поток, который протекает между узлами, с учетом (2.35)



Рис.6.15. Параллельное соединение трубопроводов

$$Q = \sum_{i=1}^{K} Q_i = (p_1 - p_2) \sum_{i=1}^{K} U_i,$$

где  $Q_i$  - поток, протекающий через *i*-й трубопровод.

Расчетную схему вакуумной системы можно упростить, считая, что узлы связаны одним эквивалентным трубопроводом проводимостью *U*:

$$U = \sum_{i=1}^{K} U_i,$$
 (6.12)

При обобщенном молекулярно-вязкостном режиме течения газа при постоянной температуре и молекулярной массе проводимость трубопровода является функцией давления и геометрических размеров трубопровода:

$$U_{i} = \frac{Ad_{i}^{3}}{l_{i}} + \frac{Bd_{i}^{4}}{l_{i}} p_{\bar{n}\,\delta}, \qquad (6.13)$$

где *A*, *B* - постоянные; *d* и *l* - диаметр и длина трубопровода;  $p_{cp}$  -среднее давление в трубопроводе:  $p_{cp} = (p_1 + p_2) / 2$ . Перепишем (6.12) с учетом (6.13):

$$\frac{Ad^{3}}{l} + \frac{Bd^{4}}{l} p_{\bar{n}\,\bar{\delta}} = A \sum_{i=1}^{K} \frac{d_{i}^{3}}{l_{i}} + B p_{\bar{n}\,\bar{\delta}} \sum_{i=1}^{K} \frac{d_{i}^{4}}{l_{i}}.$$
(6.14)

Записывая равенство коэффициентов в левой и правой частях (6.14) при одинаковых степенях *p*<sub>cp</sub>, получим два уравнения

$$\frac{d^3}{l} = \sum_{i=1}^{K} \frac{d_i^3}{l_i}; \qquad \frac{d^4}{l} = \sum_{i=1}^{K} \frac{d_i^4}{l_i},$$

из которых можно найти диаметр *d* и длину *l* эквивалентного трубопровода.



Рис.6.16. Последовательное соединение трубопроводов

соединенных элементов можно также записать

$$Q/U = p_0 - p_n \,. \tag{6.16}$$

Сравнивая (6.15) и (6.16), получим, что общую проводимость последовательно соединенных элементов можно рассчитать по формуле

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{U_i}}.$$
(6.17)

Для расчета сложных вакуумных систем методами механики сплошной среды сделаем следующие допущения: 1) при последовательном соединении элементов с различными диаметрами условных проходов в местах сужения проходного сечения возникают дополнительные сопротивления потоку газа; 2) места расширения проходного сечения сопротивления потоку не оказывают.

Последовательное соединение элементов (отверстий и трубопроводов) показано на рис.6.16. При одинаковом потоке газа во всех элементах можно записать

$$Q / U_i = p_{i-1} - p_i.$$
 (6.16)

Складывая все *n* уравнений системы (6.15), получим

$$Q\left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + ... + \frac{1}{U_i} + ... + \frac{1}{U_n}\right) = p_0 - p_n.$$

Для всей системы последовательно

При молекулярном режиме течения система последовательно соединенных отверстий и длинных трубопроводов может быть заменена эквивалентным отверстием, подключенным к бесконечно большому объекту. Для системы, показанной на рис. 6.16, с учетом того, что проводимость круглого отверстия

$$U_{0i} = \frac{Cd_i^2}{\left(1 - \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2}\right)},$$
(6.18)

где *C* - постоянная,  $d_i$  - диаметр отверстия,  $d_{i-1}$  - диаметр предыдущего элемента, а проводимость длинного трубопровода  $U_{\rm Tp} = A d_i^{3} / l_i$ , согласно (6.17), получим

$$\frac{1}{\tilde{N}d^2} = \frac{1 - \frac{d_o^2}{d_1^2}}{Cd_1^2} + \dots + \frac{1 - \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2}}{Cd_i^2} + \dots + \frac{1 - \frac{d_{m-1}^2}{d_m^2}}{Cd_m^2} + \frac{l_1}{Ad_1^3} + \dots + \frac{l_j}{Ad_j^3} + \dots + \frac{l_n}{Ad_n^3},$$

здесь m - число сужений трубопровода; n - число трубопроводов в системе. Решая записанное уравнение, можно найти диаметр d отверстия, проводимость которого равна проводимости сложной системы последовательно соединенных элементов.

При вязкостном режиме течения также можно определить размеры эквивалентного трубопровода. Если пренебречь сопротивлением отверстий, то систему уравнений (6.15) можно переписать с учетом общей формулы проводимости трубопровода при постоянной температуре в следующем виде:

$$Q\frac{2l_i}{Bd_i^4} = p_{i-1}^2 - p_i^2.$$

Сложив все уравнения, получим

$$\frac{2Q}{B}\left(\frac{l_1}{d_1^4} + \dots + \frac{l_i}{d_i^4} + \dots + \frac{l_n}{d_n^4}\right) = p_1^2 - p_n^2,$$

откуда следует, что диаметр *d* и длина *l* эквивалентного трубопровода должны удовлетворять условию

$$\frac{l}{d^4} = \frac{l_1}{d_1^4} + \dots + \frac{l_i}{d_i^4} + \dots + \frac{l_n}{d_n^4}.$$
(6.18)

Задаваясь длиной эквивалентного трубопровода l из (6.18) можно определить его диаметр d.





Рис.6.17. Соединение откачиваемых объектов: а - параллельное, б - последовательное, в - параллельно-последовательное

Параллельное соединение нескольких откачиваемых объектов к одному насосу (рис. 6.17.a) часто применяется при откачке небольших приборов. Записав уравнение (6.10) для давлением найдем узла с  $p_0$ ,

$$p_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i (S_i + U_0)}{S_i U_0}.$$
 (6.19)

Давление в любом откачиваемом объекте  $p_i$  зависит от  $p_0$ . Согласно (2.35), получим

$$p_{\rm i} = Q/U_{\rm i} + p_0.$$
 (6.20)

Для последовательного соединения откачиваемых объектов (рис.6.17,б) давление  $p_0$  определяют по формуле (6.19), а давление  $p_i$  в любом откачиваемом объекте - согласно (2.35).

$$p_i = p_{i+1} + rac{\sum_{j=1}^{i} Q_j}{U_j}$$

Параллельно - последовательное соединение откачиваемых объектов (рис.6.17,в) отличается от параллельного соединения (рис.6.17,а) наличием коллектора, проводимость которого может быть соизмерима с проводимостями трубопроводов, выходящих непосредственно из откачиваемых объектов. Давление р<sub>0</sub> определяется по формуле (6.19). Записывая уравнения (6.10) для узла, давление в котором *p*<sub>n</sub>', найдем

:

$$p'_{n} = p_{0} + \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{i}}{U_{n}^{\odot}}.$$

Давление в любом откачиваемом объекте:

$$p_{i} = p_{i}^{'} + \frac{Q_{i}}{U_{i}} = p_{i+1}^{'} + \frac{\sum_{j=1}^{i} Q_{j}}{U_{i}^{'}} + \frac{Q_{i}}{U_{i}}.$$
(6.22)

### 6.5. Соединения насосов

В вакуумных системах с большими газовыми потоками используют параллельное соединение насосов (рис.6.18,а). Запишем уравнение (6.10) для узла A, к которому подключены через элементы с проводимостями  $U_1, U_2...U_i...U_n$  все входные патрубки параллельно соединенных насосов:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_{i} = \sum_{i=1}^{n} U_{i} (p_{A} - p_{i}) = \sum_{i=1}^{n} S_{ii} p_{i}, \qquad (6.23)$$

где Q - суммарный поток, откачиваемый системой насосов.

Для входных сечений насосов уравнение (6.11) можно записать в виде равенства потоков, проходящих через элемент проводимостью U<sub>i</sub> и через насос с быстротой откачки S<sub>i</sub>:

$$U_{\rm i} (p_{\rm A} - p_{\rm i}) = S_{\rm Hi} p_{\rm i} .$$
 (6.24)

Решая (6.24) относительно р<sub>і</sub>, найдем

$$p_{i} = p_{A} \frac{U_{i}}{S_{ii} + U_{i}}.$$
(6.25)

Быстроту откачки в узле А определяем после подстановки (6.25) в (6.23):

$$S_{A} = \frac{Q}{p_{A}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_{ii}U_{i}}{S_{ii} + U_{i}} = \sum_{i=1}^{n} S_{Ai}.$$
(6.26)

Из (6.26) следует, что быстрота откачки в узле *A* равна сумме эффективных быстрот откачка всех насосов. Таким образом, систему параллельно соединенных насосов можно заменить одним насосом, подключенным к узлу и имеющим быстроту действия, определяемую по формуле (6.26).

Если все насосы одинаковы, то  $S_A = nS_{Ai}$ , а для обеспечения в узле A давления  $p_A$  требуется следующее число насосов:

$$n = Q / (p_{\rm A} S_{\rm Ai}).$$

Определим предельное давление системы в узле A при Q = 0, если система составлена из насосов с различными предельными давлениями  $p_{npi}$ . В этом случае уравнение потоков (6.10) для узла A запишем в виде

$$\sum_{i=1}^{n} S_{ii} p_{i} = 0. ag{6.27}$$

Используя зависимость  $S_{\rm Hi}$  от давления согласно (4.1) при  $p \ll p_3$ , можно (6.27) преобразовать к виду

$$\sum_{i=1}^{n} S_{mi}(p_{i} - p_{i \ \delta i}) = 0.$$
(6.28)

Для каждого из насосов справедливо уравнение

$$U_{\rm i} (p_{\rm A} - p_{\rm i}) = S_{\rm mi} (p_{\rm i} - p_{\rm npi}), \tag{6.29}$$

из которого находим

$$p_i = \frac{U_i p_A + S_{mi} p_{i\partial i}}{S_{mi} + U_i}.$$
(6.30)



Рис.6.18. Соединение насосов: а -параллельное, б - последовательное

После подстановки (6.30) в (6.28) и решения полученного выражения относительно давления р<sub>А</sub> получим выражение для предельного давления системы параллельно включенных насосов:

$$p_{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{i \ \delta i} S_{moi}}{\sum_{i=1}^{n} S_{moi}},$$
(6.31)  
где  $S_{moi} = \frac{S_{mi}U_{i}}{S_{mi} + U_{i}}.$ 

Максимальный газовый поток, который может быть откачан системой параллельно включенных насосов, соответствует равенству давлений  $p_i'$  в

выхлопных патрубках их максимальным выпускным давлениям  $p_{\rm Mi}$ , которые указываются в каталогах. Уравнение потоков (6.10) в узле *В* запишем в виде

$$\sum_{i=1}^{n} (p_{ii} - p_B) U_i' = Q.$$
 (6.32)

Решая уравнение (6.32) относительно давления в узле В, получим

$$p_{B} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_{i}^{'} p_{ii} - Q}{\sum_{i=1}^{n} U_{i}^{'}}.$$
(6.33)

Эффективная быстрота откачки насоса предварительного разрежения в узле В

$$S_{B} = \frac{Q}{p_{B}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_{i}^{'}}{\sum_{i=1}^{n} (U_{i}^{'} p_{ii} / Q) - 1}.$$
 (6.34)

Быстрота откачки насоса предварительного разрежения определена по (6.34) при условии, что в системе с разными насосами все давления на их выходе стали одновременно равными максимальным выпускным. Уточнить *S*<sub>B</sub> можно для конкретной системы насосов.

Система последовательно соединенных насосов (рис.6.18,6) очень часто используется в высоковакуумных установках. Если пренебречь собственным газовыделением насосов и соединительных трубопроводов, то в стационарном режиме работы газовый поток Q во всех насосах останется неизменным, и можно записать условие постоянства потока в виде

$$S_{\rm Hi}p_{\rm i} = S_{\rm H(i+1)}p_{\rm i+1} = Q$$

(6.35)

Из условия (6.35) следует, что требуемые быстроты действия последовательно соединенных насосов уменьшаются пропорционально возрастанию давления:

$$S_{\rm H(i+1)} / S_{\rm Hi} = p_{\rm i} / p_{\rm i+1}.$$
 (6.36)

Быстрота откачки первого насоса из (6.35)

$$S_{\rm H1} = Q/p_1. \tag{6.37}$$

Для описания основной характеристики насоса примем выражение (4.1) при  $p \ll p_3$ , тогда из (6.37) можно найти максимальную быстроту откачки:

$$S_{m1} = \frac{Q}{p_1 - p_{\tau \ \delta 1}}.$$
 (6.38)

Уравнение потоков (6.11) запишем для входного сечения первого насоса

$$Q = U_1(p_A - p_1) = S_{H1}p_1.$$
(6.39)

Решая (6.39) относительно давления *p*<sub>1</sub>, получим с учетом выражения (2.111) для коэффициента использования насоса *K*<sub>и1</sub>

$$p_1 = \frac{U_1}{U_1 + S_{i1}} p_A = K_{e1} p_A.$$
(6.40)

Подставляя (6.40) в (6.38), преобразуем выражение для максимальной быстроты откачки первого насоса:

$$S_{m1} = \frac{Q}{K_{\ell 1} p_A - p_{\tau \ \delta 1}}.$$
 (6.41)

Для любого другого последовательно включенного насоса аналогично получим

$$S_{mi} = \frac{Q}{K_{\ell i} p'_{i-1} - p_{i \ \delta i}}.$$
 (6.42)


Рис.6.19. Совместность работы двух насосов

В качестве давления  $p'_{i-1}$  можно принимать максимальное выпускное давление предыдущего насоса. В тех случаях, когда характеристика насоса не описывается уравнением (4.1), совместность работы насосов можно определить графически (рис.6.19). По графическим характеристикам насосов  $S_{H1}$  и  $S_{H2}$  рассчитывают и строят их эффективные быстроты откачки:

$$S_{o1} = \frac{S_{i1}U_1}{S_{i1} + U_1}, \quad S_{o2} = \frac{S_{i2}U_2}{S_{i2} + U_2};$$
(6.43)

где U<sub>1</sub> - проводимость вакуумной системы от первого насоса до откачиваемого объекта; U<sub>2</sub> - проводимость вакуумной системы от второго насоса до первого.

При расчетах по формуле (6.43) следует иметь в виду, что проводимость *U* в общем случае является функцией давления.

Здесь же на рис.6.19 построена зависимость быстроты натекания и газовыделения от давления в откачиваемом объекте:  $S_Q = Q / p$ . Точка пересечения кривых  $S_{o1}$  и  $S_Q$  соответствует установившемуся режиму работы первого насоса. Давление в точке пересечения должно быть равно рабочему давлению первого насоса. Аналогично по пересечению кривых  $S_{o2}$  и  $S_Q$  можно найти рабочее давление второго насоса. Если оно меньше, чем максимальное выпускное давление первого насоса, то насосы работают совместно.

Из рис.6.19 легко определить возможность запуска системы. Условием запуска системы можно считать отсутствие двойного пересечения кривых  $S_Q$  и  $S_{o1}$  в области возможных входных рабочих давлений. Для  $S_Q$ ' запуск системы невозможен.

В установках с переменным газовыделением и натеканием представляет интерес нахождение области совместной работы двух последовательно соединенных насосов по кривой Q = f(p). Нахождение области совместной работы насосов удобно делать графически (рис.6.20). Считаем, что выполняется условие сплошности потока

$$Q_1 = Q_2$$

где  $Q_1$  -производительность откачки первого насоса в вакуумной камере;  $Q_2$  - производительность откачки второго насоса в сечении выхлопного патрубка первого насоса.

Значения  $Q_1$  и  $Q_2$  в функции давления можно рассчитать, воспользовавшись кривыми эффективной быстроты откачки насосов (см. рис.6.19), по формулам :

$$Q_1 = S_{o1}p; \quad Q_2 = S_{o2}p.$$

Если при максимальной производительности первого насоса второй насос обеспечивает на выхлопном патрубке меньшее Драб первого насоса давление, максимального выпускного давления первого насоса, то они всегда работают совместно. Рабочее давление второго насоса  $p_{2},$ соответствующее максимальной производительности системы, находятся из уравнения



Рис.6.20. Область совместной работы насосов

$$(Q_1)_{\max} = Q_2(p_2),$$

которое удобно решить графически, проводя на рис.6.20 прямую, параллельную оси p (показана стрелкой), от максимума кривой  $Q_1(p)$  до пересечения с кривой  $Q_2(p)$ . Точка пересечения определяет значение  $p_2$ . Если  $p_2 < p_{M1}$  ( $p_{M1}$  - максимальное выпускное давление первого насоса), то обеспечена полная совместность работы насосов. При  $p_2 \ge p_{M1}$  совместность работы насосов сохраняется только в диапазоне давлений от  $p_{pa6}$  до  $p_{max}$  и потоков от  $Q_{pa6}$  до  $Q_{max}$ .

Нахождение  $p_{\text{max}}$  и  $Q_{\text{max}}$  производится обратным построением, показанным стрелками на рис.6.20, начиная от давления  $p_{\text{M1}}$ . Если суммарный поток превысит  $Q_{\text{max}}$ , то в вакуумной камере произойдет скачкообразное повышение давления от  $p_{\text{max}}$  до  $p_{\text{M1}}$ .

При последовательном соединении вакуумных насосов между ними можно устанавливать дополнительные откачиваемые объекты, называемые форвакуумными баллонами. Форвакуумный баллон позволяет во время работы установки выключать на длительное время насос предварительного разрежения. Поток газа, откачиваемый высоковакуумным насосом, попадает в форбаллон и увеличивает в нем давление от минимального  $p_{\rm M}$ , которое достигается при работающем форвакуумном насосе, до максимального  $p_{\rm K}$ , близкого к максимальному выпускному давлению высоковакуумного насоса. Промежуток времени, в течение которого может быть отключен форвакуумный насос, удобно выбирать равным времени стационарного режима работы установки. Если весь поток газа, проходящий через высоковакуумный насос, идет на повышение давления в форбаллоне, то можно записать уравнение сохранения массы

$$Qt' = V_{\phi}(p_{\kappa} - p_{\mu}), \qquad (6.44)$$

где  $V_{\phi}$  - объем форбаллона; t' - время работы после отключения форвакуумного насоса.

Объем форбаллона из полученного уравнения

$$V_{\hat{\sigma}} = \frac{Qt'}{p_{\hat{e}} - p_i}.$$
(6.45)

Здесь  $p_{\kappa} = (0,3..0,5)p_{\rm B}$ ,  $p_{\rm H} = Q/(S_{\rm H}K_{\rm H})$ ; где  $p_{\rm B}$  -максимальное выпускное давление высоковакуумного насоса;  $S_{\rm H}$  - быстрота откачки форвакуумного насоса:  $K_{\rm H}$  - коэффициент использования форвакуумного насоса при откачке форбаллона до давления  $p_{\rm H}$ .

Если в форбаллоне расположить адсорбент, количество поглощенного газа в котором

$$A = K_{\rm T} p G,$$

где *G* - насыпной объем адсорбента, м<sup>3</sup>; *p* - давление, Па, *A* - количество поглощенного газа в м<sup>3</sup> Па;  $K_{\rm T}$  - коэффициент адсорбции при температуре *T* (для активированного угля СКТ  $K_{293} = 10^2 ..10^3$ ;  $K_{77} = 10^6 ..10^8$ ), то уравнение массового баланса для расчета форбаллона с адсорбентом записывают в таком виде:

$$Qt'' = V_{\Phi}(p_{\kappa} - p_{\mathrm{H}}) + \mathcal{K}_{\mathrm{T}}G(p_{\kappa} - p_{\mathrm{H}}),$$

откуда

$$V_{\hat{o}} = \frac{Qt'' - K_T G(p_{\hat{e}} - p_i)}{p_{\hat{e}} - p_i},$$
(6.46)

где t'' - время работы форбаллона с адсорбентом. Если весь форбаллон заполнен адсорбентом, то  $G = V_{\phi}$ . С учетом пористости адсорбента є уравнение сохранения массы

$$Qt'' = \varepsilon V_{\phi}(p_{\kappa} - p_{\mathrm{H}}) + K_{\mathrm{T}}V_{\phi}(p_{\kappa} - p_{\mathrm{H}}),$$

откуда объем форбаллона

$$V_{\hat{o}} = \frac{Qt''}{(p_{\hat{e}} - p_{\hat{i}})(K_T + \varepsilon)}.$$
(6.47)

Сравнивая (6.45) и (6.47), можно определить, во сколько раз увеличится продолжительность работы форбаллона при его заполнении адсорбентом

$$t'/t'' = K + \varepsilon,$$

где *t'* и *t''* - соответственно время работы форбаллона с адсорбентом и без адсорбента. Для T = 293K  $K_{293} = 10^2$ ;  $\varepsilon = 0.5$ ;  $t'/t'' = 10^2$ . Для T = 77K  $K_{77} = 10^6$ ;  $\varepsilon = 0.5$ ;  $t'/t'' = 10^6$ . Таким образом, применение адсорбента в форбаллоне при комнатной температуре уменьшает его объем в 100 раз, а при температуре жидкого азота - в  $10^6$  раз.

#### 6.6. Время откачки

На начальной стадии удаления газа из вакуумной системы и при изменении условий работы всегда происходит изменение во времени давлений в различных частях вакуумной системы, т. с. существует нестационарный режим работы. При этом режиме понятием проводимости трубопровода, введенным при постоянной разности давлений на его концах, уже пользоваться нельзя и расчеты существенно усложняются.

В некоторых случаях нестационарный режим работы вакуумной системы может быть сведен к квазистационарному режиму, когда время установления равновесного давления в трубопроводе значительно меньше, чем в откачиваемом объекте. Изменение давления в трубопроводе происходит значительно быстрее, чем в откачиваемом объекте. В этом случае в каждый момент времени распределение давления в вакуумной системе можно рассчитывать так же, как в стационарном режиме.

Математически условие существования квазистационарного режима может быть записано через соотношение постоянных времени:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{VU}{V_{\delta\,\delta}S_o} >> 1,\tag{6.48}$$

где  $\tau_1 = V/S_0$ ; V - объем откачиваемого объекта;  $S_0$  - эффективная быстрота откачки объекта;  $\tau_2 = V_{\rm Tp}/U$ ;  $V_{\rm Tp}$  и U - объем и проводимость трубопровода.

В связи с тем что  $S_0$  всегда меньше U, условие (6.48) с запасом будет выполняться, если

$$V/V_{\rm Tp} >> 1.$$
 (6.49)

При выполнении условия (6.48) трубопровод можно рассматривать как часть откачиваемого объекта, объем которого равен V+V<sub>тр</sub>.

Примером существования квазистационарного режима является откачка объекта от атмосферного до рабочего давления. В этом случае давление в откачиваемом объекте является функцией времени, но в каждый момент времени газовый поток на входе и выходе из трубопровода практически не изменяется.

Таким образом, можно различать три режима работы вакуумной системы: стационарный, нестационарный и квазистационарный. Для стационарного режима характерна неизменность во времени давлений и потоков во всех сечениях вакуумной системы. При откачке вакуумных систем с сосредоточенными параметрами выполняется условие сплошности потока. Нестационарный режим характеризуется зависимостью давлений и потоков в различных сечениях вакуумной системы от времени откачки. Квазистационарный режим - это разновидность нестационарного режима, при котором выполняется условие (6.48).

Определим время откачки объекта в условиях квазистационарного режима работы вакуумной системы. Будем считать, что условие (6.48) выполняется. Дополнительно предположим, что на внутренней поверхности нет адсорбированных газов, а течение газа происходит изотермически, т.е. pV= const. Продифференцировав это равенство, поделив обе его части на dt и учитывая, что dV/dt = S, получим

$$dt = -\frac{Vdp}{Sp}.$$
(6.50)

Проинтегрируем уравнение (6.50) в пределах от  $t_1$  и  $p_1$  до  $t_2$  и  $p_2$ :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = -V \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{Sp}.$$
(6.51)

В общем случае быстрота откачки объекта в подынтегральном выражении уравнения (6.51) есть разность эффективной быстроты откачки насоса и быстроты газовой нагрузки

$$S = S_{\rm H} K_{\rm M} - Q / p, \tag{6.52}$$

где  $S_{\rm H}$  - быстрота откачки насоса;  $K_u$  - коэффициент использования насоса,  $K_{\dot{e}} = \frac{U}{S_i + U}$ ;

U-проводимость; p - текущее давление; Q - суммарное газовыделение и натекание.



Рассмотрим частные случаи:

1. Пусть S = const. Такой случай возможен для высоковакуумных насосов при молекулярном режиме течения газа по трубопроводу, когда  $S_{\rm H} = \text{const}$ ;

U = const; Q = 0. Тогда из (6.51) время откачки объекта от давления  $p_1$  до  $p_2$ 

$$\Delta t_1 = 2.3 \frac{V}{S_i K_e} \lg \frac{p_1}{p_2}.$$
 (6.53)

Рис.6.21. Графоаналитический расчет времени откачки сосредоточенных объектов

2. Пусть  $S_{H} = \text{const}; U = Cp; Q = 0.$ 

Этот случай характерен для работы

механических насосов при вязкостном режиме течения газа по трубопроводу. Выражение (6.51) в этом случае будет иметь вид

$$\Delta t_{2} = -V \int_{p_{1}}^{p_{2}} \frac{S_{i} + \tilde{N}p}{S_{i}Cp^{2}} dp = \frac{V}{C} \left(\frac{1}{p_{2}} - \frac{1}{p_{1}}\right) + 2.3 \frac{V}{S_{i}} \lg\left(\frac{p_{1}}{p_{2}}\right). \quad (6.54)$$

В общем случае, когда упрощения недопустимы и *Q* нельзя считать равным нулю, можно пользоваться графоаналитическим методом расчета времени откачки.

Построим графики эффективной быстроты откачки вакуумных насосов в откачиваемом объеме и быстрот газовыделения и натекания  $S_Q = Q / p$  на рис.6.21, где предполагается, что в вакуумной системе имеется три последовательно работающих насоса.

Разобьем весь диапазон давлений от атмосферного до рабочего на несколько участков, в каждом из которых определим среднее значение:

$$S_{\vec{n}\,\vec{\partial}\,i} = \frac{(S_{\vec{y}\vec{\partial}i} - S_{Qi}) + (S_{\vec{y}\vec{\partial}\,(i+1)} - S_{Q(i+1)})}{2}.$$

Общее время откачки в этом случае может быть рассчитано как сумма времен откачки на отдельных участках. Применение (6.53)для каждого участка позволяет записать

$$\Delta t_{\tilde{a}} = 2,3V \left( \frac{1}{S_{\tilde{n}\,\delta 1}} \lg \frac{p_1}{p_2} + ... + \frac{1}{S_{\tilde{n}\,\delta i}} \lg \frac{p_i}{p_{i+1}} + ... + \frac{1}{S_{\tilde{n}\,\delta n}} \lg \frac{p_n}{p_{n+1}} \right),\tag{6.55}$$

где *n* - число участков, на которое разбит весь диапазон изменения давления в установке.

При отсутствии предварительного прогрева стенок вакуумной системы необходимо при определении времени откачки учитывать десорбцию паров воды при изменении давления в вакуумной камере. Для расчета времени откачки вакуумной системы, содержащей двухкомпонентную смесь сухого воздуха и паров воды, запишем два уравнения изотермического процесса откачки :

$$p_1 V_{\kappa} = \text{const}, \tag{6.56}$$

$$p_2 V_{\kappa} + a F_{\Gamma} = \text{const}, \tag{6.57}$$

где  $p_1$  - давление воздуха без учета давления паров воды, Па;  $p_2$  - давление паров воды в воздухе, Па; *a* - количество воды, адсорбированное на единице геометрической поверхности камеры, м<sup>3</sup>Па/м<sup>2</sup>;  $F_{\Gamma}$  - геометрическая площадь поверхности камеры, м<sup>2</sup>;  $V_{\kappa}$  - объем камеры, м<sup>3</sup>.

Продифференцируем уравнения (6.56), (6.57) и разделим их на *dt*. Считая, что адсорбционное равновесие устанавливается мгновенно (см. §2.7), получим

$$V_{\hat{e}} \frac{dp}{dt} + S_o p + F_{\tilde{a}} \frac{da}{dt} = 0, \qquad (6.58)$$

$$V_{\hat{e}} \frac{dp_1}{dt} + S_o p_1 = 0, (6.59)$$

где  $S_0$  - эффективная быстрота откачки насоса, м<sup>3</sup>/с.



Рис.6.22. Кривые откачки паров воды из вакуумной камеры при температуре 298 К: a) 1 – v=1,f=0; 2 – v=1,f=1; 3 – v=10,f=1; 4 – v=20,f=1; б) 1 – v=1,f=0; 2 – v=1,f=1; 3 – v=1,f=100

Подставляя в уравнение (6.58) выражение  $a=a_{M}dp^{m}$  в соответствии с уравнением Френдлиха (1.57) после интегрирования при условии  $S_{0} = \text{const}, t = 0, p = p_{0}, a=a_{M}d(p_{0})^{m}$  получим

$$t = 2,3 \frac{V_{\hat{e}}}{S_{\hat{i}}} lg\left(\frac{p_0}{p}\right) + \frac{F_{\hat{a}}a_{\hat{i}} d \cdot m}{S_{\hat{i}}(1-m)} \left(p^{m-1} - p_0^{m-1}\right),$$
(6.60)

где  $p_0$  и p -начальное и конечное давления паров воды при откачке. Пользуясь уравнением (6.60), можно найти время откачки, необходимое для снижения давления паров воды в камере от начального давления до конечного. На рис.6.22, используя (6.60), построены кривые откачки паров воды для камер из нержавеющей стали. Коэффициенты изотермы адсорбции Френдлиха взяты из табл.1.4. Из приведенных кривых откачки для различных  $v = V_{\kappa} / S_o$  и  $f = F_{r} / S_o$  видно, что при больших временах откачки (рис. 6.22,а) ход кривых определяется только десорбционным газовыделением, описываемым вторым слагаемым в

(6.60). Сильное влияние на характер кривых откачки оказывает параметр  $f = F_{\Gamma}/S_o$ (рис.6.22,б). Для большинства вакуумных камер v < 10 и первое слагаемое в (6.60) влияет только на первые 100 с откачки. При v < 10 и  $p < p_{H}$  выражение (6.60) можно упростить.

$$t = \frac{F_{\tilde{a}} \cdot a_i d \cdot m}{S_o (1 - m) p^{1 - m}}.$$
(6.61)

Решая это уравнение относительно р, получим

$$p = \left(\frac{F_{\tilde{a}} \cdot a_i \cdot d \cdot m}{S_o(1-m)t}\right)^{\frac{1}{1-m}}.$$
(6.62)

Уравнение (6.62) при больших временах откачки в логарифмических координатах *lgp* и *lgt* можно использовать для определения коэффициентов *d* и *m* из кривой откачки.

Удельное десорбционное газовыделение при *v* < 10 и *p* < *p*<sub>*h*</sub> определяется производительностью откачки.

$$q = \frac{p \cdot S_{o}}{F_{\tilde{a}}} = \left(\frac{a_{i} \cdot d \cdot m}{m-1}\right)^{\frac{1}{1-m}} \frac{(F_{\tilde{a}} / S_{o})^{\frac{m}{1-m}}}{t^{\frac{1}{1-m}}}.$$
(6.63)



Для паров воды на нержавеющей стали при комнатной температуре из (6.61), используя табл.1.4, получим

$$t = 8.6.10^{-3} \frac{F_{\tilde{a}}}{\mathbf{S}_{o} \cdot p^{0.7}} \quad . \tag{6.64}$$

Кривую откачки (6.62) можно в этом случае записать в виде

$$p = 10^{-3} \frac{(F_{\tilde{a}} / S_o)^{1,43}}{t^{1,43}}.$$
 (6.65)

Удельное десорбционное газовыделение (6.63) будет зависеть от  $f = F_{r}/S_{o}$  и времени откачки.

$$q = 10^{-3} \frac{(F_{\tilde{a}} / S_o)^{0.43}}{t^{1.43}}.$$
 (6.66)

Рис.6.23. Кривые откачки паров воды из вакуумной камеры (v=10, f=1) при различных температурах: 1 – 273 K, 2 – 298 K, 3 -398 K, 4 – 498 K, 5 – 598 K.

При высоких температурах влияние

десорбционного газовыделения становится менее

заметным. Кривые откачки паров воды из вакуумной камеры, изготовленной из нержавеющей стали, в соответствии с коэффициентами изотерм адсорбции при различных температурах (таб.1.4) показаны на рис. 6.23. Определим время откачки в нестационарном режиме для трубопровода с распределенным объемом без учета газовыделения с его стенок. Один конец трубопровода закрыт заглушкой, а другой присоединен к насосу с очень большой быстротой откачки, т. е. в открытом сечении трубопровода давление можно считать равным нулю.

Разность газовых потоков, проходящих через сечения трубопровода, отстоящие на dx, определяет скорость удаления газа из его объема между выделенными сечениями:

$$Fdx\frac{\partial p}{\partial t} = -Ul\frac{\partial p}{\partial x} + Ul\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}dx\right),$$

где *F* - площадь поперечного сечения трубопровода; *U*, *l* - проводимость и длина трубопровода. Записанное выражение после сокращения можно представить в виде дифференциального уравнения

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2},$$

имеющего при D = Ul/F следующие начальные и граничные условия:

$$t = 0, p = p_1;$$
  $x = 0, dp / dx = 0;$   $x = l, p = 0.$ 

Решение этого уравнения:

$$p = p_1 \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{2k-1} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2k-1)\frac{x}{l}\right] \times \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2k-1)^2\tau\right],$$

где  $\tau = Dt / l^2 = Ut / V$ ; V = Fl - объем трубопровода. Для  $\tau \ge 0,1$  и x = 0 это уравнение можно упростить:

$$p = p_1 \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\tau\right).$$

Отсюда следует выражение для времени снижения давления от  $p_1$  до  $p_2$  в закрытом сечении трубопровода:

$$\Delta t = \frac{V}{U} \lg \frac{p_1}{p_2}.$$

В том случае, когда U зависит от давления,

.

$$\Delta t = V \left( \frac{1}{U_1} \lg \frac{p_1}{p_2} + ... + \frac{1}{U_i} \lg \frac{p_i}{p_{i+1}} + ... + \frac{1}{U_n} \lg \frac{p_n}{p_{n+1}} \right),$$
(6.67)

где  $U_1,...U_i,...U_n$  - средние значения проводимости в соответствующих диапазонах давления.

#### 6.7. Себестоимость откачки

Себестоимость откачки камеры с эффективной быстротой 1 м<sup>3</sup>/с в течение 1 часа

$$\tilde{N} = \frac{(\tilde{N}_{i} + \tilde{N}_{a})/t_{o} + (\tilde{Q}_{i} + \tilde{Q}_{a})}{S_{i}};$$
(6.68)

здесь  $t_0$  - нормативный срок амортизационных отчислений, ч;  $S_0$ - эффективная быстрота откачки,  $C_{\rm H}$  - стоимость насоса, примем степенную зависимость  $C_{\rm H} = C1S{\rm H}^{K1}$ ;  $C_{\rm a}$  - стоимость трубопроводов, затворов, ловушек и другой вспомогательной арматуры, примем  $C_{\rm a} = C_2 U^{K2}$ ;  $3_{\rm H}$  - расходы в руб./час на эксплуатацию насоса, примем  $3_{\rm H} = C_3S_{\rm H}^{K3}$ ;  $3_{\rm a}$  - эксплуатационные расходы на арматуру, примем  $3_{\rm a} = C_4U^{K4}$ ; где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  и  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  - постоянные, зависящие от условий производства и эксплуатации вакуумного оборудования (рис. 6.24..6.28). С учетом записанных выражений уравнение (6.68) примет вид

$$C = A_1 K_{\mu}^{-K1} + A_2 (1 - K_{\mu})^{-K2} + A_3 K_{\mu}^{-K3} + A_4 (1 - K_{\mu})^{-K4},$$

где  $K_u$  – коэффициент использования насоса,  $K_u = S_o/S_H$ ,  $U = S_o/(1-K_u)$ .

$$A_{1} = \frac{C_{1}S_{o}^{K_{1}-1}}{t_{o}}; \qquad A_{2} = \frac{C_{2}S_{o}^{K_{2}-1}}{t_{o}}; \qquad A_{3} = C_{3}S_{o}^{K_{3}-1}; \qquad A_{4} = C_{4}S_{o}^{K_{4}-1}.$$

Стоимость вакуумных насосов зависит от их принципа действия и быстроты откачки. Наибольшую стоимость имеют турбомолекулярные насосы, наименьшую – пароструйные. Затраты на единицу быстроты откачки для различных насосов могут отличаться в 100 раз. Насосы, имеющие высокую стоимость, обеспечивают остаточную газовую среду, свободную от загрязнения парами рабочих жидкостей, и используются в тех случаях, когда применение дешевых насосов не обеспечивает качество выпускаемых изделий или условия проведения экспериментов.

Эксплуатационные расходы вакуумных насосов состоят из затрат на энергоносители, материалы, зарплату постоянному обслуживающему персоналу, профилактические осмотры и ремонт, вызванный отказами оборудования. Нормативный срок амортизационных отчислений  $t_0$  можно принять равным 10 годам, что при коэффициенте использования рабочего времени 0,85 и трехсменной работе соответствует 53520 ч.

Стоимость и эксплуатационные затраты могут быть подсчитаны с помощью коэффициентов *C*<sub>1</sub>..*C*<sub>4</sub> и *K*<sub>1</sub>..*K*<sub>4</sub>, приведенных в табл. 6.7 и 6.8.



Рис.6.24. Стоимость вакуумных насосов в зависимости от их быстроты откачки:

- 1 пароструйные,
- 2 геттероионные,
- 3 вращательные(старой серии),
- 4 вращательные (новой серии),
- 5 двухроторные,
- 6 -магниторазрядные,
- 7 турбомолекулярные



Рис.6.26. Эксплуатационные расходы вакуумных насосов:

- 1 вращательные (новой серии),
- 2 вращательные(старой серии),
- 3-двухроторные,
- 4 геттеро-ионные,
- 5 пароструйные,
- 6 магниторазрядные



# Рис.6.25. Эксплуатационные расходы вращательных вакуумных насосов:

- 1 -общие расходы,
- 2 расходы на электроэнергию,
- 3 расходы на зарплату,
- 4-расходы на материалы,
- 5 расходы на ремонт



Рис.6.27. Стоимость вакуумной арматуры в зависимости от проводимости:

1 - запорная арматура для высокого вакуума,

- 2 сорбционные ловушки,
- 3 запорная арматура для низкого вакуума,
- 4 азотные ловушки



Рис.6.28. Эксплуатационные расходы вакуумной арматуры в зависимости от проводимости:

- 1 запорная арматура
- 2 азотные ловушки
- 3 сорбционные ловушки

#### Таблица 6.7

Типы насосов	$C_1$	$K_1$	$C_3$	<i>K</i> <sub>3</sub>
	руб./(м <sup>3</sup> /с) <sup>-К1</sup>		руб.ч <sup>-1</sup> /(м <sup>3</sup> /с) <sup>-К3</sup>	
Пароструйные	260	0,478	5,40.10-2	0,330
Гетероионные	1680	0,900	1,52.10 <sup>-1</sup>	0,517
Вращательные	3130	0,500	3,17.10 <sup>-1</sup>	0,500
Двухроторные	2120	0,427	1,85.10 <sup>-1</sup>	0,451
Магниторазрядные	4650	0,206	3,16.10 <sup>-2</sup>	0,417

#### Стоимостные коэффициенты вакуумных насосов

Таблица 6.8

# Стоимостные коэффициенты вакуумной арматуры

Типы арматуры	$C_2$	<i>K</i> <sub>2</sub>	$C_4$	$K_4$
	руб./(м <sup>3</sup> /с) <sup>-К2</sup>		руб.ч <sup>-1</sup> /(м <sup>3</sup> /с) <sup>-К4</sup>	
Клапаны для низкого	125	0,117	8.10 <sup>-4</sup>	0,077
вакуума				
Клапаны для высокого	2160	0,500	8.10 <sup>-4</sup>	0,077
вакуума				
Ловушки азотные	100	0,200	3,4.10 <sup>-2</sup>	0,200
Ловушки	558	0,250	5.10-3	0,160
адсорбционные				

Стоимостные коэффициенты, приведенные на рис. 6.24..6.28 и в таб. 6.7 и 6.8, имеют тенденцию к возрастанию. Однако их относительные значения более устойчивы и могут применяться при приближенных расчетах.

#### 6.8. Проверочный расчет вакуумной системы

Проверочный расчет осуществляется для определения характеристик существующих вакуумных систем или уточнения проектировочных расчетов. Задачей проверочного расчета является определение распределения давления в известной вакуумной системе и времени ее откачки от атмосферного до рабочего давления. Исходными данными являются: 1) вакуумная схема, 2)характеристики вакуумной системы (в том числе откачиваемых объектов); 3) спецификации материалов, используемых в вакуумной системе, и их удельные газовыделения; 4) минимальный поток  $Q_{TH}$  - регистрируемый течеискателем; 5) число проверяемых соединений *m*; 6) технологическое газовыделение  $Q_{T}$ .

Проверочный расчет можно разделить на несколько этапов, выполняемых в такой последовательности: 1) определение собственного газовыделения; 2) расчет распределения давления; 3) графическая проверка правильности выбора насосов; 4) проверка возможности запуска установки; 5) определение области совместной работы вакуумных насосов; 6) расчет времени откачки и 7) расчет себестоимости откачки.

Собственное газовыделение вакуумной системы складывается из газопроницаемости и газовыделения конструкционных материалов, а также натекания через оболочку вакуумной системы. Оно определяет предельное давление, которое может быть получено в вакуумной установке при отсутствии в камере обрабатываемого объекта.

Газовыделение определяют для прогреваемых систем по (6.1) и табл. С19, а для непрогреваемых по (6.66). Газопроницаемость можно рассчитать по (6.2) и табл. С21. Для определения возможного натекания в вакуумную систему  $Q_{\rm H}$  воспользуемся формулой (6.3), в которой  $K_{\rm B}$  - вероятность существования течи, меньшей чувствительности течеискателя; ее можно выбрать равной 0,2; а число испытаний на герметичность обычно равно числу разборных и неразборных соединений *m*. Минимальный поток  $Q_{\rm Tu}$ , регистрируемый течеискателем, определяется типом течеискателя (табл. 6.5). При расчете следует определить отдельно собственное газовыделение трубопроводов и откачиваемого объекта. Если собственное газовыделение трубопроводов составляет не более 20% от тех же значений для откачиваемого объекта, то их можно просуммировать, считая, что весь газ выделяется в откачиваемом объекте. В этом случае расчет распределения давления по длине вакуумной системы будет выполняться с запасом, и можно рассматривать более простой случай вакуумной системы с сосредоточенными параметрами.

Общее газовыделение вакуумной системы в стационарном режиме работы складывается из собственного и технологического газовыделения:

 $Q = Q_{\rm c} + Q_{\rm T}.$ 

Давление во входном сечении вакуумного насоса запишем согласно (6.9):

$$p_{\rm Hi} = p_{\rm \pi pi} + Q / S_{\rm mi},$$
 (6.69)

где  $p_{\rm npi}$  и  $S_{\rm mi}$  - предельное давление и максимальная быстрота откачки соответствующего насоса.

Повышение давления в последующих элементах *i*-го участка вакуумной системы можно определить по потоку *Q* и проводимости *k* - го элемента *U*<sub>ki</sub>:

$$\Delta p_{\rm ki} = Q / U_{\rm ki}, \tag{6.70}$$

В местах, где по направлению потока имеются сужения трубопроводов, наблюдаются скачки давления  $\Delta p_i = Q / U_{oi}$ , где  $U_{oi}$  - проводимость *j*-го отверстия.

Давления в сечениях внутри участка вакуумной системы можно рассчитать по формуле

$$p_{ik} = p_{\pi p i} + Q / S_{m i} + Q / U_{k i}, \qquad (6.71)$$

Предельное давление  $p_{npi}$  может уменьшаться только на ловушке. Второе слагаемое в (6.71) постоянно, а третье при удалении от насоса только возрастает. На ловушке возможно как увеличение, так и снижение давления в зависимости от того, какое из слагаемых в (6.71) вносит наиболее существенный вклад в изменение давления. Примерный график распределения давления между насосом и откачиваемым объектом показан на рис. 6.29.

Полученные расчетом точки соединены прямыми линиями, что соответствует реальному распределению давлений в молекулярном режиме течения газа. В других режимах такой график можно рассматривать как упрощенный. Для описания распределения точного давления между граничными элементами вакуумной системы в вязкостном режиме нужно воспользоваться формулой (6.7).



Рис.6.29. Распределение давления в вакуумной системе

Распределение давления удобно строить отдельно для собственного газовыделения установки и общего газовыделения. Первое является характеристикой самой установки, а второе – характеристикой осуществляемого в ней технологического процесса. Графическая проверка выбора вакуумных насосов позволяет определить их рабочие давления. По графическим характеристикам насосов строятся их эффективные быстроты откачки. Для первого насоса в откачиваемом объекте, для второго – на выходе из первого насоса и т. д. в соответствии с (6.43). Пересечение этих кривых с кривой быстроты натекания S = Q / p определяет рабочие давления всех насосов (рис. 6.30).





Проверка возможности запуска установки осуществляется графически. Запуск установки возможен, если при всех давлениях в откачиваемом объекте выше рабочего быстрота натекания меньше, чем эффективная быстрота откачки насосов.

Совместность работы последовательно или параллельно включенных насосов обеспечивается, если давление в их выходных патрубках ниже максимальных выпускных давлений

этих насосов. Методика определения области совместной работы насосов по потокам или рабочим давлениям описана в параграфе 6.5. Возможна полная и частичная совместность их работы. При устойчивом газовыделении можно ограничиться частичной совместностью работы насосов. В вакуумных системах с переменным газовыделением, например в вакуумной металлургии, необходимо обеспечивать полную совместность работы насосов.

По данным, приведенным в параграфе 6.7 можно рассчитать себестоимость работы установки в течение часа  $C_{\rm q} = CS_{\rm o}$ , а в течение года при двухсменной работе  $C_{\rm r} = 4000CS_{\rm o}$ , где  $S_{\rm o}$  - быстрота откачки вакуумной камеры.

Проверочный расчет вакуумной системы в нестационарном режиме работы для определения времени откачки часто выполняется для вакуумных систем, спроектированных из условий стационарного режима работы. Необходимость такого расчета возникает также при проектировании новых вакуумных систем, работающих только в нестационарном режиме, в связи с малой точностью проектировочных расчетов.

Для такого расчета в качестве исходных данных следует задать: 1) вакуумную схему установки; 2) характеристики насосов: быстроту действия, предельное давление, давление запуска; 3) характеристики арматуры и трубопроводов; размеры и проводимости; 4) характеристики откачиваемых объектов: размеры и объем; 5) суммарное газовыделение и натекание при нестационарном режиме работы; б) рабочее давление.

Порядок расчета: 1) проверка условия квазистационарности; 2) построение графиков эффективной быстроты откачки насосов в откачиваемом объекте и быстроты натекания; 3) расчет времени откачки объекта до рабочего давления.

Условие квазистационарности (6.48) проверяется по характеристикам откачиваемого объекта и трубопроводов, которые имеются в исходных данных. В результате проверки этого условия уточняется характер нестационарного режима работы, что оказывает влияние на выбор расчетных формул для определения времени откачки. При квазистационарном режиме откачки сосредоточенных объемов можно пользоваться формулами (6.55), (6.60) и (6.61), а при откачке вакуумных систем с распределенным объемом – формулой (6.67).

Для определения времени откачки строят графики эффективной быстроты откачки всех насосов

$$S_{oi} = \frac{S_{ii}U_i}{S_{ii} + U_i}$$

в зависимости от давления для сечений входа в откачиваемый объект;  $S_{\rm Hi}$  - быстрота действия насоса (в зависимости от входного давления задается в виде графика);  $U_{\rm i}$  - проводимостъ вакуумной системы от *i*-го насоса до откачиваемого объекта (определяется по характеристикам арматуры и трубопроводов из исходных данных и в общем случае также является функцией давления).

Затем строят график быстроты газовыделения и натекания  $S_Q = Q / p$ , который в логарифмических координатах, если Q не зависит от давления, имеет вид прямой линии.

При выполнении условия квазистационарности расчет ведется по формуле (6.55) с разбивкой на участки с постоянным S<sub>cp</sub> в соответствии с рис.6.21.

Если условие квазистационарности не выполнено, то в молекулярно-вязкостом и вязкостном режимах можно воспользоваться графиком U(p), разделяя его на участки  $p_i..p_{i+1}$ , внутри которых используется среднее значение  $U_i$ ; расчет ведется по формуле (6.67).

Расчет времени работы форбаллонов без адсорбента осуществляется по формуле (6.45), которую можно представить в виде

$$t' = \frac{(0,5p_{a}S_{i}\hat{E}_{e} - Q)V_{o}}{QS_{i}\hat{E}_{e}}.$$

Если форбаллон полностью заполнен адсорбентом, то из (6.47) получим время работы форбаллона:

$$t'' = \frac{(0.5p_{\hat{a}} - Q/(S_{\hat{i}}\hat{E}_{\hat{e}}))(K_{T} + \varepsilon)V_{\hat{o}}}{Q}$$

где *К*<sub>т</sub> и ε - постоянная адсорбируемости и пористость адсорбента.



Рис.6.31. Расчетная схема централизованной откачки

В централизованных системах откачки одним насосом одновременно откачивается несколько объектов, подключенных к общему коллектору. Примером централизованной системы является подключение нескольких высоковакуумных насосов к одному форвакуумному насосу. Расчетная схема централизованной откачки показана на рис.6.31. Вакуумный насос через трубопровод длиной  $l_1$  и проводимостью  $U_1$  подключен к коллектору длиной  $l_k$ . Откачиваемые насосы с производительностями  $Q_1...Q_n$  соединены с коллектором через соединительные трубопроводы длиной  $L_1...L_n$  и характеризуются известными коэффициентами одновременности работы m и нестабильности рабочего давления  $g_1...g_n$ .

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

$$m \sum_{i=2}^{n} Q_{i} g_{i} = U_{2} (p_{2} - p_{1});$$
  

$$m \sum_{i=3}^{n} Q_{i} g_{i} = U_{3} (p_{3} - p_{2});$$
(6.72)

 $mQ_{n}g_{n} = U_{n}(p_{n} - p_{n-1}).$ 

Систему (6.72) можно переписать в другом виде:

$$p_{2} = p_{1} + \frac{m}{U_{2}} \sum_{i=2}^{n} Q_{i} g_{i},$$

$$p_{3} = p_{1} + m \left( \frac{1}{U_{2}} \sum_{i=2}^{n} Q_{i} g_{i} + \frac{1}{U_{3}} \sum_{i=3}^{n} Q_{i} g_{i} \right);$$
(6.73)

$$p_n = p_1 + m \left( \frac{1}{U_2} \sum_{i=2}^n Q_i g_i + ... + \frac{Q_n g_n}{U_n} \right).$$

.....

При заданных размерах коллектора, определяющих проводимости  $U_2 ... U_n$ , потоках  $Q_2 ... Q_n$  и давлении в одной из точек подключения откачиваемых объектов (обычно  $p_n$ ) из системы (6.73) могут быть определены давления во всех остальных сечениях коллектора, в том числе и давление  $p_1$ .

Давление *p*<sub>n</sub> при централизованной откачке насосов всегда должно быть меньше максимального выпускного давления высоковакуумного насоса. Быстрота действия насоса (максимальная)

$$S_m = \frac{Q_c}{K_{\dot{e}} p_1 - p_{\dot{i}} \delta}$$

где  $Q_{\rm c}$  - суммарная производительность откачки,

$$Q_c = m \sum_{i=1}^m Q_i g_i;$$

где  $K_{\rm u}$  - коэффициент использования насоса;  $p_1$  - давление в месте подключения первого откачиваемого объекта;  $p_{\rm np}$  -предельное давление насоса. Проводимость трубопровода

$$U_1 = K_{\mathrm{u}}S_{\mathrm{m}}/(1-K_{\mathrm{u}}).$$

По найденному значению проводимости  $U_1$ , длине трубопровода  $l_1$ , предварительно определив режим течения газа, можно найти диаметр первого трубопровода  $d_1$ . Диаметры соединительных трубопроводов длиной  $L_1..L_n$  определяют из проводимостей по заданному перепаду давления между коллектором и откачиваемыми объектами  $U_i' = Q_i / \Delta p_i$ .

## 6.9. Пример проверочного расчета

Для проверочного расчета выберем простейшую вакуумную систему, показанную на рис. 6.32,а. Откачиваемый объект и трубопровод изготовлены из нержавеющей стали. Вакуумная система не прогревается и находится в атмосфере азота при давлении  $10^5$  Па и температуре 300 К. Проверка на герметичность осуществляется галогенным течеискателем с атмосферным преобразователем. Число одновременно проверяемых соединений m = 1. Технологическое газовыделение отсутствует.



Рис.6.32. Проверочный расчет вакуумной системы в стационарном режиме: а - вакуумная система, б - распределение давления

Суммарная поверхность откачиваемого объекта и трубопровода, изображенных на рис. 6.32,а, может быть рассчитана по формуле

$$F = \sum_{i=1}^{4} F_i = 4,7D^2 + 2,4D_{\hat{a}}^2,$$

где D и D<sub>в</sub> - в метрах.

Определим собственное газовыделение после длительной откачки. По формуле (6.1) и табл. С19 находим удельное газовыделение  $q_{\Gamma}$ , а по (6.2) - удельную газопроницаемость  $q_{\Pi}$ .

$$Q_{\Gamma} + Q_{\Pi} = (q_{\Gamma} + q_{\Pi})F = (q_{\Gamma} + q_{\Pi})(4,7D^2 + 2,4D_{B}^2),$$

По типу течеискателя из табл. 6.5 находим минимальный поток, регистрируемый течеискателем:  $Q_{\tau \mu} = 10^{-7} \text{ м}^3$ .Па/с. Всего проверяемых соединений десять (два в трубопроводе и восемь в камере). Число испытаний на герметичность равно числу соединений (m = 10). По формуле (6.3) получим

$$Q_{\rm H} = 0,2.10.Q_{\rm TM} = 2.10^{-7} {\rm m}^3.{\rm \Pi a/c}.$$

Собственное газовыделение установки

$$Q_{\rm c} = Q_{\rm r} + Q_{\rm H} + Q_{\rm H} = (q_{\rm r} + q_{\rm I})(4,7D^2 + 2,44D_{\rm B}^2) + 2.10^{-7} {\rm m}^3.{\rm Пa/c}.$$
  
Для  $q_{\rm r} + q_{\rm II} = 2.10^{-4} {\rm m}^3.{\rm \Pi a} / {\rm (m}^2.{\rm c}), \quad D = 1 {\rm m}, \quad D_{\rm B} = 0,5 {\rm m}$  получим  
 $Q_{\rm c} = 2.10^{-3} {\rm m}^3.{\rm \Pi a/c}.$ 

Рассчитаем распределение давления. В схеме рис. 6.32,а расчет проведем для двух сечений вакуумной системы: одно - между откачиваемым объектом и трубопроводом, второе

 между насосом и трубопроводом. Давление в сечении между насосом и откачиваемым объектом вакуумной системы с сосредоточенными параметрами рассчитываем по формуле (6.69):

$$p_{\rm H} = p_{\rm \pi p} + Q_{\rm c} / S_{\rm m}.$$

Проводимость трубопровода круглого поперечного сечения при молекулярном режиме течения  $U_{\rm Tp} = 121 D_{\rm B}^{2}$ . Согласно (6.70), давление на конце трубопровода

$$p_{\kappa} = p_{\rm H} + \Delta p_{\kappa} = p_{\rm H} + Q_{\rm c} / (121 D_{\rm B}^{-2}).$$

Проводимость входного отверстия из откачиваемого объекта в трубопровод при молекулярном режиме

$$U_{i\hat{o}} = \frac{91D_{\hat{a}}^2}{1 - D_{\hat{a}}^2 / D^2}.$$

С учетом (6.70) запишем выражение для давления в откачиваемом объекте:

$$p_{o} = p_{\hat{e}} + \Delta p_{j} = p_{\hat{e}} + \frac{Q_{c}(1 - D_{\hat{a}}^{2} / D^{2})}{91D_{\hat{a}}^{2}} =$$
$$= P_{i\bar{o}} + Q_{c} \left(\frac{1}{S_{m}} + \frac{1}{121D_{\hat{a}}^{2}} + \frac{1 - D_{\hat{a}}^{2} / D^{2}}{91D_{\hat{a}}^{2}}\right)$$

На рис. 6.32,6 представлено распределение давления по длине трубопровода при  $p_{\rm np} = 10^{-5}$  Па,  $S_{\rm m} = 1$  м<sup>3</sup>/с. Давление в откачиваемом объекте  $p_{\rm o} = 2.10^{-3}$  Па.

Время откачки до давления 2.10<sup>-3</sup> Па рассчитаем по формуле (6.64) с учетом того, что в данном случае быстрота откачки камеры равна быстроте откачки насоса.

$$t = 8, 6.10^{-3} \frac{F}{S_i p^{0.7}} = 420 c.$$

#### 6.10. Контрольные вопросы

6.1. Какие виды газовой нагрузки возникают при откачке вакуумных систем?

6.2. Почему производительность натекания при расчетах вакуумных систем считается постоянной?

6.3. Как уменьшить время откачки вакуумной камеры, на стенках которой адсорбированы пары воды?

6.4. Как характеристики вакуумной системы влияют на скорость десорбционного газовыделения?

6.5. Как влияет величина конечного давления на время откачки вакуумных камер при высоком вакууме?

6.6. Какие допущения принимаются при расчете вакуумных систем с сосредоточенными параметрами?

6.7. Из каких соображений определяется диаметр и длина эквивалентного трубопровода для участка вакуумной системы?

6.8. Как зависит проводимость трубопровода от его геометрических размеров при различных режимах течения газа?

6.9. В каких случаях применяется обходная откачка?

6.10. Каковы условия совместной работы последовательно включенных вакуумных насосов?

6.11. Как графически определить область потоков или давлений, в которой обеспечивается совместность работы вакуумных насосов?

6.12. При каких условиях ловушка повышает общее давление?

6.13. Какой источник газовыделения учитывается только при работе вакуумных систем в нестационарном режиме?

6.14. Какова задача проверочного расчета вакуумных систем?

6.15. Критерий выбора последовательного или параллельного включения вакуумных насосов?

6.16. В каком случае целесообразно применение централизованных вакуумных систем?

6.17. Какие существуют разновидности централизованных форвакуумных систем?

6.18. Для чего применяется прогрев элементов сверхвысоковакуумных систем?

6.19. Каково назначение форбаллона?

6.20. В связи с чем увеличивается эффективность работы форвакуумного баллона, заполненного адсорбентом?

#### 6.11. Задачи

1. Какой должна быть проводимость вакуумной системы между насосом (S  $_{\rm m}$  = 2  ${\rm m}^3/{\rm \,c},$ 

 $p_{np} = 10^{-5}$  Па) и вакуумной камерой (диаметр 1 м, длина 0,5 м) при удельном газовыделении материала камеры  $10^{-4}$  (м<sup>3</sup>.Па) / (м<sup>2</sup>.с), чтобы получить давление в вакуумной камере  $2.10^{-4}$  Па ?

2. Какое давление в стационарном режиме работы вакуумной системы установится в вакуумной камере диаметром 1м и длиной 2 м, если удельное газовыделение материала, из которого изготовлена камера  $10^{-4}$  (м<sup>3</sup>.Па) / (м<sup>2</sup>.с), а камера соединена с насосом (S<sub>m</sub> = 0,1 м<sup>3</sup> / с, p<sub>пp</sub> =  $10^{-6}$  Па) через трубопровод 160 мм и длиной 0,2 м?

3. Определить быстроту действия насоса, который должен быть присоединен к трубопроводу диаметром 0,1 м и длиной 1 м, чтобы при T = 293 К и высоком вакууме обеспечить

эффективную быстроту откачки вакуумной камеры 50 л / с.

4. Рассчитать давления в начале и конце круглого трубопровода радиусом 10 мм и длиной 2 м, откачиваемого вакуумным насосом ( $S_m = 0,1 \text{ m}^3 / \text{ c}, p_{np} = 10^{-5} \text{ Па}$ ), если газовый поток, входящий в трубопровод равен  $10^{-5}$  ( $\text{m}^3.\Pi a$ ) / с, а удельное газовыделение из материала трубопровода  $10^{-4}$  ( $\text{m}^3.\Pi a$ ) / ( $\text{m}^2.c$ ).

- 5. Рассчитать давление в середине круглого трубопровода диаметром 5 мм и длиной 1 м, откачиваемого с одной стороны вакуумным насосом (S<sub>m</sub> = 0,1 м<sup>3</sup> / с, p<sub>пp</sub> = 10<sup>-5</sup> Па, если входящий в него газовый поток равен 10<sup>-5</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / с, а удельное газовыделение из материала трубопровода 10<sup>-4</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / (м<sup>2</sup>.с).
- 6. Откачиваемый объект диаметром 500 мм подключен через трубопровод диаметром 200 мм к насосу с быстротой откачки 0,1 м<sup>3</sup> / с и предельным давлением 10<sup>-5</sup> Па. Определить установившееся после прогрева давление в откачиваемом объекте, если поток газовыделения воздуха при 298 К в откачиваемом объекте равен 10<sup>-5</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / с, а длина трубопровода равна 500 мм.
- 7. Определить время работы форвакуумного баллона объемом 300 л при газовом потоке, выходящем из высоковакуумного насоса и равном 10<sup>-3</sup> (м<sup>3</sup>.Па) / с, если форвакуумный насос с быстротой откачки 2 л / с и предельным давлением 10<sup>-1</sup> Па подключен к баллону через трубопровод диаметром 32 мм, длиной 1 м, а максимальное выпускное давление высоковакуумного насоса равно 10 Па.

- 8. Рассчитать время откачки распределенного вакуумного объекта в виде заглушенной с одной стороны трубы диаметром 0,1 м, длиной 0,5 м для снижения максимального давления от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>-5</sup> Па, если откачка осуществляется насосом с быстротой откачки 10<sup>3</sup> л / с и предельным давлением 10<sup>-7</sup> Па.
- Определить вероятность прохождения молекулами газа трубопровода, имеющего диаметр 0,1 м и длину 0,5 м, в середине которого имеется диафрагма диаметром 0,05 м при молекулярном режиме течения газа.
- 10. Определить время откачки вакуумной камеры объемом 300 л и площадью внутренней поверхности 4 м<sup>2</sup> от атмосферного давления до 10<sup>-4</sup> Па через трубопровод диаметром 0,05 м длиной 2 м насосом с быстротой откачки 5 л/с и предельным давлением 10<sup>-6</sup> Па.

### Глава 7. Синтез вакуумных систем

#### 7.1. База данных элементов вакуумных систем

База данных элементов вакуумных систем - это набор записей, которые можно просматривать, редактировать, сортировать и удалять при помощи ЭВМ. База данных содержит условно постоянную и переменную информацию. Постоянная информация содержит стандарты, нормали и архивы. Переменная информация включает в себя сведения о технических и коммерческих характеристиках элементов вакуумных систем.

База построена на основе иерархической и реляционной моделях данных. На первом иерархическом уровне расположены машины, установки, агрегаты, насосы, ловушки, клапаны, элементы трубопроводов, вакуумметры, анализаторы и т.д. Второй уровень классифицирует элементы первого уровня по принципу действия, третий - по типоразмерам, четвертый - по виду информации. Следующий реляционный уровень содержит общие сведения, принцип действия, фотосляйд, таблицы технических и коммерческих характеристик, аппликации и установочный чертеж (рис.7.1).

Специальная программа позволяет синтезировать в процессе ответа на запрос параметрические элементы, например трубопроводы, позволяя значительно уменьшить объем сохраняемой информации. База данных может работать в информационно-справочном и программном режимах. В программном режиме используются локальные базы данных с уменьшенным количеством информации. Для их создания используются файлы прямого доступа. Локальные базы данных не требуют значительных ресурсов и позволяют создавать эффективные программные средства, но не обладают гибкостью, необходимой для частой замены информации.

Свойства материалов представлены в базе данных таблицами сорбционных и диффузионных характеристик конструкционных материалов: сталей, цветных металлов, резины, керамики, стекла, полимеров и т.д. для различных газов. Работать с базой данных могут разные категории пользователей. Диалог осуществляется с помощью многоуровнего меню с диагностикой ошибочных ситуаций.

271



Рис.7.1. База данных элементов вакуумных систем

Разработчики программного обеспечения имеют доступ к формату данных и могут создавать свои ограниченные локальные базы. Проектировщики вакуумного оборудования могут редактировать, удалять и добавлять новые записи. Пользователи, использующие базу данных как информационно-справочную систему, не имеют возможности изменять содержание базы данных.

#### 7.2 Структурный синтез вакуумных систем методом перебора

#### вариантов

Структурный синтез является начальным этапом проектирования и во многом определяет его качество. Исходные данные для его осуществления определяются техническим заданием. Результаты структурного синтеза могут быть представлены в виде структурной схемы, которая содержит информацию о типах используемых элементов и способе их соединения. Элементы вакуумных систем изображаются на структурной схеме в соответствие с условными обозначениями (табл.П14). Функциональные связи изображаются тонкими линиями и указывают направление газового потока.

Наиболее простым и чаще всего применяемым на практике методом структурного синтеза является метод перебора вариантов. При ручном проектировании без помощи ЭВМ удается просмотреть обычно 2..4 варианта. Качество решения зависит от состава отобранных кандидатов. Увеличение числа кандидатов упрощает процедуру их отбора. Применение ЭВМ повышает многократно производительность. Методом перебора можно выбрать наилучший вариант из существующих. Создать принципиально новую вакуумную систему при этом нельзя. На рис. 7.2 показан набор кандидатов для выбора вакуумной системы.

Реализация метода перебора начинается с формулировки критерия выбора наилучшего кандидата. Однокритериальный выбор предусматривает назначение наиболее важного параметра вакуумной системы. Для установок с малым газовыделением это может быть предельное давление. В технологических установках наиболее важным параметром является рабочее давление, для специальных объектов - надежность или время откачки. Универсальным критерием выбора может служить требование экономической эффективности, наиболее простым из которых является минимальная себестоимость. Задача может ставиться при наличии или без ограничений.

Рассмотрим постановку задачи синтеза вакуумной схемы по критерию минимальной себестоимости при ограничениях по предельному давлению и быстроте откачки. В техническом задании указывается требуемая производительность откачки Q и рабочее давление p. Состав выбранной базы данных накладывает ограничения на предельное давление и быстроту откачки.

273



Рис.7.2. Вакуумные системы на базе: а - пластинчато-роторного насоса, б - цеолитового насоса, в - двухроторного насоса, г - криогенного насоса

Проверка выполнения ограничений для *i*-го кандидата может быть сделана по каждому из параметров

$$p_{\rm npi} < p; \quad S_{\rm oi} > Q / (p - p_{\rm npi}),$$
 (7.1)

Из (7.1) очевидно, что ограничения связаны между собой функциональной зависимостью. Задача синтеза оказывается неразрешимой, если в базе кандидатов нет ни одного, удовлетворяющего условию (7.1). Из кандидатов, прошедших проверку по (7.1), выбирается тот, который требует минимальных затрат.

При многокритериальном синтезе для оптимизации можно использовать аддитивные или мультипликативные целевые функции. Целевая минимизируемая аддитивная функция выбора по себестоимости и надежности может быть записана в следующем виде:

$$Z_{a} = \frac{b_{1}}{Z_{i1}} Z_{1} + b_{2} \left( 1 - \frac{Z_{2}}{Z_{i2}} \right),$$
(7.2)

где  $Z_1$  и  $Z_2$  - соответственно себестоимость и надежность,  $b_1$  и  $b_2$  - весовые коэффициенты,  $Z_{\rm H1}$  и  $Z_{\rm H2}$  - нормирующие делители. Существует несколько способов назначения нормирующих делителей: директивный (по техническому заданию заказчика), максимальный (максимальные значения параметров элементов из базы данных ), разностный (по разности максимальных и минимальных значений тех же параметров). В основе аддитивной целевой функции лежит принцип абсолютной компенсации критериев оптимизации.

Для мультипликативной целевой минимизируемой функции имеем

$$Z_{i} = \frac{\left(Z_{1} / Z_{i}\right)^{b_{1}}}{\left(Z_{2} / Z_{i}\right)^{b_{2}}},$$
(7.3)

где обозначения те же, что и в формуле (7.2). В основе мультипликативной функции лежит принцип относительной компенсации критериев оптимизации. Выбор принципа компенсации критериев и вида целевой функции осуществляется проектировщиком. При затруднении выбора на начальном этапе проектирования делаются два проектных решения, лучшее из которых выбирается по дополнительным критериям.

Весовые коэффициенты задаются непосредственно проектировщиком и нормируются к единице по соотношению

$$\sum_{k=1}^{n} b_k = 1,$$

275

где n - число нормирующих коэффициентов. Для большого числа критериев удобно использовать метод попарных сравнений в его простейшей модификации с использованием бинарных матриц. Пусть задано 5 критериев оптимизации  $Z_1...Z_5$ . Проектировщик выбирает парное соотношение

$$a_{kj} = \begin{cases} 1 \\ . \\ 0 \end{cases}$$

Если *k*-ый критерий важнее, чем *j*-ый, то  $a_{kj} = 1$ , если наоборот то  $a_{kj} = 0$ . Результаты выбора записываются в таблицу, пример которой приведен ниже.

Таблица 7.1

j	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$b_{\rm k}$
k						
$Z_1$	-	0	1	0	0	0,1
$Z_2$	1	-	1	1	0	0,3
$Z_3$	0	0	-	0	1	0,1
$Z_4$	1	0	1	-	0	0,2
$Z_5$	1	1	0	1	-	0,3

Бинарная матрица

В последнем столбце таблицы 7.1 по формуле

$$b_{k} = \frac{\sum_{j=1}^{5} a_{kj}}{\sum_{k=1}^{5} \sum_{j=1}^{5} a_{kj}}$$
(7.4)

в результате аддитивной нормировки рассчитываются весовые коэффициенты *b*<sub>k</sub>, сумма которых равна единице.

При многокритериальном синтезе возникает проблема использования коэффициентов, не имеющих числовых значений. Например, если в число критериев оптимизации включить уровень шума, по которому в базе данных нет сведений.

Задать числовые значения можно методом экспертных оценок, усредняя результаты по числу экспертов. Экспертные оценки, использующие четкую логику, приводят к бинарным матрицам (табл.7.1). Использование нечеткой логики позволяет более полно учесть особенности сравниваемых кандидатов. В этом случае назначаются оценки

a <sub>kj</sub>	Значение	Примечание
1	одинаковы	<i>k</i> -ый не лучше <i>j</i> -го
3	немного лучше	<i>k</i> -ый немного лучше <i>j</i> -го
5	лучше	<i>k</i> -ый лучше <i>j</i> -ый
7	значительно лучше	<i>k</i> -ый значительно лучше <i>j</i> -го
9	много лучше	<i>k</i> -ый много лучше <i>j</i> -го

Экспертные оценки

Возможны оценки 2, 4, 6, 8 в качестве промежуточных. Обратные оценки

$$a_{jk} = \frac{1}{a_{kj}}.$$

Все оценки заносятся в таблицу, аналогичную табл.7.1. Нормированные значения критериев рассчитываются по формуле

$$\frac{Z_{\hat{e}}}{Z_{\hat{i}\hat{e}}} = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{kj}}{\sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_{kj}}.$$
(7.5)

Для определения устойчивости экспертных оценок можно воспользоваться критерием состоятельности матрицы попарных сравнений

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n},$$

где  $\lambda_{max}$  - максимальное собственное число матрицы, *n* - число кандидатов. Если *CI* < 0,1; то можно считать, что оценки состоятельные в смысле того, что результирующий вектор нечувствителен к небольшим изменениям входных данных. Когда *CI* > 0,1; то матрица сравнения несостоятельна и эксперту нужно снова продумать свои ответы.

#### 7.3. Структурный синтез по типовым образам

Структурный синтез вакуумных систем может осуществляться методом типовых образов. Этот метод широко используется при синтезе разнообразных технических объектов и имеет две разновидности: метод усечения и метод обогащения. В методе усечения типовой образ выбирается с максимальным набором элементов, а в методе обогащения - с минимальным.



Рис.7.3. Максимальный набор элементов при проектировании вакуумной системы методом усечения типового образа

На рис.7.3 показан максимальный набор элементов для проектирования трех участковой схемы методом усечения типового образа. Каждый участок содержит 8 элементов: насос, ловушка, два затвора и четыре трубопровода. Насос является обязательным элементом. Каждый из остальных семи элементов может отсутствовать. Некоторые типы насосов не нуждаются в ловушке. Отсутствие ловушки приводит к удалению одного из затворов и нескольких трубопроводов. Синтез начинается с первого участка, обеспечивающего наиболее низкое рабочее давление. Выбор насоса осуществляется описанным ранее методом перебора. Затем аналогично выбираются оставшиеся элементы первого участка.



Рис.7.4. Структурная вакуумная схема

Если максимальное выпускное давление насоса первого участка меньше атмосферного давления, то производится выбор второго участка и т.д. Соединение участков может быть последовательным и параллельным в зависимости от типа насоса предыдущего участка. Для насосов компремирующего типа участки соединяются последовательно, а для сорбционных насосов - параллельно. Из каждой пары трубопроводов X'<sub>21</sub> и X"<sub>21</sub>; X'<sub>31</sub> и X"<sub>31</sub> (рис. 7.3) выбирается лишь одна в зависимости от способа соединения участков.

Результаты синтеза структурной вакуумной схемы могут быть представлены в виде матрицы ( $\mathbf{X}_{ij}$ ), где i = 1..3, j = 1..8. Номер строки матрицы соответствует номеру участка. Численные значения элементов матрицы - коды типов выбранных элементов. Пример структурной схемы, разработанной методом усечения, показан на рис. 7.4.

# 7.4. Параметрический синтез вакуумной системы по коэффициенту использования вакуумного насоса

Параметрический синтез отличается от структурного тем, что дополнительно к типу элемента определяется его типоразмер. Для трубопроводов определяется внутренний диаметр и длина. Результаты параметрического синтеза представляются в виде принципиальной схемы. Правила оформления принципиальных схем требуют обозначения элементов буквенным кодом, содержащим одну или несколько прописных букв латинского алфавита. Порядковые номера присваиваются в направлении сверху вниз и слева направо. Перечень элементов с указанием их типоразмеров может заполняться на отдельном листе или на свободном месте листа принципиальной схемы.

Исходные данные для параметрического синтеза: структурная вакуумная схема, рабочее давление, газовыделение, размеры откачиваемого объекта, длины трубопроводов и другие специальные требования.

Методы оптимизации при выборе типоразмеров элементов могут быть различными по точности и требованиям к ресурсам ЭВМ. На ранних стадиях проектирования можно использовать менее точные, но быстродействующие методы. Критерии оптимизации должны оставаться теми же, что и на этапе структурного синтеза.

Рассмотрим однокритериальную минимизацию, используя в качестве критерия оптимизации коэффициент использования вакуумного насоса. В качестве функции цели выберем себестоимость вакуумного агрегата. Этот приближенный метод широко применяется для проектирования без использования ЭВМ. На первом этапе выполняется непрерывная оптимизация, а на втором - дискретная. Необходимость дискретной оптимизации возникает в связи с ограниченным набором элементов в базе данных.

Для упрощения задачи оптимизация выполняется независимо для каждого участка вакуумной схемы. При этом определяется оптимальный коэффициент использования насоса, типоразмеры насоса, ловушек, клапанов и диаметры соединительных трубопроводов, производится расчет экономической эффективности.

Параметрический синтез начинается с определения оптимального коэффициента использования насоса

$$K_{\scriptscriptstyle \rm H}=S_{\scriptscriptstyle \rm O}\,/\,S_{\scriptscriptstyle \rm H}$$
 ,

где So - эффективная быстрота откачки насоса в откачиваемом объекте, а S<sub>н</sub> -быстрота действия насоса. Использование основного уравнения вакуумной техники позволяет записать равенство

$$\frac{U}{S_i} = \frac{K_{\dot{e}}}{1 - K_{\dot{e}}}.$$
(7.6)

Из (7.6) следует, что выбор коэффициента использования насоса равносилен назначению соотношения между общей проводимостью элементов вакуумной системы и быстротой откачки насоса. Вариантность проектирования возникает в связи с тем, что при различных значениях этого соотношения можно получить одну и ту же быстроту откачки камеры, а следовательно и рабочее давление. Необходимо учитывать, что при увеличении К<sub>и</sub> затраты на приобретение и эксплуатацию насоса уменьшаются, а на приобретение и эксплуатацию арматуры - увеличиваются. Капитальные и эксплуатационные затраты по отдельным элементам вакуумной системы будем аппроксимировать степенными функциями быстроты откачки или проводимости элемента в соответствии с выражением (6.68).

Рассмотрим непрерывную оптимизацию без ограничений. Дифференцируем (6.68) по  $K_{\mu}$  и приравниваем нулю полученное выражение при  $K_1 = K_2 = K_3 = K_4$ .

$$(1 - A_5)K_{\mu}^2 - 2K_{\mu} + 1 = 0, (7.7)$$

где

$$A_5 = \frac{C_2 + C_4 t_0}{C_1 + C_3 t_0}.$$



Рис.7.5. Оптимальные коэффициенты использования насоса в зависимости от соотношения затрат на арматуру и откачные средства

Коэффициент  $A_5$  представляет собой отношение затрат на арматуру к затратам на насосы. При  $A_5=1$ очевидно, что  $K_{\mu}=0,5$ . Учитывая, что  $K_{\mu}$  всегда меньше единицы, запишем решение уравнения (7.7) в виде

$$K_{\dot{e}} = \frac{(1 - \sqrt{A_5})}{1 - A_5}.$$
(7.8)

Для наглядности зависимость (7.8) приведена на рис.7.5. Если по каким-то причинам расчет

оптимального значения *K*<sub>и</sub> не представляется возможным, то его выбор может быть сделан по аналогии с существующими системами (табл.7.2).

Для аналитического описания основной характеристики вакуумного насоса примем следующее выражение:

$$S_{_{\rm H}} = S_{_{\rm m}} \left( 1 - \frac{p_{_{\rm \pi p}}}{p_{_{\rm H}}} \right),$$
 (7.9)

где S<sub>m</sub> - номинальная быстрота действия насоса, p<sub>пp</sub> и p<sub>н</sub> - предельное и рабочее давление насоса. Выражение (7.9) при стационарном режиме работы можно преобразовать к виду

$$S_m = \frac{Q}{K_{\hat{e}} p - p_{\tilde{i} \delta}},\tag{7.10}$$

где *Q* и *p* - газовыделение и рабочее давление в откачиваемом объекте (исходные данные для проектирования).

Таблица 7.2

Средние коэффициенты использования вакуумных насосов в различных типах

#### вакуумных установок

Типы	Значения коэффициентов использования вакуумных насосов		
установок	высоковакуумных	низковакуумных	
	$K_{ m H1}$	К <sub>и2</sub>	
Автоматы откачки	0,050,001	0,10,2	
электровакуумных приборов			
Откачные посты для откачки	0,10,2	0,80,9	
электровакуумных приборов			
Установки камерной откачки	0,80,9	0,80,9	
Напылительные установки	0,50,6	0,80,9	
Установки термовакуумной	0,50,7	0,70,8	
обработки			
Установки имитации	0,51,0	0,50,9	
космического пространства			
Установки электронно-	0,30,5	0,50,8	
лучевой сварки			

Предельное давление насоса находится из таблиц для известного типа насоса, определенного на этапе структурного синтеза. Типоразмер насоса выбирается из таблиц так, чтобы его номинальная быстрота действия была бы не меньше S<sub>m</sub>, определенной из (7.10).

Общая проводимость участка, используя основное уравнение вакуумной техники, может быть представлена в виде

$$U_{o} = \frac{Q}{p(1 - K_{e})}.$$
(7.11)

Упростим задачу, приняв равенство проводимостей всех последовательно соединенных элементов арматуры и трубопроводов.

$$U_{\mathfrak{I}} = U_1 = U_2 = \dots = U_{\mathfrak{n}-1}, \tag{7.12}$$
где *n* - число элементов участка, включая насос. Проводимость элемента в этом случае определяется из выражения

$$U_{\circ} = (n-1)U_{o} = \frac{(n-1)Q}{p(1-K_{e})}.$$
(7.13)

Это выражение используется для выбора затворов и ловушек. Величина проводимости выбранных из таблицы элементов арматуры из-за дискретности параметрических рядов может несколько отличаться от значения, определенного по (7.13). Диаметр трубопроводов выбирается из стандартного ряда по известной проводимости и длине трубопровода. Длины трубопроводов задаются в исходных данных и могут уточняться на этапе компоновки агрегата. При выборе элементов следует стремиться к тому, чтобы общая проводимость участка имела бы наименьшее отклонение от требуемого по (7.11). Себестоимость многоступенчатого откачного агрегата определяется как сумма себестоимостей отдельных участков, определенных по формуле (6.68).

## 7.5. Многопараметрический синтез вакуумной системы

Многопараметрический синтез состоит из следующих этапов: определение вектора оптимальных параметров непрерывной оптимизацией, дискретизация полученных результатов и расчет значения целевой функции. В качестве целевой функции выберем себестоимость откачки. В отличии от (6.68), где затраты на арматуру рассматривались совместно для всех элементов, будем учитывать их раздельно. В этом случае себестоимость откачки одним участком вакуумной системы, содержащим п элементов,

$$\tilde{N} = \frac{(K_1 + K_2 + ... + K_n) + t_o(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + ... + \dot{Y}_n)}{t_o S_o},$$
(7.14)

где *C* определяется в рублях за один час откачки с быстротой 1 м<sup>3</sup>/с,  $K_1, K_2...K_n$  - стоимости элементов, руб.  $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2..\mathcal{P}_n$  - эксплуатационные расходы, руб./час;  $t_0$  - нормативный срок окупаемости,  $t_0 = 10^4$  часов при односменной работе в течение 5 лет;  $S_0$  - эффективная быстрота откачки в рабочей камере, м<sup>3</sup>/с. Стоимость и эксплуатационные затраты аппроксимируем степенными функциями вида

$$K_{i} = a_{i} X_{i}^{k_{i}}; \qquad \acute{Y}_{i} = b_{i} X_{i}^{m_{i}}, \tag{7.15}$$

где  $a_1..a_n$ ,  $b_1..b_n$ ,  $k_1..k_n$ ,  $m_1..m_n$  - постоянные коэффициенты, n - общее число элементов,  $\mathbf{X} = (X_1, X_2..X_n)$  - вектор параметров, для насоса - быстрота действия, для арматуры - проводимость. Каждый из участков вакуумной схемы будем оптимизировать независимо один от другого.

Многопараметрическая оптимизация целевой функции (7.14) при наличии ограничений сводится к нахождению вектора **X**\*, соответствующего минимуму целевой функции в допустимой области параметров

$$\tilde{N}(\mathbf{X}^*) = MinC(\mathbf{X})$$

$$\mathbf{X} \in D$$
(7.16)

Допустимое для оптимизации пространство параметров *D* удовлетворяет набору ограничений. Параметрическое ограничение для параметра *X*<sub>i</sub>

$$X_{i}' \le X_{i} \le X_{i}'',$$
 (7.17)

где *X*<sub>i</sub>' и *X*<sub>i</sub>" - минимальное и максимальное допустимые значения *i*-го параметра. Используемая база данных накладывает дискретизирующее ограничение

$$\mathbf{X}_{ij} = \{X_{i1}, X_{i2}..X_{iN}\},\tag{7.18}$$

где *j* = 1,2..*N*, *N* - число типоразмеров *i*-го элемента в базе данных. Функциональное ограничение в виде основного уравнения вакуумной техники, записанного для *n* последовательно соединенных элементов

$$\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{X_{i}}\right) - \frac{p}{Q} = 0.$$
(7.19)

Здесь *р* - рабочее давление и *Q* - газовыделение.

На первом этапе будем учитывать только ограничение (7.19). Такую задачу можно решать методом множителей Лагранжа. Составим функцию Лагранжа

$$L(X,\lambda) = C(X) - \lambda G(X), \tag{7.20}$$

где λ - множитель Лагранжа,

$$G(X) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{X_i}\right) - \frac{p}{Q} = 0.$$

Необходимые условия экстремума

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = 0; \qquad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

позволяют записать систему нелинейных уравнений

$$A_{i}X_{i}^{k_{i}-1} + B_{i}X_{i}^{m-1} - \lambda X_{i}^{-2} = 0;$$
  

$$\sum_{i=1}^{n} X_{i}^{-1} - \frac{p}{Q} = 0;$$
(7.21)

где  $A_i = a_i / (t_o S_o);$   $B_i = b_i / (t_o S_o);$  i = 1,2..n.

В этой системе (*n*+1) нелинейных алгебраических уравнений и столько же неизвестных  $X_1, X_2...X_n, \lambda$ . В результате решения системы (7.21), например методом итераций, найдем оптимальный вектор  $\mathbf{X}_{\mathbf{H}}^*$ . Возможность выбора элемента из базы данных соответствует выполнению ограничений (7.17) и (7.18). При этом получаем решение оптимизационной задачи в виде  $\mathbf{X}^* = \{X_1^*, X_2^*...X_n^*\}$ .

Результаты параметрического синтеза могут быть представлены в виде матрицы  $Y_{ji}$ , содержащей коды типоразмеров элементов (*j* - номер участка, *i* - номер элемента) и могут быть выведены из ЭВМ в графической форме. На рис.7.6 показана принципиальная вакуумная схема, спроектированная на ЭВМ по данной методике. В качестве исходных данных использовалась структурная схема, показанная на рис.7.4.





, · ·				
ПОЗ. ОБОЗНА ЧЕНИЕ	TMI ƏJEMEHTA	TUIIOPA3- MEP	кол	примеч.
NL 2	НАСОС ЗОЛОТНИКОВЫЙ	BH46IM	I	
YMI	ЗАТВОР НИЗКОВАКУУМНЫМ ПРОХОДНОЙ	B9II - 25	I	
NZY	НАСОС ДВУХРОТОРНЫИ	ДВН _5-І	I	
VMI	ЗАТВОР НИЗКОВАКУУМНЫЙ ПРОХОДНОЙ	B3II - 25	Ι	
BS2	ЛОВУШКА ВЫСОКОВАКУУМНАЯ СОРЕЦИОННАЯ	лваж - 85	I	
VM2	ЗАТВОР ВЫСОКОВАКУУМНЫЙ ПРОХОДНОЙ	ВЭП - 25	I	
NR6	НАСОС ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ	TBH - 200	1	
<b>У</b> МЗ	SATBOP CBEPXBLCOKOBAKYYMHLM	ВЭП - IOO	I	
	CYEMA DALWARAG			
	OXEMA DAID INTERI			
	принципиальная			

Рис.7.6. Схема вакуумная принципиальная

Обобщая результаты проектирования при различных рабочих давлениях и газовых потоках можно найти области эффективного применения отдельных элементов вакуумной системы, входящих в базу данных. Положение области применения по экономическому критерию зависит от относительной, а не от абсолютной себестоимости, что делает полученные результаты не зависящими от экономической инфляции. Существование такой области говорит о высоком техническом уровне по выбранному критерию оптимизации. Ее отсутствие указывает на нецелесообразность дальнейшего производства этого элемента.

## 7.6. Схемы соединений и компоновки

После разработки принципиальной схемы следующим этапом проектирования является создание схемы соединений. Она содержит сведения о взаимном расположении элементов в вакуумном агрегате. Особенностью элементов вакуумных систем является возможность поворота при сборке вокруг оси, проходящей через точку соединения, дискретно на 90°. Угол поворота можно измерять от основного положения в базе данных по часовой стрелке со стороны присоединяемого элемента.

Некоторые элементы, например диффузионные насосы, допускают поворот вокруг оси, проходящей через входной патрубок, но не допускают поворота вокруг оси, проходящей через выходной патрубок. Тепловые манометрические преобразователи должны устанавливаться вертикально. Однако большинство элементов вакуумных систем допускает произвольное пространственное расположение.



VF	Натекатель НК-20 (0Т4.463.225ТУ)	I			
VA5	Клепан Ду 16 (АН)-1	I	U=4л/с		
VA. VA3, 4	Клапан Ду 16 (АН)-2	3	<i>U=</i> 4л/с		
VA2	Затвор ЗЭШ-100 (ПЕЩМО.336.001.Ту)	I	И=3340л/с		
VAT	Клалан КОУ-63 (ОТМО.336.015.ТУ)	I	V=170л/с		
T8	Тройник	I	L= 240, Dy, = 16 Le= 60, Dy= 16		
T7	Трубопровод	1	1=50, Dy=16		
T6	Трубопровод	1	⊥=50, <u>Dy</u> =16		
T5	Тройник	1	L,=200, Dy1=160 L2=80, Dy2=50		
T'4	Тройник	1	L, = 280, Dyg = 160 La = 350, Dyg = 660		
ТЗ	Трубопровод	1	43=50, Dus=50 4=120, Du = 63		
T2	Тройник	I	4,=120, Dy1 = 65		
TI	Трубопровод	Ι	L=260. Dy=63		
s	Анализатор РМО-4С	I	ИЩО_2		
PT1-PT3	Пресоразователь термоп.рный МТ-6	3	BT3		
PAZP A3	Преобразователь ионизационный ПММ-12	I	ВИТ-2		
NM	Hacoc HML-0.25	1	S=250 л/с		
NL	Насос ЗНЪР-1Д	Ι	S=I л/с		
ND	Hacoc HIC2	I	S=100л/с		
CV	Камера вакуумная Ø500мм, L = 500мм	I	v=100л		
B2	Ловушка ЛСІТ-25	1	⊍=2л/с		
BI	JOBVIERA LCIT-63	I	И=10л/с		
PAL	Преобразователь ионизационный ПАИ-2	1			
Обознач	Наименование	Кол	Примеч.		
		_11	т. Масса Масшт.		
ramad l	док. Иотл. Лете СХЕМА ВАКУУМНАЯ				
Ipomp.	СОЕДИНЕНИЙ	Ц			
T. ROHT		+-	NGT INCTON		
H. KOHTD			лци		

Рис. 7.7. Схема вакуумная соединений

Алгоритм соединения элементов должен обеспечивать плоскую или объемную компоновку. На рис.7.7 показана схема соединения элементов вакуумного агрегата в одной плоскости. Универсальной задачей соединения является минимизация общего объема,

занимаемого вакуумным агрегатом. Результаты проектирования схемы соединений могут быть записаны аналитически в виде матрицы углов поворота Z<sub>ji</sub>, где j - номер участка, а i - номер элемента.

Компоновочная схема вычерчивается на основании схемы соединений. Компоновка с помощью ЭВМ осуществляется в специализированных графических редакторах. Плоская компоновка требует предварительной подготовки аппликаций - проекций элемента на все плоскости декартовой системы координат. Плоская компоновка сложных конструкций недостаточно наглядна и трудно формализуема. Объемная компоновка значительно удобнее, но требует значительно больших ресурсов ЭВМ.



Каждый элемент при компоновке характеризуется набором входных и выходных К параметров. входным параметрам относятся: номер точки присоединения К предыдущему элементу, координаты точки присоединения, угол поворота И масштабный элемента множитель. Выходные параметры включают: номер точки присоединения к последующему элементу И ee локальные координаты.

В процессе автоматизированной компоновки пользователь в каждый момент времени оперирует с

Рис. 7.8. Компоновочная схема вакуумного агрегата

двумя элементами: базовым (предыдущим) и текущим (последующим). Выбор элементов осуществляется согласно схеме соединений из меню графической базы данных. Для удобства пользователя применяется многооконный интерфейс. На рис.7.8 показан пример разработки компоновочной схемы на ЭВМ.

### 7.7. Проектировочный расчет вакуумной системы

Проектировочный расчет выполняется при разработке новых вакуумных машин и установок. Целью такого расчета является выбор откачного оборудования, арматуры и определение размеров соединительных трубопроводов из условия обеспечения заданного рабочего давления в вакуумной камере или времени откачки. Основные технологические процессы в вакуумной камере осуществляются в стационарном режиме работы вакуумной установки. Для этого режима течения газа характерно медленно меняющееся технологическое газовыделение.

Рассмотрим методику проектировочного расчета с приближенной оптимизацией по экономическому критерию. Минимальная стоимость вакуумной системы достигается выбором оптимального значения коэффициента использования вакуумного насоса.

В качестве исходных данных при проектировочном расчете должны быть заданы: 1) суммарное технологическое газовыделение и натекание Q; 2) рабочее давление в вакуумной камере p; 3) время работы в стационарном режиме  $t_c$ ; 4)время работы в нестационарном режиме; 5) размеры откачиваемого объекта и длины трубопроводов; 6) дополнительные условия.

Газовыделение задается ориентировочно по аналогии с существующими конструкциями. Рабочее давление в вакуумной камере полностью определяется требованиями технологического процесса. Время работы системы в стационарном режиме зависит от длительности осуществления техпроцесса. Время откачки определяется производительностью установки.

Дополнительные условия могут содержать эксплуатационные и конструкторские требования: совместности работы вакуумных насосов в заданном диапазоне изменения потоков или давлений; дублирования систем с целью повышения надежности; регулировки давления в откачиваемом объекте; применения "двойной" откачки и т. д.

Проектировочный расчет включает все этапы структурного и параметрического синтеза. Вакуумную схему выбирают по аналогии с существующими установками такого же назначения. При выборе типа вакуумного насоса могут быть учтены особенности осуществляемого технологического процесса, например ртутные выпрямители удобно откачивать парортутными насосами, оборудование для пропитки катушек трансформаторов - паромасляными насосами, установки для изучения свойств материалов при низких температурах - криосорбционными насосами, установки с собственными магнитными полями - магниторазрядными и т. д.

289

Условием стационарного режима работы вакуумной установки является равенство эффективной быстроты откачки  $S_0$  и быстроты газовыделения  $S_Q$  внутри вакуумной камеры. Быстроту газовыделения можно определить по формуле  $S_Q = Q / p$ . Таким образом, в стационарном режиме работы для нахождения эффективной быстроты откачки насоса в вакуумной камере можно воспользоваться формулой

$$S_{\rm o} = Q / p. \tag{7.22}$$

По найденному значению  $S_0$ , вакуумной схеме и типу насоса по методике, изложенной в §7.4, можно найти оптимальное значение коэффициента использования  $K_{u1}$  вакуумного насоса, непосредственно откачивающего вакуумную камеру.

Номинальное значение быстроты откачки насоса, откачивающего вакуумную камеру в стационарном режиме, можно определить по формуле (7.10), которая примет следующий вид:

$$S_{m1} = \frac{Q}{K_{\ell 1} p - p_{\tau \ \delta 1}},$$
(7.23)

где Q и p известны из исходных данных;  $K_{u1}$  уже определено;  $p_{пp1}$  - характеристика выбранного типа насоса. Выбор типа насоса определяется условием  $p_{пp1} \ll K_{u1}p$ . По каталогу выбирают вакуумный насос, имеющий номинальную быстроту действия, большую или равную значению, определяемому по формуле (7.23). Если не удается подобрать насос с необходимой быстротой действия, то можно применить параллельное включение насосов, при котором эффективные быстроты откачки всех насосов суммируются в откачиваемом объекте. Аналогично можно выбрать все последовательно включенные насосы. При этом в качестве рабочего давления  $p_i$  для насосов, сжимающих газ, нужно принимать максимальное выпускное давление предыдущего насоса, а для сорбционных насосов - их наибольшее рабочее давление  $p_{B(i-1)}$ .

$$p_i = p_{B(i-1)} / \eta,$$
 (7.24)

где  $\eta$  - коэффициент запаса; можно принимать  $\eta = 2$ . Производительность откачки Q для всех последовательно включенных насосов остается неизменной,  $p_{npi}$  и  $K_{ui}$  находят из таблиц. Любой последовательно включенный насос, работающий при стационарном режиме, можно выбрать аналогично (7.23).

Для определения общей проводимости участка вакуумной системы от насоса до откачиваемого объекта или между двумя последовательно соединенными вакуумными насосами воспользуемся основным уравнением вакуумной техники, записав его в виде:

$$U_{oi} = S_{mi} \frac{K_{\dot{e}i}}{1 - K_{\dot{e}i}},\tag{7.25}$$

где  $U_{oi}$  - проводимость участка вакуумной системы от i-го насоса до предыдущего насоса или откачиваемого объекта.

Проводимость участка вакуумной системы может быть выражена через проводимости отдельных элементов: клапанов, ловушек, трубопроводов с учетом их последовательного или параллельного соединения. Если на участке вакуумной системы имеется несколько последовательно соединенных элементов, число которых равно (*n*-1), то должно выполняться условие.

$$\frac{1}{U_{oi}} = \frac{1}{U_{1i}} + \frac{1}{U_{2i}} + \dots + \frac{1}{U_{ji}} + \dots + \frac{1}{U_{(n-1)i}}.$$
(7.26)

При проектировании вакуумных систем нужно стремиться к тому, чтобы проводимости всех элементов вакуумной системы были бы одинаковы:

$$U_{1i} = U_{2i} = ... = U_{ji} = ... = U_{(n-1)i}$$
.

Проводимость любого из элементов участка вакуумной системы должна быть в (*n*-1) раз больше, чем проводимость всего участка.

Сложные элементы: ловушки, клапаны, затворы выбирают по каталогам (табл.П13). В случае отсутствия в каталоге необходимого элемента возникает задача его проектирования. Составляется расчетная эквивалентная схема, при этом сложный элемент разбивается на более простые части, соединенные последовательно или параллельно.

В молекулярном режиме вероятность прохождения элемента молекулами газа

$$P_{i} = \frac{U_{i}}{U_{ib}} = \frac{U_{i}}{91d_{a}^{2}},$$
(7.27)

где  $U_i$  - проводимость элемента;  $U_{or}$  - проводимость входного отверстия;  $d_o$  - диаметр входного отверстия. Вероятность *P*, всегда может быть представлена в виде функции, зависящей только от соотношения размеров элемента,

$$P_{i}\left(\frac{d_{1}}{l_{1}},\frac{d_{2}}{l_{2}}...;\frac{d_{1}^{2}}{d_{o}^{2}},\frac{d_{2}^{2}}{d_{o}^{2}}..\right),$$

значение которой остается постоянным при подобном изменении размеров элемента. Задавшись принципиальной схемой элемента, можно определить все относительные размеры, а следовательно, и значение функции  $P_i$ . Так как значение  $U_i$  известно, то из (7.27) можно найти диаметр входного отверстия  $d_o$  и все остальные размеры элемента.

Пользуясь компоновочной вакуумной схемой, определяют длины всех трубопроводов. Режим течения газа можно определить по диаметру входного патрубка насоса и заданному рабочему давлению. Пользуясь приведенными ранее формулами для расчета проводимостей трубопроводов при различных режимах течения, по известной проводимости и длине трубопровода всегда можно определить его диаметр.

Задачей проектировочного расчета вакуумной системы в нестационарном режиме является выбор откачных средств, арматуры и размеров трубопроводов из условия обеспечения заданного времени откачки от начального до рабочего давления, при котором осуществляется стационарный режим работы.

Исходными данными для расчета являются: 1) начальное и конечное давления в откачиваемом объекте  $p_1$  и  $p_k$ ; 2) характеристики откачиваемого объекта: объем V, диаметр d и длина l; 3) время откачки в нестационарном режиме  $t_{\rm H}$ ; 4) дополнительные условия. Вакуумную схему выбирают в зависимости от требуемой степени вакуума, определяемой по рабочему давлению и размерам откачиваемого объекта. Если для достижения рабочего давления требуется несколько последовательно включенных насосов, то общее время откачки нужно распределить между ними.

Для выбора номинальной быстроты действия насоса примем, что существует квазистационарный режим работы вакуумной установки. В области низкого вакуума, воспользовавшись формулой (6.53), получим, что для снижения давления от  $p_1$  до  $p_2$  в камере объемом V за время  $\Delta t_1$  требуется насос с номинальной быстротой действия

$$S_{m1} = 2.3 \frac{V}{\Delta t_1 K_{e1}} \lg \frac{p_1}{p_2},$$
(7.28)

где  $p_1$  - начальное давление (обычно равно атмосферному);  $p_2$  - граничное давление в откачиваемом объекте между вязкостным и молекулярно-вязкостным режимами.

Коэффициент использования насоса  $K_{u1}$ , в области низкого вакуума - величина переменная из-за зависимости проводимости элементов вакуумной системы от давления. Для расчетов с запасом принимаем для  $K_{u1}$  минимальное значение, соответствующее стационарному режиму течения при давлении  $p_2$ . Приближенно можно принять значение  $K_{u1}$ = 1.

В области среднего вакуума давление изменяется от  $p_2$  до  $p_3$ . Коэффициент использования насоса  $K_{\mu 2}$  определяется с запасом при давлении  $p_3$  и соответствует молекулярному режиму течения газа. Номинальную быстроту действия насоса в прогреваемой вакуумной системе определяем по формуле, аналогичной (7.28). Для непрогреваемой вакуумной системы следует определять время откачки с учетом присутствия паров воды по формуле (6.61).

В области высокого и сверхвысокого вакуума за время  $\Delta t_3$  откачка осуществляется от давления  $p_3$  до давления  $p_{\kappa}$ , которое равно рабочему давлению, заданному в исходных

292

данных. Номинальная быстрота действия насоса может быть определена из уравнения (7.28) с учетом коэффициента использования вакуумного насоса.

Общая проводимость между насосом и откачиваемым объектом

$$U_{oj} = \mathbf{S}_{mj} \frac{K_{ej}}{1 - K_{ej}},\tag{7.29}$$

где *j* - номер соответствующего насоса.

Далее выбор элементов вакуумной системы не отличается от уже рассмотренного при стационарном режиме. Общая проводимость выражается через проводимости последовательно соединенных элементов. Разрабатывается компоновочная схема, из которой определяются длины трубопроводов. Выбирают стандартные элементы - клапаны, ловушки. По проводимостям и длинам трубопроводов находят их диаметры. В случае необходимости проектируют нестандартные элементы, составляя их эквивалентные схемы из элементов, имеющих формулы для расчета проводимости. После определения размеров трубопроводов необходимо найти их объем и проверить принятое условие квазистационарности.

Объем форбаллона из условия его работы в течение всего времени существования стационарного режима можно определить, воспользовавшись формулой (6.45).

В том случае, если объем, рассчитываемый по формуле (6.45), соизмерим с объемом трубопровода, то от применения форбаллона можно отказаться. Если величина объема велика, соизмерима с размерами вакуумного агрегата, то можно применять форбаллон с адсорбентом, объем которого определяется по формуле (6.47).

### 7.8. Пример проектировочного расчета вакуумной системы в

#### стационарном режиме

Рассмотрим проектировочный расчет вакуумной системы для получения сверхвысокого вакуума. Исходные данные: суммарная производительность газовыделения и натекания  $Q = 4.10^{-6}$  м<sup>3</sup>.Па/с; рабочее давление в вакуумной камере  $p = 10^{-5}$  Па; время работы системы в стационарном режиме  $t_c = 3600$  с; размеры откачиваемого объекта: d = 500 мм; l = 1000 мм; дополнительные условия - использование магниторазрядного, пароструйного и пластинчато-роторного насосов.

1). Выбор вакуумной схемы.

Выбираем вакуумную схему, изображенную на рис. 6.9.

2). Выбор вакуумных насосов.

2а).Выбор сверхвысоковакуумных насосов.





В соответствии дополнис тельным условием для сверхвысоковакуумной откачки выбираем магниторазрядные насосы серии НМД с предельным давлением  $p_{\rm пр} = 7.10^{-8}$  Па и диапазоном быстрот действия от 6.10-3 до 1,2 м<sup>3</sup>/с. Эффективная быстрота откачки в вакуумной камере

 $S_{o1} = Q / p_1 = 5.10^{-6} / 10^{-5} = 5.10^{-1} \text{ m}^3/\text{c}.$ 

Найдем коэффициент использования магниторазрядного насоса. При n = 3 находим по рис.6.11 для  $S_0 = 10^{-1}$ м<sup>3</sup>/с значение коэффициента использования  $K_{\mu 1}$ =0,35. Воспользуемся

формулой (7.23) для нахождения номинальной быстроты действия:

$$S_{m1} = \frac{Q}{K_{\ell 1} - p_{i \ \delta 1}} = \frac{4.10^{-6}}{0.3510^{-5} - 7.10^{-8}} = 1.17 \,i^{-3} \,/ c.$$

Ближайший по быстроте действия магниторазрядный насос НМДО-1 имеет следующие характеристики:

Номинальная быстрота действия, м<sup>3</sup>/с . . . . . . 1,20

Диаметр входного патрубка, мм	250
Наибольшее рабочее давление, Па	10-1
Наибольшее давление запуска, Па	$10^{0}$
Предельное давление, Па	7.10 <sup>-8</sup>

Зависимость быстроты действия насоса НМДО-1 от давления на входе в насос приведена на рис. 7.9.

2,б). Выбор высоковакуумного насоса.

В соответствии с дополнительными условиями выбираем серию паромасляных насосов типа H, имеющих предельное давление  $p_{\rm np} = 3.10^{-4} ..4.10^{-5}$  Па с диапазоном быстрот действия от 1,5.10<sup>-2</sup> до 30 м<sup>3</sup>/с.

Рабочее давление паромасляного насоса выбираем по наибольшему рабочему давлению магниторазрядного насоса с коэффициентом запаса 2. Тогда  $p_2=10^{-1}/2 = 5.10^{-2}$  Па, что соответствует эффективной быстроте откачки  $S_{o2} = Q/p_2 = 4.10^{-6} / (5.10^{-2}) = 8.10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$ 

По рис. 6.8 при n = 5 находим при  $S_0 = 8.10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с оптимальное значение коэффициента использования  $K_{\mu 2} = 0,13$ . Номинальная быстрота действия пароструйного насоса

$$S_{m2} = \frac{Q}{K_{\dot{e}2} - p_{\tau \,\dot{\partial}2}} = \frac{4.10^{-6}}{0.135 \cdot 10^{-2} - 3.10^{-4}} = 6.5 \cdot 10^{-4} \,\dot{\iota}^{-3} \,/ \,c.$$

Ближайший по быстроте действия пароструйный насос H-0,15C серии *H* имеет следующие характеристики:

Зависимость быстроты действия насоса H-0,15C от давления на входе приведена на рис. 7.9.

2,в). Выбор насоса для работы в области среднего и низкого вакуума

В соответствии с дополнительным условием выбираем серию вращательных насосов типа ВН с предельным давлением по воздуху (с ловушкой)  $4.10^{-1}$  .. $10^{-2}$  Па и диапазоном быстрот действия от  $10^{-4}$  до 1,5. $10^{-1}$  м<sup>3</sup>/с.

Рабочее давление механического насоса выбираем по максимальному выпускному давлению паромасляного насоса с коэффициентом запаса  $\varphi = 2$ . Тогда  $p_3 = 53/\varphi = 27$  Па, что соответствует эффективной быстроте откачки

$$S_{o3} = \frac{Q}{p_3} = \frac{4.10^{-6}}{27} = 1,5.10^{-7} i^{-3} / c.$$

По рис. 6.3 найдем при  $S_0 = 1,5.10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$  и n = 3 оптимальное значение  $K_{\mu} = 0,7$ .

Номинальная быстрота действия механического насоса

$$S_{m3} = \frac{Q}{K_{\dot{e}3} - p_{\dot{i}\ \dot{o}3}} = \frac{5.10^{-6}}{0.27 - 4.10^{-1}} = 2.6.10^{-7} \,\dot{i}^{-3} \,/ \,c.$$

Ближайший по быстроте действия механический насос BH-01 имеет следующие характеристики:

Номинальная быстрота действия, м <sup>3</sup> /с	10-4
Диаметр входного патрубка, мм	8
Предельное давление, Па	4
Предельное давление насоса с ловушкой, Па	4.10 <sup>-1</sup>
Максимальное выпускное давление, Па	10 <sup>5</sup>



Рис.7.10. Схема сверхвысоковакуумного участка: 1,3 - трубопроводы, 2 - затвор

Зависимость быстроты действия насоса ВН-01 от давления на входе приведена на рис.7.9.

 Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы.

За).Сверхвысоковакуумная система.

Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от магниторазрядного насоса до вакуумной камеры по формуле (7.25) :

$$U_{o1} = S_{m1} \frac{K_{i1}}{1 - K_{i1}} = 1,2 \frac{0,35}{1 - 0,35} = 0,65i^{-3}/c,$$

где S<sub>m1</sub> - быстрота действия насоса, выбранного по каталогу.

Составим схему рассматриваемого участка вакуумной системы. На рис.7.10 показаны внутренние размеры откачиваемого объекта и длины трубопроводов. Участок вакуумной системы состоит из трех элементов: трубопроводов 1 и 2 и затвора 3.

Определим проводимости элементов и диаметры трубопроводов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость.

Тогда  $U_{1j} = 3U_{o1} = 3.0,65 = 2 \text{ м}^3$ /с. Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению  $p_1 = 10^{-5}$  Па и диаметру входного патрубка насоса  $d_{BX} = 0,25$  м. Критерий Кнудсена

$$Kn = \frac{L}{d_{\dot{s}\hat{o}}} = \frac{L_1}{p_1 d_{\hat{a}\hat{o}}} = \frac{7.5 \cdot 10^{-3}}{10^{-5} \cdot 0.25} = 3.10^3 > 1.5;$$

т. е. режим течения молекулярный.

Диаметр первого элемента может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода:

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - d_1^2 / (0.5)^2}{91 d_1^2} + \frac{0.2}{121 d_1^3} = \frac{1}{2}.$$

Отсюда получаем  $d_1 = 0,19$  м. По табл.П13 выбираем условный проход трубопровода  $d_1 = 0,2$ м. Тогда проводимость первого участка  $U_{11} = 2,29$  м<sup>3</sup>/с, проводимость отверстия 3,7 м<sup>3</sup>/с, проводимость трубопровода 4,84 м<sup>3</sup>/с.

В качестве затвора выбираем ЗВЭ с диаметром условного прохода  $d_y = 160$  мм (см. табл. П13) и проводимостью в молекулярном режиме течения газа 3,34 м<sup>3</sup>/с. С учетом входного сопротивления проводимость затвора найдем из равенства

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1 - d_{\delta}^2 / d_1^2}{91d_{\delta}^2} + \frac{1}{3,34}$$

Таким образом,  $U_{12} = 2,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , причем проводимость входного отверстия 6,4 м $^3/\text{c}$ , а проводимость затвора 3,34 м $^3/\text{c}$ .

Диаметр трубопровода на третьем участке выберем из условия  $U_{13} = 2 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тогда с учетом размеров предыдущего элемента

$$\frac{1}{U_{13}} = \frac{1 - d_3^2 / d_2^2}{91 d_3^2} + \frac{0.2}{121 d_3^3} = \frac{1}{2}.$$

При  $d_2 = 0,16$  м из записанного соотношения имеем  $d_3 = 0,153$  м. Согласно рекомендуемому ряду диаметров выбираем  $d_3 = 0,160$  м.

Таким образом,  $U_{13} = 2,48 \text{ м}^3/\text{с}$ , а общая проводимость участка с учетом того, что входная проводимость насоса равна бесконечности,

$$\frac{1}{U_{o1}} = \frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}} = \frac{1}{2,29} + \frac{1}{2,2} + \frac{1}{2,48} = \frac{1}{0,78}$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы 0,78 м<sup>3</sup>/с, что несколько больше требуемой 0,65 м<sup>3</sup>/с. Коэффициент использования магниторазрядного насоса

$$K_{i} = \frac{U_{o1}}{S_{m1} + U_{o1}} = \frac{0.88}{1.2 + 0.78} = 0.39$$

Коэффициент использования 0,39 близок к оптимальному значению 0,35. Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от магниторазрядного насоса до откачиваемого объекта. Результаты расчета занесены в табл. 7.3.

Таблица 7.3.

# Распределение давления на участке вакуумной системы от магниторазрядного насоса до откачиваемого объекта

Названия элементов	Проводимость, м <sup>3</sup> /с	Перепад	Давление на	Давление на
		давления, Па	входе, Па	выходе, Па
Элемент 3	2,48	1,6.10 <sup>-6</sup>	4,9.10 <sup>-6</sup>	3,3.10 <sup>-6</sup>
Затвор ЗВЭ(по длине)	3,34	1,2.10-6	6,1.10 <sup>-6</sup>	4,9.10 <sup>-6</sup>
Затвор ЗВЭ (входное	6,41	6,0.10 <sup>-7</sup>	6,7.10 <sup>-6</sup>	6,1.10 <sup>-6</sup>
отверстие)				
Элемент 1 (по длине)	4,48	8,3.10-7	7,5.10 <sup>-6</sup>	6,7.10 <sup>-6</sup>
Элемент 1(входное	3,7	1,1.10 <sup>-6</sup>	8,6.10 <sup>-6</sup>	7,5.10 <sup>-6</sup>
отверстие)				

Давление во входном сечении насоса, согласно (6.69),

$$p_{i1} = p_{i \delta 1} + \frac{Q}{S_{m1}} = 7.10^{-8} + \frac{4.10^{-6}}{1.2} = 3.3.10^{-6} \ddot{I}\dot{a}$$
.

Перепад давления на элементе 3

$$\Delta p_3 = Q/U_{13} = 4.10^{-6}/2,48 = 1,6.10^{-6}$$
 Па.

Аналогично находим перепады давлений на остальных элементах, рассчитываем давления на входе и выходе каждого элемента и по полученным результатам строим график распределения давления на рис. 7.10.

Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от пароструйного насоса до вакуумной камеры по (7.25) :

$$U_{o2} = S_{m2} \frac{K_{\dot{e}2}}{1 - K_{\dot{e}2}} = 1.5.10^{-2} \frac{0.13}{1 - 0.13} = 2.24.10^{-3} i^{-3} / c,$$

где S<sub>m2</sub> - быстрота действия пароструйного насоса, выбранного по каталогу.



частка. 1,5,5 - трубопроводе 2 - затвор, 4 - ловушка

Составим схему рассматриваемого участка вакуумной системы. На рис. 7.11 внутренние показаны размеры откачиваемого объекта и трубопроводов. Участок вакуумной системы состоит из пяти элементов: трубопроводов 1, 3, 5, затвора 2 и ловушки 4. Определим проводимости элементов и диаметры трубопроводов. Предположим, что все элементы имеют одинаковую проводимость. Тогда

$$U_{2j} = 5U_{o2} = 5.2,24.10^{-3} =$$
  
=1,12.10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/c.

Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению  $p_2 = 5.10^{-2}$  Па и диаметру входного

патрубка насоса  $d_{\text{вх}} = 0,046$  м. Критерий Кнудсена

$$Kn = \frac{L}{d_{\hat{y}\hat{o}}} = \frac{L_1}{p_2 d_{\hat{a}\hat{o}}} = \frac{7,5.10^{-3}}{5.10^{-2}.0,046} = 3,26 > 1,5,$$

т. е. режим течения молекулярный.

Диаметр элемента 1 может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода

$$\frac{1}{U_{21}} = \frac{1 - d_1^2 / (0,5)^2}{91 d_1^2} + \frac{0,1}{121 d_1^3} = \frac{1}{1,12.10^{-2}}$$

Из записанного уравнения находим  $d_1 = 0,023$  м. По табл.П13 выбираем условный проход трубопровода  $d_1 = 0,025$  м. Тогда проводимость первого участка  $U_{21} = 1,42.10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с, проводимость отверстия 5,7.10<sup>-2</sup> м<sup>3</sup>/с, проводимость трубопровода 1,89.10<sup>-2</sup> м<sup>3</sup>/с.

Таблица 7.4

Названия элементов	Проводи	Предельное	Перепад	Давление на	Давление на
	мость,	давление, Па	давления, Па	входе, Па	выходе, Па
	м <sup>3</sup> /с				
Трубопровод 5	9,45.10 <sup>-3</sup>	3.10-4	4,23.10 <sup>-4</sup>	1,03.10-3	6,1.10 <sup>-4</sup>
Ловушка 4	1,12.10-2	3.10-5	3,57.10 <sup>-4</sup>	3,9.10 <sup>-4</sup>	1,03.10-3
Трубопровод 3	9,45.10 <sup>-3</sup>	3.10-5	4,23.10 <sup>-4</sup>	8,13.10 <sup>-4</sup>	3,9.10 <sup>-4</sup>
Клапан 2	1,4.10 <sup>-2</sup>	3.10-5	2,9.10 <sup>-4</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	8,13.10 <sup>-4</sup>
Трубопровод 1 (по	1,89.10 <sup>-2</sup>	3.10-5	2,1.10 <sup>-4</sup>	1,3.10 <sup>-3</sup>	1,1.10-3
длине)					
Трубопровод 1	5,7.10 <sup>-2</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	7.10-5	1,4.10 <sup>-3</sup>	1,3.10 <sup>-3</sup>
(входное отверстие)					

Распределение давления от пароструйного насоса до откачиваемого объекта

Выбираем клапан ВЭП-25 по табл.П.13 с диаметром условного прохода 25 мм и проводимостью в молекулярном режиме 0,014 м<sup>3</sup>/с. Таким образом,  $U_{22} = 0,014$  м<sup>3</sup>/с, причем проводимость входного отверстия равна бесконечности.

Диаметр трубопровода на третьем участке выберем из условия  $U_{23} = 1,12.10^{-2} \text{ м}^3/\text{с},$ тогда с учетом размеров предыдущего элемента

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{0,2U_{23}}{121}} = 2,6.10^{-2} i$$

Выбираем  $d_3 = 0,025$  м, тогда  $U_{23} = 9,45.10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Выбираем ловушку, имеющую  $d_y = 25$  мм и проводимость  $U_{24} = 1,12.10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с.

Пятый участок по размерам совпадает с третьим участком, т.е.  $U_{25} = 9,45.10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, d_5 = 25 \text{ мм}.$  Входная проводимость насоса равна бесконечности. Общая проводимость находится из следующего выражения:

$$\frac{1}{U_{o2}} = \frac{1}{U_{21}} + \frac{1}{U_{22}} + \frac{1}{U_{23}} + \frac{1}{U_{24}} + \frac{1}{U_{25}} = 442,8c/\lambda^{3};$$
  
$$U_{o2} = 2,26.10^{-3}\lambda^{3}/c.$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы 2,26.10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/с, что несколько больше требуемой 2,24 .10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/с. Коэффициент использования пароструйного насоса в системе

$$K_{e^2} = \frac{U_{o^2}}{S_{m^2} + U_{o^2}} = \frac{2,26.10^{-3}}{1,5.10^{-2} + 2,26.10^{-3}} = 0,13.$$

Коэффициент использования  $K_{\mu 2} = 0,13$  равен оптимальному значению.

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от пароструйного насоса до откачиваемого объекта. Давление во входном сечении насоса, согласно (6.69),

$$p_{i2} = p_{i\delta 2} + \frac{Q}{S_{m2}} = 3.10^{-4} + \frac{4.10^{-6}}{1.5.10^{-2}} = 6.1.10^{-4} \ddot{I}\dot{a}$$
.

Перепад давления на элементе 5

$$\Delta p_5 = Q / U_{25} = 4.10^{-6} / 9,45.10^{-3} = 4,23.10^{-4} \Pi a.$$

Аналогично находим перепады давлений на остальных элементах, рассчитывая давления на входе и выходе каждого. Полученные результаты заносим в табл. 7.4 и строим график распределения давлений на рис. 7.11.

#### 3,в). Низковакуумная система.

Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от пароструйного насоса до механического по (7.25) :

$$U_{o3} = S_{m3} \frac{K_{\dot{e}3}}{1 - K_{\dot{e}3}} = 1.10^{-4} \frac{0.7}{1 - 0.7} = 2.3.10^{-4} \,\dot{\iota}^{-3} \,/ \,c,$$

где S<sub>m3</sub> - быстрота действия механического насоса, выбранного по каталогу.

Составим схему рассматриваемого участка вакуумной системы. На рис. 7.12 показаны длины трубопроводов и диаметр выпускного патрубка пароструйного насоса 8 мм, диаметр входного патрубка механического насоса 8 мы. Участок вакуумной системы состоит из семи элементов: четырех трубопроводов 1, 3, 5, 7, клапанов 2, 6 и ловушки 4.

Определим проводимость элементов и диаметров трубопроводов. Предположим, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда

$$U_{3i} = 7U_{o3} = 7.2, 3.10^{-4} = 1, 6.10^{-3} \text{ m}^{3}/\text{c}.$$

Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению  $p_3 = 27$  Па и диаметру входного патрубка механического насоса  $d_{BX} = 0,008$  м. Критерий Кнудсена

Kn = 
$$\frac{L}{d_{\hat{y}\hat{o}}} = \frac{L_1}{p_3 d_{\hat{a}\hat{o}}} = \frac{7,5.10^{-3}}{27.8.10^{-3}} = 0,035 < 1,5;$$

т. е. режим течения молекулярно-вязкостный.

Сопротивлением отверстий при небольшом перепаде давления, характерном для установившегося режима при  $K_{u3} = 0,7$ , в молекулярно-вязкостном режиме можно пренебречь.



Диаметр первого трубопровода можно рассчитать при среднем давлении в трубопроводе  $p_{cp} = p_3 = 27$ Па по проводимости

$$U_{31} = 121 \frac{d_1^3}{l_1} 0,9 + 1,35.10^3 \frac{d_1^4}{l_1} p_{\bar{n}\delta},$$

откуда следует

$$d_1^4 + 3.10^{-3} d_1^3 - 4.4.10^{-9} = 0.$$

Рис.7.12. Схема низковакуумного участка:1,3,5,7 - трубопроводы, 2,6 - клапаны, 4 – ловушка.

Решая полученное уравнение, имеем  $d_1$ = 7,5.10<sup>-3</sup> м.

По табл.П.13 выбираем  $d_1 = 8.10^{-3}$  м, что соответствует  $U_{31} = 2,1.10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Тогда получим  $d_3 = d_5 = d_7 = 8.10^{-3}$  м. На втором и шестом участках по табл. П.13 выбираем клапаны КМУ1-10 с диаметром условного прохода  $d_y = 10$  мм и проводимостью 0,0014 м<sup>3</sup>/с. Проводимость клапана в молекулярно-вязкостном режиме несколько больше, чем в молекулярном. Разницей проводимостей в данном расчете пренебрегаем.

Выбираем ловушку, имеющую  $d_y = 10$  мм и проводимость  $U_{34} = 1,6.10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Общую проводимость находим из следующего выражения :

$$\frac{1}{U_{o3}} = \sum_{i=1}^{7} \frac{1}{U_{3i}},$$

откуда  $U_{o3} = 2,53.10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы  $U_{o3}$  несколько больше требуемой 2,3.10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>/с.

Коэффициент использования механического насоса в системе

$$K_{e3} = \frac{U_{o3}}{S_{m3} + U_{o3}} = \frac{2,53.10^{-4}}{1.10^{-4} + 2,53.10^{-4}} = 0,72..$$

Коэффициент  $K_{u3} = 0,72$  близок к оптимальному значению 0,7.

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от механического до пароструйного насоса. Давление во входном сечении насоса, согласно (6.69),

$$p_{i3} = p_{i\delta 3} + \frac{Q}{S_{m3}} = 4 + \frac{4.10^{-6}}{4.10^{-4}} = 4\ddot{I}\dot{a}$$
.

Перепад давления на элементе 7

$$\Delta p_7 = Q / U_{37} = 4.10^{-6} / 2, 1.10^{-3} = 1, 9.10^{-3} \Pi a.$$

Аналогично находим остальные перепады давлений, рассчитывая давления на входе и выходе каждого элемента. Полученные результаты заносим в табл. 7.5 и строим график

распределения давлений (рис. 7.12). В элементах 1, 2, 3, 4 принимаем предельное давление механического насоса с ловушкой 0,4 Па.

Таблица 7.5

# Распределение давления на участке вакуумной системы от механического насоса до пароструйного

Названия элементов	Проводи	Предельное	Перепад	Давление на	Давление на
	мость,	давление, Па	давления, Па	входе, Па	а выходе, Па
	м <sup>3</sup> /с				
Трубопровод 7	$2,1.10^{-3}$	4	1,9.10 <sup>-3</sup>	4	4
Клапан 6	1,4.10-3	4	2,9.10 <sup>-3</sup>	4	4
Трубопровод 5	2,1.10 <sup>-3</sup>	4	1,9.10 <sup>-3</sup>	4	4
Ловушка 4	1,6.10 <sup>-3</sup>	0,4	2,5.10-3	0,4	4
Трубопровод 3	2,1.10 <sup>-3</sup>	0,4	1,9.10 <sup>-3</sup>	0,41	0,4
Клапан 2	1,4.10 <sup>-3</sup>	0,4	2,9.10 <sup>-3</sup>	0,41	0,4
Трубопровод 1	2,1.10-3	0,4	1,9.10-3	0,41	0,41

7.1. Какие сведения о вакуумной системе хранятся в автоматизированной базе данных?

7.2. Какие услуги разработчику вакуумных систем может оказать автоматизированная база данных?

7.3. Какие задачи решаются при структурном синтезе вакуумной системы?

7.4. Какие существуют методы автоматизированного проектирования структурных вакуумных схем?

7.5. Каково назначение метода обогащения при проектировании структурных вакуумных схем?

7.6. Каково назначение метода усечения при проектировании структурных вакуумных схем?

7.7. Назовите примеры логических правил, которые можно использовать для изменения типового образа при автоматизации проектирования структурных вакуумных схем?

7.8. Как использовать методы экспертных оценок для выбора весовых коэффициентов при записи целевой функции структурного синтеза вакуумных систем?

7.9. Какой максимальный набор элементов можно использовать для составления типового образа участка вакуумной системы?

7.10. В чем состоят задачи параметрического синтеза вакуумных систем?

7.11. В чем преимущества и недостатки проектирования вакуумных систем по оптимальным коэффициентам использования вакуумных насосов?

7.12. Какие исходные данные необходимы для осуществления параметрического синтеза вакуумных систем?

7.13. Какие критерии оптимизации можно сформулировать при проектировании вакуумных систем?

7.14. Какие типы ограничений устанавливаются при параметрическом синтезе вакуумной системы?

7.15. В чем заключается основное функциональное ограничение, возникающее при проведении оптимального параметрического синтеза вакуумной системы?

7.16. Как можно использовать систему автоматизированного проектирования для определения технического уровня элементов вакуумных систем?

7.17. Для чего разрабатывается схема соединения элементов вакуумных систем?

7.18. Какие исходные данные необходимы для проектирования схемы соединений?

7.19. Какие задачи решаются при разработке компоновочных вакуумных схем?

7.20. Из каких основных этапов состоит проектировочный расчет вакуумной системы?

## ГЛАВА 8. Конструирование вакуумных систем.

#### 8.1 Конструкционные вакуумные материалы

Конструкция вакуумных систем во многом определяется свойствами используемых материалов. В дополнение к обычным требованиям – прочности, технологичности, легкости и т. д. – вакуумная техника выдвигает к конструкционным материалам ряд специфических требований: 1) упругость паров материала при рабочей температуре должна быть значительно ниже рабочего давления; 2) минимальное газовыделение материала в рабочих условиях; 3) вакуумная герметичность при малых толщинах; 4) коррозионная стойкость; 5) отсутствие ползучести вплоть до температур 500 – 600<sup>0</sup>C; 6)немагнитность.

Если упругость паров материалов при рабочей температуре больше или равна рабочему давлению, то это приводит к интенсивному распылению указанного материала и нежелательному образованию напыленных слоев на поверхностях различных деталей, например изоляторах электрических вводов.

В табл. С.9 приведены упругости паров некоторых конструкционных материалов при двух рабочих температурах, характерных для вакуумных систем. Если латунь разогревать в высоком вакууме до температуры 600<sup>0</sup>C, то входящий в ее состав цинк испаряется и образуется пористый газопроницаемый материал. Наличие в вакуумной системе смазок и масел ограничивает возможности получения низких давлений.

Газовыделение материалов при рабочем давлении и температуре определяется наличием в объеме материала растворенных газов, а на поверхности–адсорбированных. Для удаления газов, растворенных в металлах, применяют их переплав под вакуумом. Поверхности вакуумных материалов должны быть тщательно очищены от загрязнений, являющихся дополнительным источником газовыделения.

Для улучшения условий очистки внутренние поверхности элементов вакуумных систем желательно обрабатывать до средней высоты микронеровностей 5..10 мкм для высоковакуумных и 0,5..1 мкм для сверхвысоковакуумных систем. Газовыделение конструкционных вакуумных материалов (табл. С.19) зависит от способа предварительной обработки. Эффективным способом уменьшения газовыделения

305

является высокотемпературное вакуумное обезгаживание, уменьшающее концентрацию газов, растворенных в объеме материала. Уменьшения газовыделения водорода из нержавеющей стали можно добиться созданием оксидных пленок или нанесением покрытия из алюминия, серебра, меди и т. д. Наличие поверхностной пленки затрудняет переход растворенных атомов из кристаллической решетки на поверхность, что при неизменной концентрации растворенных газов значительно снижает газовыделение (табл.С20).

Газопроницаемость материала свойственна многим материалам, но в некоторых случаях она особенно велика. Так, серебро пропускает кислород; железо, никель, платина, паладий – водород; стекло – гелий и водород; резина – гелий, водород и азот. Проницаемости некоторых вакуумных материалов представлены в табл.С 21.

Вакуумные материалы при малых толщинах должны быть герметичны. Литые материалы чаще всего неудовлетворяют этим требованиям, так как обладают пористой структурой. Листовой и сортовой прокат имеет неодинаковые вакуумные плотности в различных направлениях. Шлаковые включения образуют волокна в направлении деформации материала при его обработке. Негерметичность таких волокон часто можно обнаружить только после прогрева в вакууме. Ремонт деталей, в которых обнаружены такие течи, практически невозможен, так как припой не смачивает шлаковые включения, а при разогреве во время сварки из них выделяются газы, образующие поры. При проектировании тонкостенных деталей нужно следить за тем, чтобы шлаковые волокна не были направлены поперек стенки, например при проектировании днищ нежелательна замена листового проката сортовым. Наилучшей вакуумной плотностью обладают металлы, подвергнутые вакуумному переплаву.

Коррозионная стойкость необходима вакуумным материалам в связи с тем, что коррозия увеличивает газовыделение материалов, уменьшает прочность тонкостенных деталей и сопровождается появлением натеканий.

Требования к коррозионной стойкости материалов особенно велики при создании сверхвысоковакуумных установок, которые должны регулярно прогреваться при температуре 400..500<sup>0</sup> С. Медь, например, при такой температуре в воздушной среде настолько быстро корродирует, что ее нельзя применять в качестве материала для изготовления часто прогреваемых деталей, соприкасающихся с атмосферой.

306

Нагруженные детали прогреваемых вакуумных установок не должны обладать заметной ползучестью вплоть до максимальных рабочих температур 500..600<sup>0</sup> С. Ползучесть материалов, из которых изготовлены детали разборных фланцевых соединений, приводит к их разгерметизации после определенного числа циклов прогрева вакуумных установок.

Немагнитность является специфическим требованием отдельных деталей вакуумных систем, через которые осуществляется ввод магнитного потока в вакуумную камеру. Такие детали обязательно имеются в конструкциях магнитных вводов движения в вакуум, магниторазрядных насосах и манометрических преобразователях.

В вакуумной технике широко применяются такие конструкционные материалы, как чугун, сталь, медь, тугоплавкие металлы, специальные сплавы, стекло, керамика, пластмассы, резина, масла, замазки, клей и т. д.

Чугун применяется для изготовления корпусных деталей, работающих в масле в условиях низкого вакуума. Применяются особо плотные, мелкозернистые чугуны. Из других литейных сплавов используются алюминиевые сплавы и бронзы, не содержащие цинка, кадмия и фосфора.

Конструкционная качественная малоуглеродистая сталь 20, ( $\sigma_{\rm B}$ =320...440 МПа) хорошо паяется и сваривается и может применяться для изготовления непрогреваемых деталей вакуумных систем при получении низкого и среднего вакуума. Сталь 45 ( $\sigma$ =640 МПа) сваривается значительно хуже и не рекомендуется для сварных вакуумных соединений, но может быть использована для изготовления непрогреваемых резьбовых деталей, валов и других нагруженных деталей. Для деталей прогреваемых высоковакуумных систем рекомендуются нержавеющие стали с содержанием хрома более 13 %, не подверженные межкристаллической коррозии при повышенных температурах. В вакуумной технике широко применяется нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, кислотостойкая, немагнитная, хорошо сваривается и паяется со специальными флюсами. Нержавеющие стали 1Х21Н5Т и Х17Г9АН4 в нагартованном состоянии прочнее стали 12Х18Н10Т и могут применяться для изготовления сильно нагруженных деталей – болтов, шпилек, и т.д. Сталь H36XTЮ (ЭИ702) сохраняет хорошие упругие свойства 600<sup>0</sup>С и может использоваться для изготовления пружинных компенсаторов во фланцевых соединениях. Состав и основные свойства этих сталей приведены в табл. С.22.

Медь широко применяется в вакуумной технике для изготовления прокладок, внутренней арматуры и корпусов отпаянных приборов. Предел прочности мягкой меди 220..240 МПа, твердой -450 МПа предел ползучести 70 МПа при 20<sup>0</sup> С и только 14 МПа при  $400^{\circ}$ С. Рекомендуется применять марки наиболее чистой меди МБ (безкислородной), МО и М1. Присутствие кислорода в меди особенно вредно для сварки, пайки или отжига в водороде. Сварные швы получаются пористыми, а обработка в водороде приводит к восстановлению закиси меди с образованием водяных паров, создающих микроскопические области огромных давлений, приводящих к образованию мельчайших трещин в металле ("водородная болезнь"): Cu<sub>2</sub> O+H<sub>2</sub> =2Cu+H<sub>2</sub> O.

Латуни Л62 (62 % Cu и 38 % Zn) и ЛС59-1 (59 % Cu, 1 % Pb, 40 % Zn) применяются для изготовления деталей, не подвергающихся прогреву.

Алюминий марок АД1М, АМц применяется как конструкционный материал и для изготовления прокладок, паропроводов масляных насосов, криогенных экранов и т. д. Коэффициент линейного расширения в интервале температур 20..300<sup>0</sup> С равен 25,5·10<sup>-6</sup>, предел прочности 120 МПа. Алюминий обладает малым газовыделением, хорошо сваривается гелиеводуговой сваркой, давая вакуумно-плотные спаи, Дюралюминий Д1 или Д16 с пределом прочности 380..430 МПа не дает герметичных вакуумных швов.

В вакуумной технике широко применяются специальные сплавы с определенными физическими свойствами, необходимыми для создания некоторых узлов вакуумной аппаратуры. К ним относятся ковар (H29K18A) с коэффициентом линейного расширения  $(4,7..6,4) \cdot 10^{-6}$  для пайки со стеклами молибденовой группы С-47, С-49; сталь X18TФМ и сплав H47Д5 с коэффициентами линейного расширения  $10^{-5}$  и 8·10<sup>-6</sup> для пайки со стеклами С-87, С-89, С-90; сплавы Фени различных марок H42, H45, H50 для пайки с различными группами стекол; H33K17 для пайки со стеатитовой керамикой; инвар (H36, ЭH36) с малым коэффициентом линейного расширения и теплопроводности.

Тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал, ниобий – применяются для изготовления нагревателей, тепловых экранов, токовводов и т. д.

Титан (ВТ1, ВТ3, Т3 и Т4) имеет малое газовыделение и может использоваться как конструкционный материал. Из него изготавливаются катоды и геттеры ионно-сорбционных насосов.

Стекло марок С-47, С-87 широко применяется в вакуумной технике для изготовления трубопроводов, кранов, ловушек, корпусов, приборов, насосов, манометров, изоляторов электрических вводов и т. д. После буквы С в обозначении марки стекла следуют цифры, соответствующие коэффициенту линейного расширения, умноженному на 10<sup>7</sup>. Физические свойства стекол приведены в табл.С.23.

В вакуумной технике керамика применяется вместо стекла для изготовления высокотемпературных изоляторов. Распространены следующие виды вакуумноплотной

308

керамики: стеатит, алунд, форстерит, циркон. Наиболее термостойкой является алундовая керамика. (70..96 %  $Al_2 O_3$ ) с температурой размягчения  $1900^0 C$  и прочностью на сжатие 2000 МПа. Алундовая керамика хорошо паяется методом металлизации или активных припоев, Стеатит и форстерит изготовляются на основе талька с добавлением оксида магния, углекислого бария и высококачественной глины. Пайка стеатита с металлами затруднена, а форстерит паяется с титаном и дает с ним согласованные спаи. Циркон имеет хорошую теплопроводность, но очень тверд и не может обрабатываться после обжига.

Из пластмасс в вакуумной технике делаются многие детали: уплотнители, мембраны, изоляторы, гибкие трубопроводы и т. д. Широко распространен фторопласт–4, хорошо обрабатываемый резанием, а при условии медленной деформации – и давлением. При температуре выше 200<sup>0</sup> С из фторопласта начинается выделение фтористых соединений. Хрупкость наступает при температурах менее –70<sup>0</sup> С. Газовыделение у фторопласта меньше, чем у резины, он обладает хорошими электроизоляционными свойствами и очень малым коэффициентом трения. Фторопласт-4 имеет следующие физические свойства:

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$(2,12,3) \cdot 10^3$
Предел прочности при растяжении, МПа	14
Предел упругости при сжатии, МПа	. 3
Максимальная рабочая температура, °С	200
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)	0,006
Коэффициент линейного расширения	$(55210) \cdot 10^{-6}$
Диэлектрическая проницаемость	1,92,2
Электрическая прочность, кВ/мм	26
Газовыделение, $M^3 \cdot \Pi a / (M^2 \cdot c)$	$10^{-4}$
Газопроницаемость по азоту и кислороду	
(при 20 <sup>0</sup> C), м <sup>3</sup> ·Па·мм/ (м <sup>2</sup> ·с·Па)	10 <sup>-9</sup>

Полиэтилен обладает малым газовыделением, но из-за недостаточной теплостойкости может применяться только при комнатной температуре.

Широко распространена, особенно в технике низкого вакуума, вакуумная резина. Ее газовыделение значительно меньше, чем у обычной резины, но все же много больше, чем у фторопласта. Кроме того, резина имеет большую, чем у фторопласта газопроницаемость. Термостойкость резины мала, но самые термостойкие сорта имеют рабочую температуру около 300<sup>0</sup> С. Преимуществом резины являются отличные упругие свойства, благодаря которым она является прекрасным материалом для вакуумных уплотнителей. Вакуумные резины делятся на обычные и термостойкие, на маслостойкие и немаслостойкие.

Немаслостойкая белая вакуумная резина 7889 очень эластичная с малой газопроницаемостью. Диапазон рабочих температур от +90 до -10<sup>0</sup> С. Маслостойкая черная

резина 9024, ИРП–1015 имеет худшую эластичность и большее газовыделение, но меньшую газопроницаемость по сравнению с резиной 7889, Сорт ИРП–1015 более маслостоек, но менее прочен. Термостойкие и маслостойкие резины (ИРП–1368, ИРП–2043) с рабочей температурой 250<sup>0</sup> перед употреблением должны обезгаживаться в вакууме в течение 24 часов при максимальной рабочей температуре. Сравнительные характеристики различных вакуумных резин представлены в табл. С.24.

Для низковакуумных систем, а также в ремонтных работах, часто используются клеевые соединения. Эпоксидный клей Л-4 применяется для соединения стали, стекла и керамики с рабочей температурой не более 140<sup>°</sup> С, теряет прочность при длительном воздействии теплой воды. Кремнеорганические клеи ИП–9, КТ–9, ВКТ–3, ВС–10Т могут выдерживать кратковременный нагрев до 300..350<sup>°</sup> С или длительную работу при 150..180<sup>°</sup> С.

Для лучшей герметизации разборных низковакуумных соединений между соединяемыми деталями добавляется смазка Рамзая (смесь каучука, вазелинового масла и парафина). Временная ликвидация течей и проверка на герметичность производится с помощью замазки из мела, каучука и вакуумного масла (вакопласт). На основе воска и канифоли изготавливают заливочные массы, плавящиеся при температуре 60..90<sup>0</sup> С и называемые пицеином.

## 8.2. Неразборные соединения

Неразборные соединения изготавливаются методами пайки и сварки. Вакуумно-

герметичная пайка имеет большое значение для вакуумного машиностроения, обеспечивая изготовление узлов из различных материалов: стали, керамики, стекла, молибдена. По сравнению со сваркой герметичная пайка металлов позволяет значительно уменьшить температуру разогрева соединяемых металлов.

Пайкой соединяются некоторые металлы и сплавы, не дающие герметичных сварных соединений: сталь и латунь, алюминий и никель. Припой должен иметь высокую механическую прочность, пластичность, коррозионную стойкость, смачиваемость и жидкотекучесть при температуре плавления. Это обеспечивает возможность его проникновения в зазоры между соединяемыми деталями.

Зазор в месте спая должен быть во время расплавления в пределах 0,05..0,12 мм для втягивания припоя в зазор силами поверхностного натяжения

$$h = D_{\hat{a}} - D_{\hat{r}};$$
  
$$D_{B} = D'_{B}(1 + \alpha_{B} \Delta t); \qquad D_{O} = D'_{O}(1 + \alpha_{O} \Delta t);$$

где h – зазор,  $D_{\hat{a}}'$  и  $D_{\hat{i}}'$  – диаметры вала и отверстия при комнатной температуре;  $\alpha_{\hat{a}}$  и  $\alpha_{\hat{i}}$  – температурные коэффициенты линейного расширения материалов вала и отверстия.

Температуру плавления припоя выбирают больше, чем максимальная температура обезгаживания узла, но меньше, чем температуры плавления соединяемых материалов.

По относительной тугоплавкости припоев пайка делится на твердую и мягкую. Припои, плавящиеся при температуре ниже  $300^{\circ}$ C , используются при мягкой пайке, а припои с температурой плавления более  $300^{\circ}$ C – при твердой. При производстве узлов вакуумной аппаратуры мягкая пайка может использоваться для элементов с рабочей температурой не более  $120^{\circ}$ C, а твердая –  $450^{\circ}$ C. Основные марки, состав и температуры плавления в табл. С.25, а твердых – в табл. С.26.

Для получения герметичных соединений важно, чтобы температурный интервал кристаллизации материала припоя не превышал 50<sup>0</sup>С. При большем значении припои склонны к ликвации и не обеспечивают герметичного соединения. Этим же недостатком обладают припои с большим количеством растворенных газов и органических включений. Такие припои кипят при плавке в вакууме, и швы получаются пористыми.

Пайка может осуществляться на воздухе и в защитной среде. При пайке на воздухе для защиты поверхностей от окисления применяются флюсы. Для мягкой пайки флюсом

является смесь равных долей ZnCl<sub>2</sub> и HCl или раствор канифоли в спирте. Твердая пайка нержавеющей стали осуществляется с флюсом, содержащим 40% фтористого калия и 60% борной кислоты. Для твердой пайки конструкционных сталей, меди, латуни, бронзы в качестве флюса может применяться обезвоженная бура.

Во время пайки в защитной среде – водороде или вакууме детали не загрязняются флюсами и обезгаживаются. Вакуумноводородные печи для пайки обеспечивают максимальную температуру рабочего пространства 1150 °C. Пайка в водороде меди марок М1, М2, М3 из-за "водородной болезни" не производится, а пайка деталей из нержавеющей стали возможна в водороде, осушенном до точки росы не выше -60°C, из-за опасности образования на поверхности устойчивых оксидов хрома. Для получения герметичных спаев большое значение имеет равномерность нагрева и охлаждения сборочного узла.

Детали при сварке должны быть собраны и установлены в приспособления, обеспечивающие их взаимную неподвижность при пайке. Паяные соединения не обеспечивают высокой механической прочности на растяжение. При напряжении 2,5 МПа соединение деталей из стали 20 с припоем ПОС-40 разрушается через 5000 ч, а при







Рис.8.1. Паяные соединения: а - рациональные конструкции, б - нерациональные конструкции



напряжениях 9,4 МПа – через 85 ч.

Рис.8.2. Групповое паяное соединение, выполняемое одновременно в вакуумноводородной печи



Рис.8.3. Паяные соединения цилиндрических деталей: а,б,в,г,д,е - трубы; ж,з,и - заглушки, фланцы и днища, к - патрубки, л,м - сильфоны с фланцами

Предел прочностей твердых припоев 200..400 МПа. Наиболее надежны в отношении прочности паяные соединения, работающие на срез. Рациональные и нерациональные формы стыковых и угловых паяных соединений показаны на рис.8.1, а, б.

При изготовлении сложных паяных узлов, имеющих большое количество спаев, которые могут быть спаяны в водородно-вакуумной печи, за один разогрев всего узла припой диаметром 1 или 1,5 мм закладывается перед пайкой в специальные внутренние канавки (рис.8.2). Большие трудности встречаются при изготовлении сложных паяных узлов, которые не могут быть выполнены за один разогрев всего узла. В этом случае применяются припои с различной температурой плавления.

Примеры паяных соединений труб, фланцев, заглушек, днищ, сильфонов показаны на рис.8.3.

В элементах конструкций вакуумных машин и приборов часто приходится соединять между собой металл со стеклом или с керамикой. Герметичный спай металла со стеклом образуется только в том случае, когда на поверхности спаиваемого со стеклом металла



Рис.8.4. Согласованные спаи металла со стеклом: а,б,в - трубчатые; г,д,е - дисковые; ж,з,и - окошечные

имеется тонкий, но плотный слой оксидов. Оксиды металлов, как и стекло, имеют ионную структуру и, хорошо растворяясь в стекле, образуют вакуумно-плотное соединение.

Спаи стекла с металлом могут быть трех видов: согласованные, несогласованные и с металлическим припоем.

В согласованных спаях (рис. 8.4, а..и) стекло и металл имеют близкие коэффициенты линейного расширения во всем диапазоне рабочих температур. Большая часть сортов технического стекла имеет коэффициент линейного расширения (3..10)•10<sup>-6</sup>. Коэффициент линейного расширения металлов и сплавов изменяется от 4,4•10<sup>-6</sup> (для вольфрама) до 17,8•10<sup>-6</sup> (для меди). Напряжения, возникающие в согласованных спаях при их охлаждении от температуры размягчения стекла до комнатной температуры, меньше предела прочности любого из соединяемых материалов. Так как добиться полного совпадения температурных зависимостей коэффициентов линейного расширения для обоих соединяемых материалов



Рис.8.5. Несогласованные спаи металла со стеклом: а,б,в - трубчатые; г,д,е -окошечные

нельзя, то стремятся к тому, чтобы они совпадали при комнатной температуре и температуре отжига (на 50 <sup>0</sup>С ниже температуры размягчения стекла).

В несогласованных спаях коэффициенты линейного расширения соединяемых материалов могут значительно отличаться друг от друга, а опасные напряжения, которые должны были бы образоваться в этих условиях, предотвращаются применением конструкций с гибким элементом, металлов небольшого диаметра, металлов с невысоким пределом текучести, переходных согласованных спаев и конструкций, в которых используется повышенная прочность стекла на сжатие. На рис. 8.5,а..е приведены примеры несогласованных спаев. В конструкциях рис. 8.5,а,б,г используют заостренный конец трубы в качестве гибкого элемента, на рис. 8.5,в ту же роль выполняет тонкая цилиндрическая оболочка, в конструкциях рис. 8.5,д,е используется повышенная прочность стекла на сжатие. Коэффициент линейного расширения металла в этих спаях должен быть больше, чем у стекла. При охлаждении такой конструкции в стекле возникают внутренние сжимающие напряжения.

В спаях с металлическим припоем на поверхность стекла путем обмазки с последующим обжигом наносится слой серебра, который облуживается обычным способом, и к нему припаивается медная головка. Такой спай представляет собой металлическую втулку и стеклянную трубку, в зазор между которыми залит легкоплавкий припой, хорошо смачивающий металл и стекло и компенсирующий их температурные деформации. Изготовленный таким образом металлостеклянный узел соединяется пайкой с другими металлическими деталями.





1 - металлический стержень, 2 - керамическое кольцо, 3 - металлический стакан (ковар, никель); 4 - втулка (ковар, никель); 5 - кольцо (никель); 6 - припой



Рис.8.7. Угловые сварные соединения: а - без отбортовки, б - с отбортовкой, в - соединение деталей разной толщины

Рис.8.8. Сварное соединение фланца с обечайкой: а - с подкладкой, б - без подкладки, в - с проточкой

Спаи керамики с металлами широко применяются в элементах сверхвысоковакуумных систем, так как имеют более высокую термостойкость, чем спаи стекла с металлом. Их обычно изготавливают с применением активных припоев, образующих в процессе плавления химические соединения с керамикой. На рис. 8.6 показаны примеры конструктивных элементов, в которых используются спаи керамики и металла. Спаи керамики со стеклом могут быть получены при непосредственном соединении спаиваемых материалов.

Для герметичного соединения деталей в вакуумной технике могут применяться следующие виды сварок: а) газовая ацетиленовая; б) электродуговая; в) газодуговая в защитной среде: г) холодная методом пластической деформации; д) диффузионная в вакууме и сварка трением; е) электроннолучевая.



Рис.8.9. Сварка сильфонов:



Электродуговая сварка может применяться для соединения деталей низковакуумных систем с толщиной стенки более 2 мм. Лучшие результаты можно получить при автоматической сварке под слоем флюса. Для сверхвысоковакуумных систем она не рекомендуется из-за недостаточной герметичности.

Газодуговая сварка в защитной среде с плавящимся и неплавящимся электродом для соединения различных металлов может применяться для всех типов вакуумных систем. Нержавеющая сталь, медь, алюминий при толщинах в месте сварки O,1 до 2 мм свариваются в среде аргона или гелия вольфрамовым неплавящимся электродом. Лучшие результаты получаются при автоматической сварке в камерах, в которые после откачки воздуха напускается инертный газ.

Холодная сварка методом пластической деформации применяется для соединения небольших деталей из пластичных материалов(медь, алюминий). Требует сложного прессового оборудовання.

Диффузионная сварка в вакууме и сварка трением применяется для соединения разнородных материалов: меди и керамики и т. д.

Электроннолучевая сварка применяется для соединения химически активных и тугоплавких материалов, ответственных узлов из стали, меди и алюминиевых сплавов. Сварка ведется в вакуумных камерах при давлении не более 10<sup>-3</sup> Па.

Ко всем видам вакуумно-герметичной сварки предъявляются специальные требования.

1. Для получения герметичных соединений сварка должна вестись с постоянной скоростью; перерывы и подварки часто служат местом появления микротрещин, создающих течи.

2. Сварку желательно вести со стороны, обращенной в процессе эксплуатации в вакуум, для уменьшения количества щелей, карманов и неровностей тыльной стороны шва.

3. Допускается вогнутый шов в стыковых и угловых соединениях получающийся при сварке без присадочного материала.

4. После изготовления сварные швы обязательно должны проверяться на герметичность с помощью течеискателей.

К деталям, которые подготавливаются к сварке, предъявляются дополнительные требования: а) детали перед сваркой тщательно очищаются и обезжириваются; б) сопряжения между свариваемыми деталями должны выполняться по скользящей посадке.

Детали для угловых швов можно подготавливать согласно одному из вариантов, показанных на рис. 8.7, а...в. Вариант (рис. 8.7,а) рекомендуется для некруглых, а вариант (рис.8.7,б) – для круглых деталей. Соединение тонкостенной трубы с толстой плитой показано на рис. 8.7,в. Особенностью этой конструкции является дополнительное кольцо, выравнивающее толщины свариваемых деталей. Без этого кольца сварка невозможна из-за оплавления тонкостенной детали.

317



Рис.8.10. Примеры сварных соединений: а - стыковые без отбортовки для плоских деталей, б - стыковые без отбортовки для цилиндрических деталей, в - ж - стыковые с отбортовкой для плоских деталей; з,к - угловые с отбортовкой для плоских деталей; и - угловое без отбортовки для плоских деталей; л - соединение фланца с тонкостенной оболочкой; м - соединение днища с тонкостенной оболочкой.

Сварка фланца с обечайкой может быть выполнена различными способами, показанными на рис. 8.8,а..в. Во всех случаях фланцы не требуют припуска на дополнительную обработку после сварки, так как соединяются одинаковые по толщине тонкостенные элементы, а массивный фланец не успевает даже нагреться за время сварки.

Сильфоны из нержавеющей стали, широко применяемые в высоковакуумной технике, могут иметь толщину стенки от 0,05 до 0,25 мм. Соединения сильфонов при сварке с трубами, фланцами и валами показано на рис. 8.9.

Примеры конструкций плоских, цилиндрических и угловых сварных вакуумных соединений с с отбортовкой и без нее показаны на рис. 8.10.
#### 8.3. Разборные вакуумные соединения

В разборных вакуумных соединениях необходимо обеспечить герметичность стыка двух соединяемых деталей, близкую к герметичности сплошного материала. В месте соприкосновения двух деталей в результате механической обработки всегда остаются микронеровности, которые затрудняют получение вакуумного герметичного соединения.

Герметичность может быть достигнута, если в зазор между соединяемыми материалами поместить уплотнитель, вязкость которого достаточна для заполнения неровностей при контактных напряжениях, значительно меньших предела упругости основных соединяемых материалов. Для заполнения или изоляции микронеровностей можно использовать пластическую деформацию хотя бы одного из двух соединяемых материалов. В качестве уплотнителей могут применяться смазки, резины, фторопласт, металлы.

Определим усилие деформации микровыступов, необходимое для обеспечения заданного значения натекания. Сделаем следующие допущения: 1) герметизируемая поверхность идеально гладкая; 2) микровыступы уплотнителя имеют форму пирамиды с углом при вершине  $2\alpha$ =150°C, а в основании пирамиды лежит квадрат (рис. 8.11); 3) высота микровыступов постоянна и равна H; 4) возможность появления узких и глубоких рисок мала; 5) основания микровыступов лежат в одной плоскости.

В процессе деформации микровыступов наблюдается их упрочнение вследствие пластической деформации. Зависимость между напряжениями и деформациями в поверхностном слое запишем в виде степенной функции:

$$\sigma = \sigma_s \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \right)^n = B \varepsilon^n; \qquad (8.1)$$

здесь

$$B = \sigma_S / \varepsilon_S^n = E \varepsilon_S^{1-n},$$

где  $\varepsilon$  – обобщенная относительная деформация микровыступов;  $\sigma$  – напряжение в зоне контакта;  $\sigma_{s}$  – предел текучести материала уплотнителя;  $\varepsilon_{s}$  – относительная деформация микровыступа, соответствующая напряжению  $\sigma_{s}$ ; *n* – показатель степени ( $0 \le n \le 1$ ); для идеально пластичных материалов n = 0, а для идеально упругих n = 1; E – модуль упругости материала уплотнителя.





Рис. 8.12. Контактные напряжения при деформации пирамиды, имеющей в основании квадрат и угол при вершине 150°: 1 - расчетная, 2 - экспериментальная



На рис. 8.12 приведена зависимость контактных напряжений от относительной деформации высоты квадратных пирамид с углом при вершине  $150^{\circ}$  для образцов из отожженной меди МБ. Кривая 2 получена экспериментально, а кривая 1 – аппроксимация формулой (8.1) при *B* =580 МПа и *n* = 0,29.

Контактные напряжения для выбранной модели уплотнения при воздействии удельного давления *q* определяют по формуле

$$\sigma = \frac{q}{\epsilon^2}$$
(8.2)

где  $\varepsilon = a/H$  (*a* - сближение контактируемых поверхностей). Решая совместно (8.1) и (8.2), найдем связь между удельным давлением и относительной деформацией микровыступов:

$$\varepsilon = \left(\frac{q}{B}\right)^{\frac{1}{n+2}}.$$
(8.3)

Зависимость относительной деформации микровыступов от удельного давления, согласно (8.3), для абсолютно упругого и идеального пластичного материалов уплотнителя показана на рис. 8.13.

Подсчет проводимости элементарной канавки  $b \times b$  (см. рис.8.11). в молекулярном режиме течения по уравнению Кнудсена (2.55) дает следующее выражение при  $\varepsilon \to 1$ :

$$U_{\hat{a}} = 0,22\upsilon_{\hat{a}}H^{2}(1-\varepsilon)^{3}, \qquad (8.4)$$

где *v<sub>a</sub>* – среднеарифметическая скорость молекул газа.

Сделав дополнительное допущение об отсутствии волнистости поверхности реальных уплотнений, имеющих длину *l* и ширину *h*, можно определить общую проводимость параллельно и последовательно соединенных элементарных канавок:

$$U_{0} = \frac{l}{h} U_{\hat{a}}.$$
 (8.5)

Подставляя в (8.5) выражение для U<sub>в</sub> из (8.4) и для є из (8.3), получим уравнение для определения проводимости идеализированного стыка гладкой и шероховатой поверхностей при молекулярном режиме течения газа:



Рис.8.13. Зависимость относительной деформации микровыступов от удельного давления для абсолютно упругого материала уплотнителя (n = 1) и идельно пластичного (n = 0)

$$U_{0} = \frac{0.22\upsilon_{a}H^{2}l}{h} \left[ 1 - \left(\frac{q}{B}\right)^{\frac{1}{n+2}} \right]^{3}.$$
 (8.6)

Поток газа через уплотнение, отнесенный к единице его длины,

$$Q_{1} = U_{0} \frac{\Delta p}{l} = K_{\tilde{a}} K_{\hat{o}} K_{\tilde{n}}$$

$$(8.7)$$

где K<sub>г</sub>, K<sub>ф</sub> К<sub>с</sub> – факторы газа, формы и силы:

$$K_{\tilde{a}} = \Delta p \upsilon_{a}; K_{\hat{o}} = 0.22 H^{2} / h; K_{\tilde{n}} = \left[ 1 - \left(\frac{q}{B}\right)^{\frac{1}{n+2}} \right]^{3}$$

Из выражения (8.7) можно рассчитать удельное давление, которое необходимо создать, чтобы получить заданное значение удельного натекания  $Q_1$ :

$$q = B \left[ 1 - \left( \frac{Q_1}{K_{\tilde{a}} K_{\hat{o}}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{n+2}$$
(8.8)

Для сравнения эффективности различных уплотнений обычно пользуются не удельным давлением, а силой, приходящейся на единицу длины уплотнения:

$$F = qh = Bh \left[ 1 - \left( \frac{Q_1}{K_{\tilde{a}} K_{\delta}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{n+2}$$
(8.9)

Из последней формулы видно, что полная герметичность соединения по данной модели наступает, когда F = Bh. В реальных уплотнениях за счет глубоких рисок практически невозможно добиться полной герметичности.

К разборным вакуумным соединениям предъявляются следующие требования: минимальное натекание и газовыделение; механическая прочность; термическая стойкость – способность выдерживать многократные прогревы без нарушений герметичности; коррозионная стойкость; максимальное число циклов разборки и сборки с сохранением герметичности; удобство ремонта и технологичность в изготовлении; возможность легкой проверки на герметичность.

В вакуумной технике в системах с температурой прогрева до 300°С широко применяются резиновые уплотнители. Резина обладает хорошими упругими свойствами, и для создания вакуумно-герметичного соединения со стальной поверхностью с  $R_A = 10$  мкм требуются небольшие усилия. Для прокладок шириной 4 мм удельное усилие уплотнения 4..8 Н/мм, что соответствует удельным давлениям 1..2 МПа. Резиновые уплотнения допускают



Рис.8.14. Конструктивные схемы полимерных уплотнительных элементов

практически неограниченное число разборок и сборок, просты в изготовлении, редко нуждаются в ремонте. Недостатком резиновых уплотнений является повышенное газовыделение и газопроницаемость по сравнению с металлическими или стеклянными деталями. Форма резинового уплотнителя круглая или квадратная. Диаметр или сторону квадрата выбирают из конструктивных соображений равной 2..5 мм.

Соединение на рис. 8.14,а между двумя плоскими фланцами – самое простое в изготовлении и ремонте, но оно не обеспечивает точной фиксации уплотняемых деталей. В нем не ограничивается максимальное усилие на прокладку, что может привести при сборке к перегрузкам прокладки, сопровождающимся ее пластической деформацией. Для фиксации соединяемых деталей и ограничения уплотняющего усилия могут использоваться дополнительные конструктивные элементы. Соединение (рис. 8.14,6) ограничивает максимальное усилие сжатия прокладки и обеспечивает осевую фиксацию за счет соприкосновения соединяемых деталей. Форма уплотнителя может быть как круглая, так и квадратная. Для создания необходимого усилия герметизации степень деформации прокладки составляет 30%. Эти соединения очень часто используются в различной вакуумной аппаратуре. Их основные размеры показаны на рис. П15 и П.16 приложения.

Соединение на рис. 8.14,г с подачей повышенного давления внутрь уплотнителя рекомендуется для уплотнения фланцев большого диаметра. Оно имеет повышенную деформацию уплотнительного элемента и способно компенсировать волнистость уплотняющей поверхности фланцев.

Соединение на рис. 8.14, д имеет двойное уплотнение с промежуточной откачкой. Оно значительно сложнее других соединений с резиновыми прокладками, но обеспечивает повышенную надежность и уменьшение газопроницаемости соединения.

Соединение на рис. 8.14,е отличается армировкой уплотнительного элемента со стороны вакуума металлической фольгой, что обеспечивает снижение газовыделения и газопроницаемости соединения за счет уменьшения поверхности соприкосновения уплотнителя с вакуумом.

В качестве уплотнителя может применяться фторопласт, имеющий меньшее газовыделение и газопроницаемость. Недостатком фторопласта является низкий предел упругости, поэтому для уплотнения необходимо создавать напряженное состояние всестороннего сжатия. Наилучшим образом этому соответствует конструктивная схема, изображенная на рис. 8.14, в.

323



Рис.8.15. Схемы уплотнений с металлическими прокладками: а - проволочный уплотнитель, б - с плоской прокладкой, работающей на срез, в - конусное, г - с всесторонним сжатием, д - ножевое, е - канавочно-клиновое, ж - конфлат

Она обеспечивает ограничение усилия, действующего на прокладку, и фиксирует соединяемые детали как в осевом, так и в радиальном направлении. Форма уплотнителя квадратная. В зазор 0,1 мм фторопласт не вытекает даже при очень больших удельных нагрузках. Основные размеры соединения несимметричными фланцами и фторопластовым уплотнителем показаны на рис. П.17 приложения.

Для сверхвысокого вакуума большое значение имеют металлические уплотнения, допускающие прогрев до температуры 450..500°С. Заполнение микронеровностей происходит за счет пластической деформации материала прокладки. Текучесть металлов значительно меньше, чем у резины, и поэтому для создания уплотнения требуются большие удельные давления и лучшая чистота поверхности. Газовыделение металлических прокладок в 10 раз меньше, чем резиновых, но соединение с металлическими прокладками сложнее в изготовлении, допускает ограниченное число прогревов и сборок. Схемы наиболее распространенных металлических уплотнений показаны на рис. 8.15,а...ж. Соединения с круглым уплотнителем (рис. 8.15, *a*) наиболее просты в изготовлении, ремонте и надежно работают с прокладками из меди и золота. Усилие герметизации в таких соединениях с золотой проволокой Ø 0,8 мм составляет 350 Н/мм. Усилие герметизации в уплотнении (рис. 8.15,б) очень чувствительно к соосности режущих кромок. Для прокладок толщиной 4 мм минимальное усилие герметизации для неотожженной меди 470 Н/мм, а для



Рис.8.16. Упругие элементы разборных соединений: а - упругая прокладка, б - упругие фланцы

алюминия – 340 Н/мм.

Конусное соединение (рис. 8.15,в) по сравнению с плоским требует несколько меньшего усилия герметизации. большие но имеет габариты И плохо работает при неравномерных прогревах, из-за появления зазора при радиальном

градиенте температуры. Уплотнение со всесторонним сжатием (рис. 8.15, *г*) плохо разбирается из-за проникновения материала прокладки в зазоры между сопрягающимися деталями. Ножевое уплотнение (рис. 8.15, *д*) имеет наименьшее среди металлических уплотнений усилие герметизации и может применяться вместо резиновых уплотнителей, но отличается увеличением усилия герметизации при повторных сборках. Канавочно-клиновое соединение (рис. 8.15, *е*) с медной плоской прокладкой толщиной 0,5 мм имеет усилие герметизации 280 Н/мм. Его недостатком является наличие замкнутого газового объема и несимметричность фланцев. Уплотнение типа «конфлат» (рис. 8.15,ж) широко применяется для прогреваемых сверхвысоковакуумных систем (см.рис. П 18 приложения).

При обезгаживании разборных соединений, чтобы не произошла их разгерметизация после охлаждения, необходимо обеспечить равномерность нагрева и выбирать материалы с одинаковыми коэффициентами линейного расширения во всем рабочем диапазоне температур. Медь и нержавеющая сталь имеют близкие коэффициенты линейного расширения, поэтому медь широко применяется в качестве материала прокладки между деталями из нержавеющей стали. Для повышения надежности уплотнения используют золотые прокладки или покрытые золотом медные прокладки. Это предотвращает их коррозию при прогревах до 400°С. Для компенсации различия коэффициентов линейного расширения могут использоваться упругие прокладки, тонкие болты, тарельчатые пружины, шайбы, ослабляющие проточки во фланцах и т. д. (рис. 8.16).

### 8.4. Вакуумные трубопроводы.

Элементы вакуумных систем размещаются в машинах и установках в соответствии с требованиями технологического процесса, удобства эксплуатации, ремонта и т.д. Связь между ними осуществляется с помощью соединительных элементов – трубопроводов. Номинальный диаметр отверстия в трубе называется условным проходным диаметром и обозначается  $D_y$ . Размеры рекомендуемых условных диаметров даны в табл. П 13.

Трубопроводы могут быть гибкими или жесткими. Гибкие сложнее жестких и применяются для соединения элементов, не имеющих общей конструкционной базы. Допуск на их установку в этом случае может составлять несколько миллиметров.



Рис.8.17. Конструкции трубопроводов: а - жесткий, б - гибкий, в - сильфон гидроформованный, г - сильфон мембранный

Конструктивные формы трубопроводов показаны на рис. 8.17. Длина трубопровода назначается из конструктивных соображений, связанных с удобством размещения элементов в каркасе вакуумной установки. Диаметр трубопровода определяется при проектировочном расчете, исходя из требований к его проводимости.

Вакуумные трубопроводы должны выдерживать атмосферное давление без разрушения или потери устойчивости. Толщину *S* стенок трубопровода из условия его прочности для тонких стенок  $S / D_y <$ 0,05 рекомендуется определять по формуле

$$S = \frac{p_{\dot{a}\dot{o}\dot{i}} D_{\dot{o}}}{2\sigma_{a\dot{i}\dot{i}}} + C \qquad (8.10)$$



Рис.8.18. Зависимость модуля упругости материала трубопровода от температуры: 1 - углеродистая сталь, 2 - нержавеющая сталь аустенитного класса

где  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление; *С* – прибавка на коррозию и технологический допуск;  $\sigma_{\text{доп}}$  – допускаемое напряжение.

Допускаемое напряжение принимается равным наименьшему из трех значений:  $\frac{\sigma_{_B}^t}{2,6}; \frac{\sigma_{_T}^t}{1,5}; \frac{\sigma_{_{\pi\pi}}^t}{1,5},$  где  $\sigma_{_B}^t, \sigma_{_{\pi}}^t, \sigma_{_{\pi\pi}}^t$  – соответственно предел прочности,

условный предел текучести, условный предел длительной прочности материала труб при их рабочей температуре.

Величина прибавки *C* колеблется в пределах (0,05..0,18)S. Если в результате расчета *S* по формуле (8.10) окажется, что *S* /  $D_y \ge 0,05$ , то расчет следует выполнять по формулам, справедливым для толстостенных цилиндров. Распределение касательных  $\sigma_{\tau}$  и нормальных  $\sigma_{n}$  напряжений в толстостенной трубе может быть определено по формулам

$$\sigma_{\tau} = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} + \frac{(p_2 - p_1) r_1^2 r_2^2}{r^2 (r_1^2 - r_2^2)};$$
(8.11)

$$\sigma_n = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} - \frac{(p_2 - p_1)r_1^2 r_2^2}{r^2 (r_1^2 - r_2^2)};$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давления на наружной и внутренней стороне цилиндра;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы наружной и внутренней поверхностей цилиндра; r – текущий радиус цилиндра.

Если  $p_2=0$ , то наиболее опасным является напряженное состояние внешних волокон трубы. Главные напряжения при  $r = r_1$ :

$$\sigma_{1} = \sigma_{\tau} = -\frac{2p_{1}r_{1}^{2}}{r_{1}^{2} - r_{2}^{2}}; \quad \sigma_{2} = \sigma_{n} = -p_{1}; \qquad \sigma_{3} = -\frac{p_{1}r_{1}^{2}}{r_{1}^{2} - r_{2}^{2}}.$$

Применяя теорию прочности, убеждаемся, что выполняется условие

$$\sigma_{\tilde{a}\tilde{n}} \geq \sqrt{0.5 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}.$$
(8.12)

Толщину стенки цилиндрических трубопроводов, особенно в случае больших диаметров, обязательно следует проверять по условию устойчивости

$$S = 1,25D_{\delta} \left(\frac{pl}{E_{\delta}D_{\delta}}\right)^{0,4} + C, \qquad (8.13)$$

где p и  $E_{\rm T}$  – давление и модуль упругости материала трубопровода, Па;  $D_{\rm y}$  и l – диаметр условного прохода и длина трубопровода, м; S и C – толщина стенки и допуск, м. Зависимость модуля упругости от температуры для типовых конструкционных материалов трубопроводов показана на рис. 8.18.

#### 8.5. Устройства для передачи движения в вакуум.

Необходимость в устройствах для передачи движения в вакуум появляется в связи с тем, что для улучшения условий работы привод механизмов удобнее размещать вне вакуумной камеры. Устройства для передачи движения в вакуум делятся на три группы: 1) для передачи возвратно-поступательного движения; 2) для передачи качательного движения; 3) для передачи вращательного движения. Внутри каждой группы возможна классификация по предельному давлению, передаваемому усилию, скорости перемещения, величине хода и т. д.

При конструировании любых вводов движения в вакуум следует стремиться к тому, чтобы герметизирующий элемент не воспринимал передаваемых усилий, а направляющие и опоры были бы по возможности расположены вне вакуумной камеры. Для пар трения, размещенных в вакууме, следует принимать специальные меры против схватывания трущихся материалов. С этой целью в качестве смазки можно применить дисульфид молибдена MoS<sub>2</sub>, сульфидировать поверхности трения или использовать материалы, сильно отличающиеся по своим физическим свойствам, например металл и керамику.

Вводы поступательного движения для низкого и среднего вакуума изготавливаются обычно с резиновыми и фторопластовыми уплотнителями. Резина и сталь имеют большой коэффициент трения, и резиновые уплотнители подвижных соединений всегда нуждаются в смазке. Фторопласт может работать без смазки, но его износ во время работы должен компенсироваться установкой дополнительных упругих элементов. Уплотнения для ввода поступательного движения в высокий и сверхвысокий вакуум изготавливаются полностью из металла и могут быть прогреты с целью обезгаживания до 400..500°C. Вводы вращения в вакуум отличаются большим разнообразием конструктивных решений, кинематические схемы которых представлены на рис.8.19, а..ж.

329

Ввод вращения в вакуум с пространственным шарниром и уплотнением в виде гибкого элемента, совершающего качательное движение, обеспечивает кинематически жесткую передачу больших моментов с малой частотой вращения. Максимальная частота вращения ограничена усталостной прочностью гибкого



Рис.8.19. Кинематические схемы вводов вращения в вакуум: а - с пространственным шарниром и мембраной, б - магнитный, в - со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, и мембраной; г - со звеном, совершающим плоскопараллельное движение, и сильфоном; д - молекулярное уплотнение с дополнительной откачкой, е - с пространственным шарниром и сильфоном, ж - с волновой передачей

элемента, например сильфона или мембраны, и работоспособностью пары трения, находящейся в вакууме. Ввод может выдерживать нагрев до 450..500°C, что позволяет применять его в сверхвысоковакуумных установках.

Магнитный ввод вращения в вакуум применяется в высоковакуумных системах для передачи вращательного движения с большой частотой вращения и

малым крутящим моментом. Он может быть сделан прогреваемым, но не обеспечивает кинематической жесткости передачи.



Рис.8.20. Конструкции вводов вращения

Уплотнение между вакуумной камерой и промежуточным вакуумом обеспечивается сопротивлением зазора между валом и корпусом установки.

Ввод вращения в вакуум с помощью волновой передачи обеспечивает кинематически жесткую передачу вращательного движения с небольшой частотой вращения. Его можно использовать в системах высокого вакуума.

12

11 10

#### Конструкции



муфтой(рис.8.20,а) имеет входной вал 1, выходной вал 4 и присоединяется к вакуумной камере 5 при помощи резинового уплотнения 3. Сильфон 2 совершает качательное движение, обеспечивая герметичность при плоскопараллельном

654 3

Рис.8.21. Конструкция ввода вращения с

притертыми шайбами





Рис.8.22. Конструкции поступательных вводов

Рис.8.23. Схемы вводов качательного движения в вакуум: а - мембранный, б - сильфонный

движении промежуточной муфты 6. Сильфонный ввод (рис.8.20,б) с изогнутым входным валом 1 и выходным валом 6 закреплен крышкой 2 в стакане 3. Качательное движение сильфона 4 обеспечивает вращение поводковой муфты 5.

На рис. 8.21 показана конструкция ввода вращения с притертыми шайбами, используемыми для работы со смазкой во вращательных насосах. Герметизируемый вал 2 закреплен в корпусе 14 при помощи шарикоподшипника 3. Уплотнения 7 и 9 при помощи пружины 8 прижимаются через вращающиеся кольца 6, 10 к неподвижным 5, 11. Стакан 12 с крышкой 4 заполнен смазкой и винтами 13 присоединен к корпусу через резиновую прокладку 1.

Уплотнение для ввода поступательного движения в высокий и сверхвысокий вакуум (рис. 8.22,а) изготавливается полностью из металла и может быть прогрето с целью обезгаживания до 450..500°С. Оно состоит из штока 1, шпонки 2, корпуса 3, сильфона 4, головки 5, штифта 6. Сильфон 4 из нержавеющей стали приваривается к головке 5 и корпусу 3 электроннолучевой или аргонодуговой сваркой. Вводы поступательного движения для низкого и среднего вакуума

изготавливаются обычно с резиновыми или фторопластовыми уплотнителями. Сальниковое уплотнение (рис.8.22,б) состоит из штока *1*, зажимной гайки *2*, металлической шайбы *3*, резиновой прокладки *4*, фторопластовой втулки 5, корпуса 6 и шпонки 7. Резиновая прокладка является упругим элементом для тонкой фторопластовой втулки, толщина стенки которой 0,5 мм. Через такой ввод можно передавать поступательное перемещение с большой величиной хода, но с малой скоростью – не более 0,1 м/с.

Уплотнение с резиновыми манжетами (рис. 8.22,в) состоит из штока 1, зажимной гайки 2, металлических шайб 3 и 8, резиновых манжет 4 и 7, масленки 5, маслораспределительного кольца 6, стенки вакуумной камеры 9, корпуса 10, подшипника скольжения 11, шпонки 12. Схемы вводов качательного движения в вакуум, показанные на рис. 8.23, имеют угол качания  $\alpha$  в мембранных вводах не более 10<sup>0</sup>, а в сильфонных – 30<sup>0</sup>. Для получения больших углов качания необходимы ускорительные передачи или вводы вращательного движения. Возможно применение поступательных вводов с последующим преобразованием поступательного движения в качательное.

При определении работоспособности вводов вращения, поступательного и качательного движений определенную трудность представляет расчет сильфонов. Сильфон можно рассматривать как пружину с жесткостью

$$C_0 = \frac{Q}{\lambda} = \frac{2,5ED_i \left(1 + 0,013t^2\right) \delta^{2,43}}{n(D_i - D_h)^3},$$
(8.14)

где Q – сила упругости сильфона;  $\lambda$  – упругий ход сильфона;  $D_{\rm H}$  и  $D_{\rm B}$  – наружный и внутренний диаметры сильфона, мм; t – шаг гофр, мм;  $\delta$  – толщина стенки сильфона, мм; n – число гофр; E – модуль упругости материала сильфона. Для полутомпака Л80 модуль упругости E=116000 МПа, а для стали 12Х18Н10Т – 202000 МПа. Наибольшее влияние на жесткость сильфона оказывают разность наружного и внутреннего диаметров и толщина стенки. Жесткость сильфонов следует учитывать при расчете точных и слабонагруженных механизмов.

Расчет на прочность сильфонов можно вести, используя расчетную схему, в которой сильфон рассматривается как система кольцевых пластин, попеременно

связанных по внешнему и внутреннему контурам. На рис. 8.24 показаны две основные схемы деформации сильфонов во вводах движения в вакуум.

Осевая деформация сильфонов используется во вводах поступательного движения, а изгибная – во вводах вращательного движения.

При осевой деформации сильфонов по схеме рис. 8.24,а на величину *h* возникают напряжения

$$\sigma_{0} = \frac{4hE\delta K_{2}}{D_{a}^{2}n(1-\mu^{2})}, \qquad (8.15)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_2$  – постоянный коэффициент, зависящий от отношения наружного и внутреннего радиусов  $\alpha = R_i / R_a$ .

Для контуров сильфона:

наружного

$$\hat{E}_{2i} = \frac{\alpha^2 - 1 - 2\ln\alpha}{(\alpha^2 - 1)^2 - 4\alpha^2 \ln^2 \alpha},$$

внутреннего

$$\hat{E}_{2\hat{a}} = \frac{2\alpha^2 \ln\alpha - (\alpha^2 - 1)}{(\alpha^2 - 1) - 4\alpha^2 \ln^2 \alpha}$$



Рис.8.24. Схемы деформации сильфонов: а - осевая, б - изгибная

При изгибной деформации сильфонов по схеме рис. 8.24,б напряжения зависят от угла поворота торца сильфона ф. Установочная длина сильфона при этом не изменяется. Расчетная формула для напряжений на наружном и внутреннем контурах имеет вид

$$\sigma_{\hat{e}} = \frac{\varphi E \delta \hat{E}_3}{n(1-\mu^2)D_{\hat{a}}}, \qquad (8.16)$$

где при расчете напряжений по наружному контуру

$$\hat{E}_{3i} = \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha(\alpha^2 + 1)\ln\alpha - \alpha^2 + 1},$$

а по внутреннему контуру

$$\hat{E}_{3\hat{a}} = \frac{\alpha^2 - 1}{(\alpha^2 + 1)\ln\alpha - \alpha^2 + 1}.$$

Из записанных формул (8.15) и (8.16) видно, что напряжение по внутреннему контуру больше, чем по внешнему.

Во вводах движения в вакуум сильфоны испытывают циклические нагрузки. Для приближенного расчета долговечности сильфона *N*, выраженной в количестве рабочих циклов или нагружений, которые сильфон может выдержать до разрушения, используется зависимость вида

$$N = K / \sigma^{\mathrm{x}}, \qquad (8.17)$$

где  $K = 11 \cdot 10^{11}$ ,  $\sigma$  – максимальные напряжения в сильфоне по одной из схем нагружения, МПа, x = 4,42 для стали 12Х18Н10Т. Требуемая долговечность сильфонов зависит от условий их работы и может колебаться от 10000 до 1000000 циклов. В особо тяжелых случаях ограничиваются даже 1500 циклами.

#### 8.6. Электрические вакуумные вводы

Для питания электрическим током различных устройств, работающих внутри вакуумной камеры, необходимы герметичные электрические вводы, изолированные от корпуса вакуумной камеры. В зависимости от назначения электрические вводы могут быть низковольтными или высоковольтными, слаботочными или сильноточными, низкочастотными или высокочастотными, низковакуумными или высоковакуумными.

Для подвода электроэнергии К нагревательным элементам широко применяются низкочастотные низковольтные сильноточные вводы. Пример конструкции такого ввода для непрогреваемых вакуумных систем показан на рис. 8.25. В корпусе камеры 11 стакан 10 уплотняется прокладкой 9. Гайка 8 затягивает сальник 12 в корпусе ввода 7. Токосъем 6 уплотняется 5 прокладками В головке 4. Материалом для прокладок служит резина, а изоляторы 2 могут быть любых изготовлены ИЗ сортов вакуумной керамики. Во время работы для охлаждения через штуцера 3 и трубку 1 подается вода.



Рис.8.25. Водоохлаждаемый электрический ввод для низковакуумных систем

Высоковольтный ввод для сверхвысоковакуумных систем (рис. 8.26, а) приваривается к основанию 7 нижним колпачком 6. Керамика 5 соединяется с колпачками 6 и 4 вакуумно-герметичной пайкой твердыми припоями.



Рис.8.26. Электрические вводы в вакуум: а - высоковольтный прогреваемый ввод для сверхвысоковакуумных систем, б - ввод для термопар

Одновременно производится пайка головки 2 и гнезда 3 к верхнему колпачку 4. Центральный стержень 1 завинчивается в гнездо 3.

Для точного измерения температуры при вводе в вакуумную систему термопары нужно стремиться к отсутствию переходных контактов. Ввод, показанный на рис. 8.26,6; позволяет этого достигнуть и может применяться в непрогреваемых вакуумных системах. В корпусе 6 изоляционными втулками 5 и 3 с прокладками 4 уплотняются один или оба провода термопары 1 с помощью накидной гайки 2. Материалом прокладки может служить резина, а изоляционных втулок – фторопласт.

#### 8.7. Вакуумные затворы

В вакуумных машинах и установках для коммутации различных частей вакуумной системы широко используются различные вакуумные затворы, классификация которых приведена на рис. 8.27.



Рис.8.27. Классификация вакуумных затворов

В качестве натекателей могут применяться пористые материалы, некоторые металлы, проницаемые для отдельных газов. Микрометрическое перемещение иглы в отверстии, изменение зазора между материалами с различными коэффициентами линейного расширения могут быть применены для создания и регулировки больших вакуумных сопротивлений.

Вакуумные краны применяются в установках с малым газоотделением, в линиях предварительного разрежения и в случаях, когда не требуется получения больших проводимостей. В металлических вакуумных клапанах и затворах, работающих при комнатной температуре, используются резиновые и фторопластовые уплотнители (рис. 8.28,а).

В прогреваемых конструкциях применяется герметизация за счет пластической деформации материала одной из соприкасающихся поверхностей.

338



Рис.8.28. Уплотнительные элементы вакуумных затворов: 1 - седло, 2 - уплотнитель, 3 - герметизирующий элемент

Широко распространена конструкция с конусным уплотнительным элементом (рис. 8.28,б), изготовленным из меди или алюминия. Недостатком этой конструкции является постепенное увеличение площади герметизирующих поверхностей, а следовательно, и усилия, необходимого для закрытия клапана. В конструкции рис. 8.28,в уплотнительный элемент работает на срез, усилие герметизации не зависит от числа срабатываний, но возрастает ход запирающего элемента.

В конструкции рис. 8.28,г усилие герметизации и ход уплотнительного элемента не зависят от числа циклов срабатывания, но при этом не происходит и образования чистой поверхности в месте соприкосновения герметизирующих элементов. Надежная работа такой конструкции обеспечивается изготовлением уплотнителя из благородных металлов.

Усилие герметизации на 1 мм длины резиновых уплотнителей составляет (5..2,5)Н, для алюминиевых – (100..150)Н, для медных – (200..300)Н. Во всех конструкциях вакуумных затворов привод должен обеспечить постоянную величину герметизирующего усилия. Превышение оптимального герметизирующего усилия сокращает число циклов срабатывания затвора.



Рис.8.29. Кинематическая схема электромеханического привода вакуумного затвора

Рис.8.30. Приводы вакуумных затворов: 1 - шестизвенный механизм, 2 - эллипсограф

Уплотнители с расплавляемыми металлами, обычно галлий, индий олово или свинец, (рис. 8.28,д,е), не требуют больших усилий для закрывания. В конструкции рис. 8.28,д уплотнитель 2 в момент перемещения герметизирующего элемента 3 должен быть в расплавленном состоянии. В конструкции рис. 8.28,е уплотнитель расплавляется только время от времени для обновления герметизирующей поверхности. Затворы с расплавляемыми уплотнителями имеют малый срок службы из-за быстрого окисления, испарения и механического удаления уплотняющего материала.

Выбор кинематической схемы привода вакуумного затвора определяется усилием герметизации и величиной хода уплотняющего элемента. Часто встречается схема комбинированного ручного и электромеханического привода (рис. 8.29). В корпусе 1 с двумя присоединительными патрубками 10 и 12 поступательно движется герметизирующий элемент 11, связанный с корпусом сильфоном 2. Герметизирующее усилие создается в винтовой паре между валом 3 и корпусом 1. Ручной привод осуществляется от штурвала 7, который жестко связан с валом 3, диски фрикционной муфты 4 при этом разъединяются под воздействием пальца, движущегося в угловом пазу полумуфты 6. Усилие ручного привода не регулируется. Электромеханический привод от электродвигателя 9 через червячную передачу 8 и 5, фрикционную муфту 4 и винтовую пару на валу 3 создает герметизирующее усилие, величина которого ограничена максимальным крутящим моментом, передаваемым муфтой 4.

Электромагнитный привод удобен для дистанционного управления вакуумными клапанами. Герметизирующее усилие обычно создается пружиной. При включении электрического тока клапан открывается. Для облегчения условий работы электромагнита в клапанах со значительным герметизирующим усилием применяется схема с ручным взводом и электромагнитным спуском.

Для увеличения герметизирующего усилия и более удобной компоновки затворов применяются шарнирные механизмы (рис. 8.30,а), находящиеся в момент закрытия затвора в положении близком к крайнему, когда достигается наибольшее передаваемое усилие. Механизм эллипсографа (рис. 8.30,б) имеет дополнительное преимущество, так как в месте герметизации в этом случае отсутствует составляющая запирающего усилия, перпендикулярная перемещению герметизирующего элемента. Это предотвращает появление сил трения в момент уплотнения и позволяет использовать сложные формы уплотняющих элементов.

Вакуумные затворы для трубопроводов больших диаметров для уменьшения габаритов стараются делать плоской формы, используя механизм параллелограмма с малой длиной кривошипа.

При разработке конструкций вакуумных затворов необходимо рассчитать их проводимости при молекулярном режиме течения газа. Для аналитического расчета проводимости затвора необходимо составить его эквивалентную схему из простых элементов, для которых имеются аналитические зависимости. В качестве таких простых элементов могут быть, рассмотренные ранее, длинные или короткие трубы, отверстия, концентрические трубы и т. д. При составлении эквивалентных схем трудности возникают при определении входных сопротивлений отверстий.





Рис.8.31. Расчетная схема углового вакуумного клапана:  $A_1..A_{10}$  - относительные размеры при  $d_o = 1$ 

Рис.8.32. Эквивалентная схема вакуумного клапана (рис.8.31)

Аналитические формулы, полученные для проводимостей отверстий, справедливы при подключении их к бесконечному или полуограниченному объему. В случае произвольно расположенных поверхностей, предшествующих входному отверстию, аналитических зависимостей не существует. Для определения проводимостей в этом случае приходится использовать формулу для соединения двух трубопроводов различного поперечного сечения.

Можно оценить ошибку, возникающую при такой замене. Известно, что максимальная ошибка (12%), появляющаяся при расчете трубопроводов без учета входного сопротивления, возникает при длине трубопровода l = 1,2d, где d -диаметр трубопровода. В угловом клапане, например, имеется не менее двух входных сопротивлений, подключенных к ограниченному объему; таким образом, ошибка может составить 24% от общей проводимости клапана. Более высокой точности расчета можно достигнуть только применением метода статистических испытаний.

Рассмотрим в качестве примера расчет углового вакуумного клапана, расчетная схема которого изображена на рис. 8.31. Построим эквивалентную схему клапана (рис.8.32). Трудности при составлении схемы возникают в сечениях *B* и *G*. Невозможно аналитическим путем учесть влияние отношения  $A_7 / d_0$  и размера  $A_1$  на проводимость входного отверстия в сечении *B*; в сечении *G* размер  $A_{11}$  задается в достаточной степени произвольно, проводимость  $U_6'$  участка длиной  $dA \rightarrow 0$  равна бесконечности.

Уравнение для расчета проводимости такой эквивалентной схемы, рассматриваемой как ряд последовательно соединенных элементов, можно записать в следующем виде:

$$1 / U_{\Sigma} = 1 / U_1 + 1 / U_2 + ... + 1 / U_8.$$
(8.18)

Считая, что расчет проводится для воздуха при комнатной температуре, для проводимости длинной трубки и отверстия при молекулярном режиме получим

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{91d_{0}^{2}} + \frac{A_{2}}{121d_{0}^{3}} + \frac{A_{1}}{121A_{7}^{3}} + \frac{A_{8}^{2}}{91A_{7}^{2}(A_{7}^{2} - A_{8}^{2})} + \frac{A_{3}A_{7}}{170[(A_{7} - A_{8})^{2}(A_{7} + A_{8})]A_{8}} + \frac{A_{1}^{2}}{121A_{0}^{3}} + \frac{A_{2}^{2}}{121A_{0}^{3}} + \frac{A_{2}^{2}}{121A_{0}^{3}} + \frac{A_{1}^{2}}{121A_{0}^{3}} + \frac{A_{1}^{2}}{121A_{0$$

$$+\frac{A_{7}[A_{4}-(A_{1}+A_{3})]}{170A_{9}[(A_{7}-A_{9})^{2}(A_{7}+A_{9})]}+\frac{A_{11}^{2}}{91A_{10}^{2}(A_{11}^{2}-A_{10}^{2})}+\frac{A_{6}}{121A_{10}^{3}}$$
(8.19)

В выражении (8.19) U<sub>Σ</sub> – общая проводимость клапана, м<sup>3</sup>/с; размеры  $A_1..A_{11}$ и d – в метрах. Сделаем ряд преобразований в формуле (8.19), учитывая следующие условия и ограничения: 1) выберем  $A_{11}$  из условия  $\pi A_7 A_{10} = \pi A_{11}^2 / 4$ , откуда  $A_{11} = 2\sqrt{A_7 A_{10}}$ ; 2)при отрицательных длинах участков их проводимость примем равной бесконечности.

При этом выражение (8.19) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{91d_0^2} + \frac{A_2}{121d_0^2} + \frac{A_1}{121A_7^3} + \frac{A_8^2}{91A_7^2(A_7^2 - A_8^2)} + \frac{A_7Bf(A_4 - A_1)}{170[(A_7 - A_8)^2(A_7 + A_8)]A_8} + \frac{A_7[A_4 - (A_1 + A_3)]f(A_4 - A_1 - A_3)}{170[(A_7 - A_9)^2(A_7 + A_9)]A_9} + \frac{A_7}{22,8A_{10}^2(4A_7 - A_{10})} + \frac{A_6}{121A_{10}^3} \cdot (8.20)$$

В формулу (8.20) для удобства определения проводимости клапана при различных положениях уплотняющего элемента, места расположения бокового патрубка и т.

д., когда отдельные участки в эквивалентной схеме могут отсутствовать, введены две функции:

$$B = \begin{cases} A_{3,} & a \tilde{n} \ddot{e} \dot{e} & (A_4 - A_1) \ge A_3; \\ A_4 - A_1, & a \tilde{n} \ddot{e} \dot{e} & (A_4 - A_1) < A_3; \end{cases}$$
$$f(x) = \begin{cases} 1, & a \tilde{n} \ddot{e} \dot{e} & \text{sign}(x) = 1; \\ 0, & a \tilde{n} \ddot{e} \dot{e} & \text{sign}(x) = -1. \end{cases}$$

Расчеты, сделанные по формулам (8.19) и (8.20), сравним с расчетами, выполненными математическим моделированием методом статистических испытаний, по вероятности прохождения клапана молекулами, входящими в отверстие нижнего входного фланца:  $P_{1\rightarrow 2} = U_{\Sigma}/(91d_0^2)$ . Результаты расчетов показывают, что при ходе клапана  $A_1 > 0,245$  относительная погрешность аналитических расчетов не превышает 25%.

#### 8.8. Контрольные вопросы

8.1. Какие специальные требования предъявляются к материалам вакуумных систем?

8.2. Какой из материалов имеет повышенную газопроницаемость по водороду?

8.3. Какие спаи металла со стеклом называются согласованными?

8.4. При каких рабочих температурах применяется твердая пайка?

8.5. Какие припои применяются для мягкой пайки?

8.6. Способ уменьшения газовыделения металлических вакуумных систем?

8.7. Какие газы могут проникать через стекло?

8.8. В каких случаях целесообразно применять бескислородные сорта меди?

8.9. Для какого сортамента материала обеспечивается лучшая герметичность при малых толщинах?

8.10. Для каких целей в вакуумной технике используется сплав, называемый коваром?

8.11. Какой тип разборных вакуумных соединений обеспечивает при сборке более высокую точность осевых размеров?

8.12. Какой тип вакуумных соединений допускает большее число разборок и сборок?

8.13. В каком случае целесообразно применять двойное вакуумное уплотнение с промежуточной откачкой?

8.14. Какой тип ввода вращения целесообразно применять для передачи в прогреваемую вакуумную систему малых крутящих моментов при большой частоте вращения?

8.15. Предложите тип ввода вращения, обеспечивающего высокую кинематическую жесткость?

8.16. Какой вид нагрузки особенно опасен для сильфонных соединений?

8.17. Почему в вводах термопар следует уменьшать количество переходных контактов?

8.18. В чем состоит преимущество прогреваемых вводов вращения, используемых в сверхвысоковакуумных системах ?

8.19. Какой тип запирающего элемента чаще всего используется в натекателях?

8.20. В чем состоит преимущество вакуумных затворов с пневмоприводом по сравнению с затворами, имеющими электромеханический привод?

345

## Приложения

## П.1.Справочные данные

#### Таблица С.1

#### Соотношение между единицами давления.

Единицы	1 Па	1 мм рт. ст.	1 дин/см <sup>2</sup>	1 физ. ат.	1 кгс/см <sup>2</sup>	1 кал/м <sup>3</sup>
давления						
1 Па	1	$7,50 \cdot 10^{-3}$	10	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-1}$
1 мм рт.ст	$1,33 \cdot 10^2$	1	$1,33 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	1,36·10 <sup>-3</sup>	$3,18 \cdot 10^2$
1 дин/см <sup>2</sup>	$1,00.10^{-1}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	1	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$
1 физ/ат.	$1,01 \cdot 10^5$	$7,60 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{6}$	1	$1,03 \cdot 10^{0}$	$2,39 \cdot 10^4$
1 кгс/см <sup>2</sup>	$9,81 \cdot 10^4$	$7,36 \cdot 10^2$	$9,81 \cdot 10^5$	9,68·10 <sup>-1</sup>	1	$2,34 \cdot 10^4$
1 кал/м <sup>3</sup>	$4,19 \cdot 10^{0}$	$3,14.10^{-2}$	$4,19.10^{1}$	$4,13.10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^5$	1

### Таблица С.2

#### Состав сухого атмосферного воздуха.

Газы	Состав, %	Парциальное давление, Па (общее давле- ние 10 <sup>5</sup> Па)	Газы	Состав, %	Парциальное давление, Па (общее давле- ние 10 <sup>5</sup> Па)
$N_2$	78,1	$7,8\cdot 10^4$	$CH_4$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$
$O_2$	21	$2,1\cdot 10^4$	Kr	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$
Ar	0,9	$9\cdot 10^2$	$N_2O$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
$CO_2$	0,03	$3 \cdot 10^1$	$H_2$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8\cdot 10^0$	Xe	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$
Не	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$			

Таблица С.3

## Среднеарифметические скорости молекул некоторых газов при различных температурах.

Газы		υ <sub>ap</sub> ,	м/с		Газы	υ <sub>ар</sub> , м/с			
	4,2 К	77 K	293 К	600 K		4,2 К	77 K	293 К	600 К
$N_2$	56	245	470	672	Xe	26	110	220	311
Ar	47	200	395	563	H <sub>2</sub> O	70	300	590	839
$O_2$	53	225	440	629	Воздух	54	235	460	661
$CO_2$	45	195	375	536	СО	56	245	470	672
Ne	67	285	555	792	He	150	640	1250	1785
Kr	33	140	270	325	$CH_4$	75	320	625	889
$H_2$	210	906	1770	2524					

Газы	$m\cdot 10^{26},$	$\mathbf{d}_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}\cdot10^{10},$	С,	d <sub>т</sub> *· 10 <sup>10</sup> , м при Т, К			
	КГ	М	К	600	293	77	4,2
$N_2$	4,65	2,74	116	2,99	3,24	4,34	14,7
$O_2$	5,31	3,01	125	3,31	3,60	4,88	16,7
Ar	6,63	3,00	142	3,34	3.66	5,06	17,7
$CO_2$	7,31	3,36	254	4,01	4,59	6,97	26,3
Ne	3,35	2,35	56	2,46	2,56	3,09	8,90
Kr	19,9	3,17	188	3,63	4,06	5,88	21,4
$H_2$	0,33	2,41	84	2,57	2,73	3,48	11,0
Xe	21,8	3,53	252	4,21	4,81	7,30	27,6
$H_2O$	2,99	2,53	659	3,66	4,56	7,82	31,8
Воздух	4,81	3,13	112	3,41	3,68	4,90	16,5
He	0,66	1,94	80	2,07	2,19	2,77	8,69

## Характеристики молекул некоторых газов.

\* Диаметры молекул  $d_{\scriptscriptstyle M}\,$  определены из вязкости газов.

Таблица С.5

<b>n</b> 1 1	U				
AMMOUTLI	DIDIDUMANA	TOVY	οπμυθικοριιν	ΜΟΠΟΥΥ	
JUWULIDI	<b>БЗАНМОДСИСІ БИЛ</b>	ΔΟΥΛ	Ulfinaruddia	NUJICKV	11.

Газы	Индукционный· ×10 <sup>19</sup>		Ориентационный∙ ×10 <sup>19</sup>		Дисперсионный ×10 <sup>19</sup>		Суммар- ный∙ ×10 <sup>19</sup>
	Дж $\cdot$ м <sup>6</sup>	%	Дж $\cdot$ м <sup>6</sup>	%	Дж $\cdot$ м <sup>6</sup>	%	$Дж \cdot M^6$
H <sub>2</sub> O	10	4	190	77	47,0	19,0	247
СО	0,06	0,1	0,003	0,005	65,7	99,9	67,6
NH <sub>3</sub>	10	5,35	84	45	93,0	49,6	187
HJ	1,68	0,44	0,4	0,1	382	99,5	384
$N_2$	-	-	-	-	57,2	100	57,2
O <sub>2</sub>	-	-	-	-	39,8	100	39,8
$H_2$	-	-	-	-	11,4	100	11,4
He	-	-	-	-	1,49	100	1,49
Ne	-	-	-	-	7,97	100	7,97
Ar	-	_	-	-	69,5	100	69,5

Газы	$Q_a,$	Е,
~	Мідж/кмоль	Мідж/кмоль
Пары вакуумных масел	90100	96
$H_2O$	92	45,3
$CO_2$	2833	25,3
Воздух	1220	5,7
$N_2$	1119	5,6
$O_2$	1320	6,8
$CH_4$	18	9,2
Ar	14,7	6,5
СО	12,6	6,3
$H_2$	9	0,8
Ne	4,2	1,8
Не	2	0,008

#### Теплоты физической адсорбции Q<sub>a</sub> и теплоты конденсации Е некоторых газов на углероде.

## Таблица С.7

## Теплоты хемосорбции Q<sub>x</sub> некоторых веществ на углероде.

Вещество	С	Н	Ν	0	S	F	Cl	Br	J
$Q_x$ ,	344	415	292	350	259	441	238	276	240
МДж/кмоль									

#### Таблица С.8

#### Критические параметры некоторых газов.

Газ	H <sub>2</sub> O	Kr	CO <sub>2</sub>	$N_2$	$O_2$	Ar	$H_2$	Ne
Τ <sub>кр</sub> , К	647	209	304	126	155	151	33,2	44,4
T <sub>b</sub> ,K	273	116	217	63,2	54,4	83,8	13,9	24,5
Р <sub>b</sub> , Па	560	$7,7.10^{4}$	$4,5 \cdot 10^5$	$1,2.10^4$	146	$1,5.10^4$	$7,2.10^3$	$4,3.10^4$

### Давление насыщенных паров вакуумных материалов при различных температурах,Па.

Материалы	Темпера	тура
	20 °C	500 °C
Трансформаторное масло	10-1	-
Ртуть	10 <sup>-1</sup>	$10^{6}$
Вакуумное масло ВМ-4	$5 \cdot 10^{-3}$	-
Замазка Рамзая	10-3	-
Вакуумное масло ВМ-1	$5 \cdot 10^{-6}$	-
Пицеин	10 <sup>-6</sup>	-
Цинк	10 <sup>-12</sup>	$10^{2}$
Индий	10 <sup>-18</sup>	10-6
Серебро	-	10-7
Олово	-	10 <sup>-8</sup>
Алюминий	-	10 <sup>-8</sup>
Медь	-	10-9
Золото	-	10-9

#### Таблица С.10

#### Скорости испарения некоторых веществ при давлении 1,33 Па.

Вещество	Cu	Au	Zn	Ni	Fe	Cr
Т, К	1545	1480	615	1670	1740	1665
Скорости испарения, $\kappa\Gamma/(M^2 \cdot c)$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	7,9 · 10 <sup>-4</sup>	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	10-3

			So	Qs,	S,* (м <sup>3</sup> Па	а) / м <sup>3</sup>
Газ	Абсорбент	n			$(p = 10^{\circ})$	'lla)
			(ì <sup>3</sup> .Ï à)	МДж/кмоль	293 К	673 К
			Ϊà <sup>1/</sup> n·ì <sup>3</sup>			
$\mathbf{H}_2$	Fe	2	$1 \cdot 10^3$	56	$3 \cdot 10^{0}$	$2 \cdot 10^3$
	Ni	2	$8 \cdot 10^2$	25	$1 \cdot 10^{3}$	$3 \cdot 10^4$
	Нержавеющая		$5 \cdot 10^2$	20	$3 \cdot 10^{3}$	$3 \cdot 10^4$
	сталь 1Х18Н9Т	2				
	Cu	2	$2 \cdot 10^{3}$	77	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^2$
	Мо	2	$3 \cdot 10^2$	59	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^2$
	Al	2		Практически не	растворяется	
	Pd	2	$2 \cdot 10^{3}$	10	$8 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
	Pt	2	$1 \cdot 10^{4}$	145	$4 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{0}$
	Ag	2	$2 \cdot 10^2$	50	$2 \cdot 10^0$	$4 \cdot 10^2$
	Каучук	1	_	-	$4 \cdot 10^3$	—
	Фторопласт	1	_		$3 \cdot 10^{3}$	—
$N_2$	Cu	2		Практически не	растворяется	
	Ag	2		Практически не	растворяется	
	Мо	2	$2 \cdot 10^4$	160	$3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{0}$
	W	2	$2 \cdot 10^4$	310	$1 \cdot 10^{-21}$	$6 \cdot 10^{-6}$
	Каучук	1	_	_	$5 \cdot 10^3$	_
	Фторопласт	1	_	_	$3 \cdot 10^{3}$	_
<b>O</b> <sub>2</sub>	Fe	2	$2 \cdot 10^3$	18	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{5}$
	Cu	2	$1 \cdot 10^3$	34	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^4$
	Каучук	1	_	_	$1 \cdot 10^4$	_
	Фторопласт	1	_	_	$3 \cdot 10^3$	—

## Растворимость газов в твердых телах.

\* Значения S рассчитаны по (1.64).

Газ	Абсорбент	n	<b>D</b> <sub>0</sub> ,	Q <sub>D</sub> ,	D, *	m <sup>2</sup> /c
			м <sup>2</sup> /с	МДж/кмоль	293 К	673 К
$H_2$	Fe	2	$1 \cdot 10^{-6}$	8	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
	Нержавеющая	2	$1 \cdot 10^{-7}$	49	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-9}$
	сталь Х18Н9Т					
	Ni	2	$2 \cdot 10^{-7}$	73	$6 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-10}$
	Cu	2	$1,1 \cdot 10^{-6}$	153	$2 \cdot 10^{-20}$	$1 \cdot 10^{-12}$
	Мо	2	$1 \cdot 10^{-7}$	174	$3 \cdot 10^{-21}$	$2 \cdot 10^{-14}$
	Pd	2	6,6 · 10 <sup>-5</sup>	65	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-7}$
	SiO <sub>2</sub>	1	$6 \cdot 10^{-10}$	36	$2 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-11}$
$N_2$	Fe	2	$1,1 \cdot 10^{-5}$	285	$4 \cdot 10^{-31}$	$1 \cdot 10^{-16}$
	Нержавеющая	2	$1,0 \cdot 10^{-5}$	566	$3 \cdot 10^{-56}$	$1 \cdot 10^{-27}$
	сталь Х18Н9Т					
$O_2$	Fe	2	$4 \cdot 10^{-12}$	84	$1 \cdot 10^{-19}$	$2 \cdot 10^{-15}$
	Ni	2	$2 \cdot 10^{-9}$	679	$6 \cdot 10^{-70}$	$8 \cdot 10^{-36}$
	Cu	2	$7,8 \cdot 10^{-6}$	238	$4 \cdot 10^{-27}$	$4 \cdot 10^{-15}$
	Ti	2	$5 \cdot 10^{-8}$	218	$2 \cdot 10^{-27}$	$2 \cdot 10^{-16}$
CO	Fe	2	$1,3 \cdot 10^{-5}$	163	$4 \cdot 10^{-20}$	$6 \cdot 10^{-12}$
	Нержавеющая	2	$1 \cdot 10^{-5}$	566	$3 \cdot 10^{-56}$	$1 \cdot 10^{-27}$
	сталь Х18Н9Т					
	Ni	2	$5,4 \cdot 10^{-7}$	197	$1 \cdot 10^{-24}$	$1 \cdot 10^{-14}$
He	SiO <sub>2</sub>	1	$3 \cdot 10^{-8}$	23	$2 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-10}$

Коэффициенты диффузии газов в твердых телах.

\* Значения D рассчитаны по (1.67).

#### Таблица С.13

#### Энергия ионизации.

Газ	$N_2$	He	Ne	Ar	СО	O <sub>2</sub>	$H_2$
Энергия ионизации, эВ	14,5	24,6	21,6	15,8	14,1	12,6	13,6

### Таблица С.14

#### Коэффициенты динамической вязкости.

Газы	H <sub>2</sub>	Не	CH <sub>4</sub>	Ar	Ne	N <sub>2</sub>	CO	<b>O</b> <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Воздух
$\eta \cdot 10^5$ , $H \cdot c/m^2$	0,88	1,90	1,10	2,10	3,00	1,75	1,70	2,02	1,40	1,70

#### Удельные теплоемкости и коэффициенты теплопроводности газов при низком вакууме

Газы	с <sub>р</sub> , кДж/(кг · К)	с <sub>v</sub> , кДж/(кг · К)	$\lambda_{\rm H} \cdot 10^2, \ {\rm Bt/(m \cdot K)}$	$q_r = K_{TB}/K_{TT}$
Воздух	1,01	0,72	2,4	1,00
$N_2$	1,03	0,73	2,4	1,06
$O_2$	0,92	0,66	2,4	1,06
$CO_2$	0,85	0,66	1,45	0,98
Ar	0,52	0,31	1,6	1,8
H <sub>2</sub> O	1,95	1,47	1,6	0,63
He	5,36	3,13	14,2	0,57
Ne	1,05	0,68	4,65	1,27
H <sub>2</sub>	13,8	10,2	16,8	0,27

#### Таблица С.16

Газы	W	Pt	Ni	SiO <sub>2</sub>	Газы	W	Pt	Ni	SiO <sub>2</sub>
Воздух	0,87	0,9	0,8	0,8	$CO_2$	0,85	0,8	0,8	0,8
$N_2$	0,87	0,8	0,8	0,8	Ne	0,78	0,7	0,8	0,7
$O_2$	0,85	0,83	0,85	0,8	He	0,40	0,5	0,40	0,38
Ar	0,85	0,89	0,95	0,9	$H_2$	0,35	0,25	0,3	0,37

## Коэффициенты аккомодации при 300 К.

#### Таблица С.17

## Коэффициенты взаимодиффузии воздуха с различными газами при 273 К, 10<sup>5</sup> Па.

Газы	O <sub>2</sub>	$CO_2$	$CH_4$	H <sub>2</sub> O	$H_2$	$C_2H_2$
$D_0 \cdot 10^4$ , $m^2/c$	0,178	0,138	0,196	0,220	0,661	0,194

Формулы для расчета	проводимости	отверстий и тј	рубопроводов
Į	цля воздуха при	и 293 К.	

Виды элементов	Режимы			
	вязкостный	молекулярный		
Круглое отверстие диаметром d, м	$U = 160d^2 \ \ddot{v}\partial \dot{e} \ p_2 / p_1 \le 0,1$	$U = 91d^2$		
Отверстие произвольной формы площадью А, м <sup>2</sup>	$U = 200A \ \ddot{v}\partial\dot{e} \ \frac{p_2}{p_1} \le 0.1$	U = 116A		
Трубопровод диаметром d и длиной <i>l</i> , м	$U = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} p_{c\delta}$	$U = 121 \frac{d^3}{l}$		
Трубопровод прямоугольного сечения а ≥ b, м	$U = 865 f \frac{ab^3}{l} p_{\bar{n}\bar{o}}$	$U = 308\varphi \frac{a^2 b^2}{l(a+b)}$		
Трубопровод с равносторон- ним треугольным сечением; а - сторона треугольника, м	$U = 299 \frac{a^4}{l} p_{n\delta}$	$U = 48,1\frac{d^3}{l}$		
Трубопровод эллиптического сечения; а - большая, b - малая оси эллипса, м	$U = 2,72 \cdot 10^{3} \times \frac{a^{3}b^{3}}{(a^{2} + b^{2})l} p_{\bar{n}\bar{o}}$	$U = 171 \frac{a^2 b^2}{l\sqrt{a^2 + b^2}}$		
Трубопровод диаметром d <sub>1</sub> с коаксиально расположенным стержнем диаметром d <sub>2</sub> , м	$U = 1,36 \cdot 10^{3} \frac{p_{\bar{n}\bar{o}}}{l} \times \left[ d_{1}^{4} - d_{2}^{4} - \frac{(d_{1}^{2} - d_{2}^{2})^{2}}{\ln(d_{1} / d_{2})} \right]$	$U = 121 \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{l}$		

U выражено в м<sup>3</sup>/с; р - в Па.
 \_\_\_\_\_

a/b	1	2	5	10	100	8
f	2,3	3,7	4,7	5,0	5,3	5,3
φ	1,1	1,2	1,3	1,4		

# Удельное газовыделение конструкционных материалов при комнатной температуре.

Материалы	Обработка	Удельное газовыделе- ние через час откач- ки, q, $m^3 \cdot \Pi a / (m^2 \cdot c)$	Коэффициенты:*	
			А	В
Сталь конст-	Без обработки	$4\cdot 10^{-4}$	-3,2	$4,2 \cdot 10^{-5}$
рукционная	Хромирование	$1,3 \cdot 10^{-7}$	—	—
	Вакуум, 450°С, 15 ч	$10^{-8}10^{-10}$	_	-
Сталь	Без обработки	$4\cdot 10^{-5}$	-4,1	$8,3 \cdot 10^{-5}$
нержавеющая	Вакуум, 450°С, 15 ч	$10^{-8}10^{-10}$	—	—
Медь	Без обработки	$2\cdot 10^{-4}$	-3,5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
	Вакуум, 450°С, 15 ч	$10^{-8}10^{-10}$	—	—
Латунь	Без обработки	$3 \cdot 10^{-4}$	-3,4	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	То же	$6\cdot 10^{-6}$	—	—
Никель	То же	$7\cdot 10^{-6}$	—	—
Резина ваку-	То же	10 <sup>-2</sup>	—	-
умная				
Полиэтилен	То же	10 <sup>-4</sup>	_	—
Фторопласт	То же	$3 \cdot 10^{-4}$	_	-

\*  $\lg q = A - Bt$ , где t – время, c.

## Таблица С.20

#### Влияние обработки на газовыделение нержавеющей стали.

	Ско	рость газовыделения,м	$r^3 \cdot \Pi a / (c \cdot m^3)$				
Способы обработки	Время с начала откачки, ч						
	1	5	10	20			
Без обработки	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$			
Механическая полировка	$4 \cdot 10^{-6}$	—	$2 \cdot 10^{-7}$	_			
Ультразвуковая очистка	$4\cdot 10^{-6}$	$2\cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$			
Хонингование стеклянными	_	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$			
шариками							
Химическая очистка	$1\cdot 10^{-5}$	$4.10^{-6}$	$3.10^{-6}$	$2.10^{-6}$			
Химическое полирование	$2\cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$			
Электролитическое полирова-	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$			
ние							
Вакуумное обезгаживание при	$1 \cdot 10^{-6}$	-	$4 \cdot 10^{-7}$	$2\cdot 10^{-7}$			
300°С в течение 2 ч.							
Высокотемпературное ваку-	10 <sup>-9</sup>	_	—	—			
умное обезгаживание							
Окисление на воздухе при	$7\cdot10^{-10}$	-	—	—			
T=450°C							
Покрытие алюминием	$5 \cdot 10^{-10}$	_	_	_			
--------------------	--------------------	---	---	---			
--------------------	--------------------	---	---	---			

#### Таблица С.21

Гар	Материали	n	Ka	0	$q^*, \frac{(i^3 \cdot i)}{\tilde{z}}$	$\ddot{a}$ ) · ì
1 as	материалы	11		Qp Ì Äm		(72.10
			$(i \circ I \dot{a}) \cdot i$	$\frac{1}{\hat{A}\hat{a}}$	293 K	6/3 K
			Ià <sup>17 n</sup> ·ì² · ñ	0770	Δp=10°11a	∆p=10°11a
$H_2$	Fe	2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	64	9,3.10 <sup>-8</sup>	1,5.10-4
	Ni	2	$1,4 \cdot 10^{-3}$	111	5,6.10 <sup>-11</sup>	$2,2.10^{-5}$
	1X18H9T	2	5.10 <sup>-5</sup>	69	$2.10^{-8}$	3.10 <sup>-5</sup>
	Cu	2	$2 \cdot 10^{-3}$	230	$2.10^{-21}$	$6.10^{-10}$
	Al	2	Прак	тически не п	роникает	
	Мо	2	8,9.10 <sup>-4</sup>	169	$2,4.10^{-16}$	$7,7.10^{-8}$
	Pd	2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	88,8	4,6.10 <sup>-9</sup>	1,4.10 <sup>-5</sup>
	Pt	2	7,7.10-2	162	8,7.10 <sup>-14</sup>	$1,2.10^{-5}$
	Кварц	1	$2,2.10^{-10}$	36	8,3.10 <sup>-12</sup>	3,5.10 <sup>-8</sup>
	Полиэтилен	1	-	_	$2.10^{-7}$	_
	Фторопласт	1	-	_	$1.10^{-9}$	_
$N_2$	Fe	2	3,8.10 <sup>-4</sup>	199	$2.10^{-19}$	2,3.10 <sup>-9</sup>
	Cu,Ag	2	Прак	тически не п	роникает	
	Резина 7889	1	3.10 <sup>-7</sup>	26	6,9.10 <sup>-7</sup>	-
	Резина 9024	1	9.10 <sup>-4</sup>	51,5	5,9.10 <sup>-8</sup>	-
	Резина 2043	1	1,5.10 <sup>-5</sup>	42,3	$4,3.10^{-8}$	
	Фторопласт	1	-	-	$1.10^{-10}$	-
$O_2$	Ag	2	3,4.10-3	189	$1,5.10^{-17}$	4,9.10 <sup>-8</sup>
	Cu	2	8.10 <sup>-3</sup>	272	$1,4.10^{-24}$	6,9.10 <sup>-11</sup>
	Фторопласт	1	-	-	$3.10^{-10}$	-
CO	Fe	2	$1 \cdot 10^{-4}$	156	$3,9.10^{-16}$	$2,8.10^{-8}$
He	Кварц	1	3,2.10 <sup>-10</sup>	22,8	2,7.10-9	5,4.10-7
	C-38-1	1	$2.10^{-10}$	22	$2,4.10^{-9}$	3,9.10 <sup>-7</sup>
	C-47-1	1	$1,4.10^{-10}$	31	$4,1.10^{-11}$	$5,4.10^{-8}$
	Фторопласт	1	_	-	3.10-9	-
$H_2O$	Полиэтилен	1	-	_	1.10 <sup>-7</sup>	-
	Каучук	1	-	-	$1.10^{-6}$	-

## Газопроницаемость вакуумных материалов

\* Значения q рассчитаны по формуле (1.68)

Таблица С. 22

#### Нержавеющие стали, применяемые в вакуумной технике.

Марки	$\sigma_{\mathrm{BP}},$	σ <sub>T</sub> ,				Состав,	%			
сталей	МПа	МΠа	С	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe	$N_2$
12X18H10T	540	200	0,12	0,8	1,5	18	10	0,7	Основа	_
1X21H5T	600	350	0,14	0,8	0,8	21	5,5	0,8	>>	_
Х17Г9АН4	700	350	0,12	0,8	9	17	4	_	>>	0,2

H39XTH	0	750	_	0,05	0,6	0,8	15	35	0,9	>>	_

## Таблица С.23

#### Физические свойства стекол.

Марки стекол	α · 10 <sup>7</sup> (при20 200°С)	σ <sub>вр</sub> , МПа		Коэффициент теплопровод- ности λ,	Температура размягчения Т <sub>р</sub> ,	Термо- стойкость Dt,
		Сжа- Рас-		Вт/(м · К)	°C	°C
		тие	тяже-			
			ние			
Кварцевое	5,56,1	1800	95	0,096	1500	_
С-37 (вольфра- мовое)	3639	1100	84	0,072	796816	185
С-47 (мо- либде- новое)	4648	1090	90,5	0,050	580600	200
C-87	8690	850	50	0,038	480500	100
(свинцо-						
вое)						

## Таблица С.24

## Свойства вакуумных резин.

Характеристики	Марки резины					
	7889	9024	ИРП-1015	ИРП-1368	ИРП-2043	
Предел прочности при рас- тяжении, МПа	17	10	9	3	10	
Относительное растяжение, %	550	350	400	150	-	
Максимальная рабочая температура, °С	70	70	70	250	250	
Остаточная деформация после 45% сжатия по высо- те при 70° С в течение 100 ч, %	10	15	15	_	_	
Набухание в вазелиновом масле при 70° С, %	90	6	4,5	18	5	
Морозостойкость (хруп- кость при ударе), °С	-50	-40	-30	-57	-30	
Уплотняющее давление, МПа	1,61,8	2,02,2	2,02,2	0,40,7	—	

### Таблица С.25

#### Химический состав и температура плавления мягких припоев

Марки			Химический				Температура	
припоя			состав, %				плавления,	°C
	Sn	Pb	Cu	Ag	Sb	Zn	начало	конец
ПОС - 30	30	Осталь	0,15	_	2	_	183	256
		ное						
ПОС - 40	40	»	0,10	_	2	_	183	235
ПОС - 61	61	»	0,10	_	0,9	_	183	183

#### Таблица С.26

#### Химический состав и температура плавления твердых припоев

Марки припоя		Хими	ический%соста		Температура плавления, °С		
	Cu	Ag	Zn	Au	Si	начало	конец
ПСр-45	30	45	остальное	_	_	660	725
ПСр-72	28	72	—	_	_	779	779
ПЗлМ80	20	_	—	80	_	889	889
ПМК 4	96	_	_	_	4	910	1000
Медь МБ	100	_	_	_	_	1083	1083

Таблица С.27

Газосодержание вакуумных материалов.

Материал	Газ	$(M^3 \cdot \Pi a) / M^3$
Нержавеющая сталь	H <sub>2</sub>	$7 \cdot 10^4$
12X18H10T	$N_2$	$4 \cdot 10^4$
	O <sub>2</sub>	$2 \cdot 10^4$
Сталь 20	$H_2$	$2 \cdot 10^4$
	$N_2$	$3 \cdot 10^4$
	$O_2$	$2 \cdot 10^4$
Железо	$H_2$	$9 \cdot 10^4$
	$N_2$	$3 \cdot 10^4$
	O <sub>2</sub>	$6 \cdot 10^4$
Сталь листовая вакуумной	$H_2$	0,4
плавки	$N_2$	_
	O <sub>2</sub>	$1 \cdot 10^4$

#### П.2.Выводы формул

П.2.1. Функция Максвела-Больцмана (распределение молекул газа по скоростям)

Рассмотрим вывод функции распределения (1.16), существование которой постулируется в физике вакуума. Число молекул  $dn_{vx}$ , скорости которых заключены в промежутке от  $v_x \quad \ddot{a}\hat{i} \quad v_x + dv_x$ , пропорционально общему числу молекул n, приращению скорости  $dv_x$  и определяется функцией распределения  $f(v_x)$ . Аналогичные соотношения можно записать для осей координат y и z. Таким образом,

$$dn_{v_x} = n \cdot f(v_x) dv_x,$$
  

$$dn_{v_y} = n \cdot f(v_y) dv_y,$$
  

$$dn_{v_z} = n \cdot f(v_z) dv_z.$$
  
(II1.1)

Вероятность того, что векторы скоростей, концы которых находятся внутри параллелепипеда со сторонами  $v_x, v_y, v_z$  с учетом независимости координат определяется на основании теории вероятности как произведение частных вероятностей по формуле

$$dn_{v} = n \cdot f(v_{x}) f(v_{y}) f(v_{z}) dv_{x} dv_{y} dv_{z}. \qquad (\Pi 1.2)$$

Функция распределения не зависит от направления и определяется только модулем скорости *v*, т.е.

$$f(v) = f(v_x) f(v_y) f(v_z).$$
(II1.3)

Этому уравнению удовлетворяют функции

$$f(v_x) = A \exp(-B v_x^2),$$
  

$$f(v_y) = A \exp(-B v_y^2),$$
  

$$f(v_z) = A \exp(-B v_z^2);$$
  
(II1.4)

что можно проверить подстановкой (П1.4) в (П1.3):

$$f(v) = A^{3} \exp(-B(v_{x}^{2} + v_{y}^{2} + v_{z}^{2})) = A^{3} \exp(-Bv^{2}).$$
(II1.5)

Таким образом, (П1.1) с учетом (П1.4) можно представить в виде

$$dn_{v_x} = A \cdot n \cdot \exp(-Bv_x^2) dv_x,$$
  

$$dn_{v_y} = A \cdot n \cdot \exp(-Bv_y^2) dv_y,$$
  

$$dn_{v_z} = A \cdot n \cdot \exp(-Bv_z^2) dv_z.$$
  
(II1.6)

Перепишем выражение (П1.2), используя (П1.3) и (П1.4):

$$dn_{v} = A^{3} \cdot n \cdot \exp(-Bv^{2}) dv_{x} dv_{y} dv_{z}, \qquad (\Pi 1.7)$$

так как пространство газовых молекул изотропно, а концентрация частиц, имеющих скорость *v*, одинакова во всем пространстве скоростей, то можем перейти от декартовых координат к сферическим, т.е.

$$dv_x dv_y dv_z = 4\pi v^2 dv.$$

Тогда имеем

$$dn_{v} = A^{3} 4\pi \cdot n \exp(-Bv^{2})v^{2} dv. \qquad (\Pi 1.8)$$

Для нахождения постоянных *А* и *В* проинтегрируем (П1.8) во всем возможном диапазоне скоростей.

$$n = \int_{v=0}^{v=\infty} dn_v = 4\pi \cdot nA^3 \int_{0}^{\infty} \exp(-Bv^2) v^2 dv.$$
(II1.9)

Известно, что

$$\int_{0}^{\infty} \exp(-ax^{2}) x^{2k} dx = \frac{\sqrt{\pi} \cdot 1 \cdot 3 \dots (2k-1)}{2^{(k+1)} a^{(k+1/2)}}.$$
 (II1.10)

Вычислив интеграл в (П1.9) согласно (П1.10), имеем

$$\dot{A} = \sqrt{B/\pi} \tag{\Pi1.11}$$

Уравнение(П1.11) устанавливает связь между искомыми постоянными. Для определения их значений воспользуемся выражением для среднеквадратичной скорости из (1.11).

$$v_{\hat{e}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{1}{n} \int_{0}^{\infty} v^{2} dn_{v}}.$$
 (II1.12)

Подставляя (П1.8) в (П1.12), будем иметь

$$v_{\hat{e}} = \sqrt{4\pi A^3 \int_0^\infty \exp(-Bv^2) v^4 dv}.$$
 (II1.13)

Значение интеграла в (П1.13) найдем согласно (П1.10):

$$\int_{0}^{\infty} \exp(-Bv^{2})v^{4}dv = 3\sqrt{\pi}/(8B^{5/2}), \qquad (\Pi 1.14)$$

тогда, учитывая (П1.11) и (П1.13), получим

$$v_{\hat{e}} = \sqrt{3/2B} = \sqrt{3kT/m}.$$

Откуда

$$B = \frac{m}{2kT} \quad \text{if } A = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}.$$

Воспользуемся значениями коэффициентов А и В и перепишем функцию распределения (П1.5) в виде

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right).$$

Тогда число молекул, имеющих скорости в интервале от v до v+dv, согласно (П1.8), будет

$$dn_{v} = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} 4\pi \cdot n \exp\left(-\frac{mv^{2}}{2kT}\right) v^{2} dv,$$

что совпадает с (1.16).

#### П2.2 Среднеарифметическая скорость.

По определению с учетом (1.16) среднеарифметическая скорость

$$v_{a} = \frac{1}{n} \int_{0}^{\infty} v dn_{v} = \int_{0}^{\infty} 4\pi v^{3} \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left(-\frac{mv^{2}}{2kT}\right) dv =$$
$$= 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \int_{0}^{\infty} v^{3} exp\left(-\frac{mv^{2}}{2kT}\right) dv$$

Обозначим m/(2kT) = a, тогда

$$v_{a} = 4\pi \left(\frac{a}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \int_{0}^{\infty} v^{3} \exp\left(-av^{2}\right) dv.$$

Интеграл  $\int_{0}^{\infty} v^{3} \exp(-av^{2}) dv$  можно вычислить, проинтегрировав по частям:  $\int_{0}^{\infty} v^{3} e^{-av^{2}} dv = -\frac{1}{2a} \int_{0}^{\infty} v^{2} d(\exp(-av^{2})) = -\frac{1}{2a} \left[ v^{2} e^{-av^{2}} \int_{0}^{\infty} -\int_{0}^{\infty} \exp(-av^{2}) d(v^{2}) \right] =$   $= -\frac{1}{2a} \left[ 0 + \frac{1}{a} \exp(-av^{2}) \int_{0}^{\infty} \right] = \frac{1}{2a^{2}}.$ 

Тогда получим аналогично (1.18)

$$v_{a} = 4\pi \left(\frac{a}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{2a^{2}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

#### П.2.3 Уравнение полимолекулярной адсорбции

Рассмотрим вывод уравнения (1.56.) Условие равновесия для многослойной адсорбции запишем в виде равенства скоростей конденсации в предыдущем адсорбционном слое и испарения в последующем слое:

$$\mu_i S_i = v_{i+1} S_{i+1}. \tag{II3.1}$$

Удельная скорость конденсации молекул в і-слое:

$$\boldsymbol{\mu}_i = f_i N_q, \tag{II3.2}.$$

где  $f_i$  - вероятность конденсации молекул в *i*-слое,  $N_q$  - число молекул, ударяющихся в единицу времени о единицу поверхности. Воспользовавшись выражениями (1.10),(1.18) и (1.34), перепишем (ПЗ.2) в виде

$$\mu_i = \frac{f_i p}{\sqrt{2\pi m k \dot{O}}}.$$
(II3.3).

Удельная скорость испарения молекул:

$$v_i = a_i / \tau_{ai}, \tag{II3.4}$$

где  $a_i$  - количество молекул, адсорбированных на единице поверхности;

τ<sub>*ai*</sub> - время адсорбции молекул в *i*-слое.

С учетом выражения для времени адсорбции (1.42) уравнение (ПЗ.4) перепишем в виде:

$$v_i = \frac{a_i}{\tau_{0i}} \exp(-\frac{Q_{ai}}{R\dot{O}}) \tag{II3.5}$$

Согласно допущениям полимолекулярной теории адсорбции:

$$\tau_0 = \tau_{01} = \tau_{02} = \ldots = \tau_{0i} = \ldots = \tau_N, \qquad \qquad f = f_1 = f_2 = \ldots f_i \ldots = f_N,$$

тогда условие (П3.1) с учетом уравнений (П3.3) и (П3.5) можно представить в виде системы уравнений:

$$gpS_{0} = \exp[-Q_{1} / (R\dot{O})]S_{1},$$
  

$$gpS_{1} = \exp[-Q_{2} / (R\dot{O})]S_{2},$$
 (II3.6)  

$$gpS_{i-1} = \exp[-Q_{i} / (R\dot{O})]S_{i},$$

Здесь *p* - давление газа;  $Q_i$  - теплота адсорбции в *i*-слое;  $S_0$ ,  $S_1$ , ...,  $S_i$  - свободные поверхности адсорбента в соответствующем индексу слое; *g* - постоянный коэффициент. В соответствии со сделанными допущениями  $Q_1 = Q_a$ ;  $Q_2 = Q_3 = ... = Q_1 = ... = E$ , где *E* - теплота конденсации. Вводя эти упрощения, перепишем систему (ПЗ.6) в виде:

количество адсорбированного вещества (см. рис1.14)  $G = a_m \sum_{i=0}^{i=\infty} iS_i$ . Удельное

количество поглощенного газа определяется как

$$a = \frac{G}{A} = a_m \sum_{i=0}^{i=\infty} iS_i / \sum_{i=0}^{i=\infty} S_i.$$
 (II3.8)

Если учесть, что

$$\sum_{i=0}^{i=\infty} S_i = S_0 \left( 1 + C \sum_{i=1}^{i=\infty} x^i \right) = S_0 \left( 1 + \frac{Cx}{1-x} \right); \quad \sum_{i=0}^{i=\infty} iS_i = C S_0 \sum_{i=1}^{i=\infty} ix^i = C S_0 x \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{i=\infty} x^i = \frac{x C S_0}{(1-x)^2},$$

то после преобразований выражение (ПЗ.8) можно привести к виду

$$\frac{a}{a_m} = \frac{Cx}{(1-x)(1-x+Cx)}.$$
(II3.9)

При давлении *p* = *p*<sub>т</sub> на свободной поверхности может образоваться бесконечно большое число слоев. При этом

$$\operatorname{pgexp}\left(\frac{E}{R\dot{O}}\right) = 1,$$

тогда  $x = p / p_T$ . Подставляя полученное для x выражение в ПЗ.9 получим уравнение полимолекулярной адсорбции (1.56).

# П.2.4 Уравнение газового потока через отверстие при вязкостном режиме течения

При низком вакууме и вязкостном режиме течения газа закон сохранения энергии для адиабатического истечения газа можно записать в виде равенства приращения кинетической энергии газа и изменения его энтальпии:

$$Gw_{\tilde{a}}^2/2 = G(I_1 - I_2),$$
 (II4.1)

где *G* - поток газа;  $w_{r2}$  - скорость газа на выходе из отверстия;  $I_1$  и  $I_2$  - энтальпии газа до и после прохождения отверстия. Воспользовавшись тем, что  $I = c_p T$ , перепишем уравнение (П 4.1) в следующем виде:

$$w_{\tilde{a}2}^2 / 2 = c_p \dot{O}_1 (1 - T_2 / T_1).$$
 (II4.2)

Вводя удельный объем газа v, выражаемый в м<sup>3</sup>/кг, запишем уравнение газового состояния (1.12) в виде  $pv = R\dot{O}/\dot{I}$ . Из технической термодинамики известно, что для адиабатического процесса

$$v_1 / v_2 = (p_2 / p_1)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad \gamma = c_p / c_v, \quad c_p - c_v = R / \check{I}$$

Преобразуем уравнение сохранения энергии (П4.2) к виду:

$$w_{a2} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \right].$$
(II4.3)

Поток газа (кг/с) через отверстие с учетом выражения (П4.3)

$$P = w_{\tilde{a}2} A / v_2 = \psi A \sqrt{p_1 / v_1}, \qquad (\Pi 4.4)$$

где А - площадь отверстия,

$$\Psi = r^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[ 1 - r^{(\gamma - 1)/\gamma} \right]}, \quad r = p_2 / p_1.$$
(II4.5)

Из уравнения газового состояния следует, что  $v_1 = R \dot{O}_1 / (Mp_1)$ . Тогда (П4.4) можно переписать в виде

$$P = \psi A p_1 \sqrt{\dot{I}} / (RT_1).$$

В условных единицах (м<sup>3</sup> Па)/с газовый поток

$$Q = \frac{PR\dot{O}_1}{\dot{I}} = \psi A p_1 \sqrt{\frac{R\dot{O}_1}{\dot{I}}},$$

что совпадает с (2.37).

П.2.5.Вывод уравнения (1.59).

Подставляя в уравнение изотермы адсорбции Генри (1.53) выражение для времени адсорбции (1.42) и линейную зависимость теплоты адсорбции от логарифма степени покрытия (1.58), получим

$$\Theta = C \exp(\frac{Q_1 - K_{\varrho} \, lg \, \Theta}{RT}) p,$$

где  $C = \frac{\gamma 10^{-13}}{a_M \sqrt{2\pi m kT}}.$ 

Логарифмирование данного выражения позволяет записать

$$\ln \Theta = \ln C + \frac{Q_1 - K_{\varrho} \, lg \, \Theta}{RT} + \ln p \, .$$

После преобразований получим

$$\ln \Theta = \frac{RT \ln C + Q_1}{RT + 0.43K_{\varrho}} + \frac{RT \ln p}{RT + 0.43K_{\varrho}}.$$
 (1)

Представим уравнение Френдлиха в следующем виде

$$lg \Theta = lg d + mlg p. \tag{2}$$

Сравнивая (1) и (2), получим выражения для коэффициентов *d* и *m*.

$$m = \frac{RT}{RT + 0.43K_{\varrho}} \qquad d = C^m \exp(\frac{Q_1 m}{RT})$$

Решая эту систему уравнений относительно  $Q_1$  и  $K_Q$ , получим выражения, совпадающие с (1.59).

$$Q_1 = RT \ln(d^{\frac{1}{m}} / C)$$
  $K_Q = \frac{RT(1-m)}{0.43m}$ 

## ПЗ.Таблицы

## Таблица П.1.

## Характеристики вакуумметров

	Ŧ	п		<b>F 6</b>			Ŧ
Наиме-	Типы	Диапазон	Погреш-	Габариты	Mac-	Потреб-	Тип
нование	вакуум-	рабочих	ность	(длина × ши	ca,	ляемая	преобразов-
вакуум-	метров	давлений	измере-	рина × высо	КГ	мощн-	ателей.
метра			ния, %	та)мм		ость, Вт	
Деформа-	ВДГ-1	$1 \cdot 10^{1}$	±15	-	-	-	ПМГД-1
ционный		$1.10^{4}$					
Тепловой	BTCO-1	3.10 <sup>-1</sup>	± 10	$80 \times$	-	-	-
		$1 \cdot 10^4$		$150 \times 295$			
	ВСБ-1	$1.10^{0}$	+30	390×	14	140	MT-6
		$4.10^{3}$		$248 \times 257$			MT-6-3
	BT-2A	1.10 <sup>-1</sup>	+30	226 ×	9	110	ПМТ-2
	21 -11	$3.10^2$	± 50	$248 \times 257$		110	ПМТ-4М.МТ-8
	BT 3	1.10 <sup>-1</sup>	+30	320 ×	15	35	
	D1-5	$7 10^2$	<u> </u>	$185 \times 150$	4,5	55	ПМТ-2 ПМТ-4М МТ-8
	DTE 1	7.10 1.10 <sup>0</sup>	+ 40	200 ×	6		MT (
	BID-I	1.10"	±40	200 X	0	-	IVI I -0
		4.10	10	136 × 319	2.5		
	PB1-2M	$1.10^{\circ}$	-40	100 ×	2,5	-	M1-6
		$4.10^{-5}$	+60	158 × 206			
Магнит-	ВИМ-2	1.10-11	± 70	386 ×	22	120	ПММ-14
ный		1.10-2		$278 \times 292$			
	ВМБ-3	$1 \cdot 10^{-5}$	±170	$380 \times$	19	150	ПММ-13
		$3 \cdot 10^{0}$		$290 \times 240$			
	ВМБ-6	1.10 <sup>-5</sup>	-50	400×	16	100	ПММ-32
		1.10-1	+80	200×390			
	ВМБ-8	$1.10^{-8}$	-55	$240 \times$	35	75	ПММ-32
		$1 \cdot 10^{-1}$	+130	$158 \times 335$			
	ВМБ-10	$1 \cdot 10^{-4} 1 \cdot 10^{0}$	±90	-	-	-	ПММ-38
	ВМБ-11	$1.10^{-8}1.10^{-1}$	-50+100	-	_	-	ПММ-46
	ВМБ-12	$1.10^{-4}1.10^{0}$	-60+130	_	-	_	ПММ-44
	BMII5-12	1.10 <sup>-6</sup>	-50	_	_	-	ПММ-32-1
	Dirich 12	$1.10^{-1}$	+100				110101 02 1
	BM5-14	$1.10^{-7}$ $1.10^{0}$	-50 +110	_			ПММ_32_1
Ионнов		7 10-9	-30+110	- 	26	_	
иониза-	БИО-1	/·10	± 30	$220 \times$	20	-	111/11/-39
ционныи		1.10-4.1.10-1	1.12	<i>93 × 32</i> 8			MIL 20
	ВИО-2	1.101.10	± 13	-	-	-	МИ-29
	ВИЦБ-11	$2.10^{-5}$	-	100 ×	3	-	ИМ-12
		1.102		$158 \times 230$			ПМИ-10-2
	ВИ-12	1.10-4	$\pm 50$	$448 \times$	30	280	ПМИ-12
		$1.10^{\circ}$		$340 \times 287$			ПМИ-12-8
	ВИ-14	$1 \cdot 10^{-8}$	± 55	$480 \times$	20	140	ИМ12,МИ12-8,
		$1 \cdot 10^{1}$		$220 \times 360$			ПМИ-12-8
Комбиниро	ВИТ-2	$1.10^{-5}$	± 30	320 ×	10	75	ПМТ-2,ПМТ-4М
ванный		$1 \cdot 10^{1}$		$280 \times 215$			ЛМ-3-2, ПМИ-2
	ВИТ-3	1.10-5	± 35	230 ×	15	75	ПМТ-2,ПМТ-4М
		$1.10^{2}$		$360 \times 485$			ПМИ-2, ПМИ-10,
							ПМИ-51
	BTM-2	1.10-7	-40	-	-	-	ПМТ-6-3
		$1.10^{5}$	+85				ПММ-32-1М

Типы измерителей	Торговая марка	Разрешающая	Диапазон масс,	Диапазон рабочих
парциальных		способность	а.е.м.	давлений, Па
давлений				
Статический	МСД-1	60	2150	$1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-8}$
	MX-1304	100	1120	$1.10^51.10^{-7}$
	MX-1306	800	2900	$1.10^51.10^{-7}$
Линейный	АПДП-2	20	2200	$1 \cdot 10^{-3} 1 \cdot 10^{-7}$
резонансный	MX7301	200	1200	$1.10^{-2}1.10^{-8}$
(фарвитрон)				
Циклотронный	MX4301	25	1100	$1 \cdot 10^{-3} 3 \cdot 10^{-8}$
(омегатрон)	ИПДО-1	20	2100	$1.10^{-3}5.10^{-8}$
	ИПДО-2	35	1250	$1.10^{-3}7.10^{-9}$
Радиочастотный	MX-6401	50	156	$1.10^{-2}7.10^{-7}$
(топатрон)				
Времяпролетный	PMC-2M	45	2200	$1 \cdot 10^{-2} 1 \cdot 10^{-6}$
(хронотрон)	MCX-3A	30	1250	$1 \cdot 10^{-3} 1 \cdot 10^{-7}$
Масс-фильтр	АПДМ-1	400	1400	$7 \cdot 10^{-2} 1 \cdot 10^{-11}$
(однополярный)	ЭФМ-1	50	1100	$1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
	КМ-2	300	2300	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
Масс-фильтр	MCX-2M	100	1250	$1.10^{-3}$ $1.10^{-7}$
(квадрупольный)	MCX-4	100	1600	$1.10^{-3}1.10^{-6}$

## Характеристики измерителей парциальных давлений.

## Таблица П.3

		Мини-	Тип	Пробный газ	Macca	Потреб-	Габари-
Принцип	Торговая	мальный	датчика		КГ	ляемая	ты
действия	марка	поток				мощность	MM
		м <sup>3</sup> ·Па/с				Вт	
Искровой	ИО43.009	$7 \cdot 10^{-6}$	Вакуумный	Воздух	2	60	250×210
			стеклянный				×200
Катарометри-	ТП7101	$2 \cdot 10^{-6}$	Атмосферный	СО <sub>2</sub> ,хладон,	3,5	-	164×136
ческий				гелий			×62
Галогенный	БГТИ-7	5.10-7		Хладон	9	35	89×304×
							330
	ГТИ-6	$1.10^{-7}$	Атмосферный		10	75	360×160
		7.10-9	Вакуумный				× 220
Электронно-	13ТЭ-9-001	$7 \cdot 10^{-10}$	Атмосферный	Элегаз,	4	20	295×255
захватный				хладон			×125
Macc –					250	1500	600×780
спектрометри-	ПТИ-7	$7 \cdot 10^{-12}$	Вакуумный	Гелий			×1250
ческий	ПТИ-10	$5 \cdot 10^{-13}$			215	1100	1470×
							670×620
	ТИ1-14	7.10 <sup>-13</sup>			95	750	398×667
							×470
	ТИ1-15	$7 \cdot 10^{-14}$			95	750	398×667
							×470

## Характеристики течеискателей.

## Таблица П.4.

Рабочие жидкости н	вакуумных	насосов.
--------------------	-----------	----------

<b></b>			п	TC	п	14	T	0
			давление	Кинема-	ПЛОТ-	Моля-	1 еплота	Окисл-
Т	Tananaa	ГОСТ	паров при	тическая	ность	рная	испаре-	итель-
ТИП	Горговая		293 K,11a	ВЯЗКОСТЬ	при 293	масса,	ния М Пам/	ная
	марка	I Y		при 525К $10^6 - z^2/z$	$\mathbf{K}$ ,	K17	МДж/	стои-
D	D1 D2		2.10-1	×10 ,M /C	17CM	кмоль	кмоль	кость
Ртуть	PI,P2	-	3.10	-	13,6	200	-	0
Минера	BM-1	00138-	1.10°	70	0,89	450	120	11
льная	BM-4	01402-86	5.10-3	50	0,87			
	BM-5	-	2.10-7	70	0,89			У
	BM-6	-	4.10-5	40	0,87			П
	BM-7		$4 \cdot 10^{-6}$	90	0,89			У
	Apiezon A	-	1.10-5	-	0.89	350	90	П
	Apiezon B	-	$1.10^{-6}$	-		350	90	
	Apiezon C	-	$5 \cdot 10^{-7}$	-		574	120	
Крем-	ПЭС-В-1	ГОСТ16	$1 \cdot 10^{-5}$	25	0,97	700	100	Х
неорга-	ПЭС-В-2	480-70	$1 \cdot 10^{-4}$		0,98		90	
ничес-	Octoil	-	1.10-5	75	1,06	391	120	
кая	ПФМС-2	ТУ6-02-	$1.10^{-4}$	10	1,10	571	110	
		777–73						
	ПФМС-13	ТУ6-02-	3.10-5	20	1,10	480	100	
		274–74						
	MΦT-1	ТУ6-02-	$1.10^{-6}$	36	1,10	544	130	
		934–73						
	DC-704	-	$1.10^{-6}$	47	1,56	484	100	
	DC-705	-	$1 \cdot 10^{-7}$	170	1,58	546	120	
	ФМ-1	ТУ6 02-	5·10 <sup>-9</sup>					
		758–73		36	1,1	547	120	
	ФМ-2	ТУ6 02-	$1 \cdot 10^{-10}$	60	1,1	689	140	
		286–73						
Эфиры	NeovacSY	-	$1.10^{-6}$	250	1,2	405	-	У
	МВД	-	1.10-6	20	1,2	3000	130	
	Santovac-5	-	$1 \cdot 10^{-7}$	-	-	447	-	
	5Ф4Э	ТУ6-09-	$1 \cdot 10^{-9}$	120	1,2	446	130	
		4626-78					—	
	Н-ПФЭ	ТУ6-09-	$1 \cdot 10^{-10}$	130	1,2	450	145	
		06-822-76					-	
Углево-	Алкарен-35	ТУ6-01-28-	$5 \cdot 10^{-4}$	100	0,94	-	-	Х
дородн-		54-85						
ые	РЖМ-130	ТУ6-02-3-	$4 \cdot 10^{-4}$	30	1,9	-	-	
		354-87	0					
	Алкарен-24	-	5·10 <sup>-8</sup>	55	0,90	420	130	

\*О-отличная, Х-хорошая, У-удовлетворительная, П-плохая.



Рис. П4 Рабочие жидкости вакуумных насосов

Основные		Поршневые		Плас	тинчато–ротс	орные	Многопластинчатые		
характери-		1	1			1			
стики	ВНК- 0,5М	3ВНП- 3	2ДВНП- 6	BH- 01	3BHP- 1Д	2НВР- 5ДМ	РВН- 6И	РВН- 25	РВН- 50
Диапазон рабочих давлений, Па	1.10 <sup>4</sup> 1.10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>3</sup> 1·10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>2</sup> 1·10 <sup>5</sup>	3·10 <sup>0</sup> 1·10 <sup>5</sup>	4·10 <sup>-1</sup> 1·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-2</sup> 1·10 <sup>-5</sup>	2·10 <sup>4</sup> 1·10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>4</sup> 1·10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>4</sup> 1·10 <sup>5</sup>
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	0,0080	0,0630	0,1050	0,0001	0,0010	0,0050	0,1000	0,4000	0,8000
Предель- ное давле- ние:общее с газобал- ластом,Па	_	_	_	_	7·10 <sup>0</sup>	3·10 <sup>0</sup>	_	_	_
Предель- ное давле- ние:общее без газоба- лласта,Па	5·10 <sup>3</sup>	4·10 <sup>2</sup>	4·10 <sup>-1</sup>	5·10 <sup>0</sup>	1.10-1	7.10-1	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>
Предель- ное давле- ние:парци- альное по воздухуПа	5·10 <sup>3</sup>	4·10 <sup>2</sup>	4·10 <sup>-1</sup>	5.10-1	7.10-2	1.10-2	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>4</sup>
Частота вращения ротора, об/мин	1500	750	1500	1400	2800	1430	1450	600	500
Количес- тво масла, в насосе, дм <sup>3</sup>	_	_	_	_	0,5	1,2	_	_	_
Расход охлаждаю- щей воды, дм <sup>3</sup> /с	2,75	0,04	0,05	_	_	-	0,08	0,18	0,36
Мощность электро- двигателя, кВт	3	5,5	11	0,12	0,25	0,55	15	55	75
Диаметр впускного патрубка, мм	80	100	100	8	10	16	110	150	250
Габариты: длина,мм ширина,мм высота, мм	862 640 1725	1430 795 925	1770 795 925	306 135 170	320 130 200	540 160 280	1500 700 740	2250 1000 1100	3000 1200 1500
Масса,кг	540	750	1500	8,3	9,5	30	310	2250	4500

## Характеристики механических объемных насосов.

Продолжение	табл.	П5.
-------------	-------	-----

Основные		Водоко:	льцевые		Золотниковые			
характе-	BBH1-	BBH1-	BBH1-	BBH1-	AB3-	AB3-	AB3-	HB3-
ристики	0,75	3	12	300	20Д	90	180	500
Диапазон								
рабочих	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-2} \dots$	$4 \cdot 10^{0}$	$4 \cdot 10^{0}$	$5 \cdot 10^0$
давлений, Па	$1.10^{5}$	$1.10^{5}$	$1.10^{5}$	$1.10^{5}$	$1 \cdot 10^{5}$	$1.10^{5}$	$1.10^{5}$	$1.10^{5}$
Быстрота								
откачки, м <sup>3</sup> /с	0,0125	0,0500	0,2000	5,000	0,0200	0,0900	0,1850	0,5000
Предельное								
давление: об-	-	_	—	—	$7.10^{\circ}$	$4.10^{2}$	$4.10^{2}$	$4.10^{2}$
щее с газобал-								
ластом,		ļ!		ļ		ļ		
общее без	0.103	0.103	0.103	1.104	1.100	<b>5</b> 1 0 0	<b>5</b> 1 0 0	<b>-</b> 1 00
газобалласта,	8.10	8.10	8.10	1.10-	1.10°	7·10°	7·10°	7·10°
парциаль-ное	0.103	0.103	0.103	1 104	1 10-2	7.10-1	7.10-1	1.100
по воздуху, па	8.10	8.10	8.10	1.10	1.10 -	7.10	7.10	1.10°
Частота	1500	1500	1000	250	1500	1500	1500	1000
вращения,	1500	1500	1000	250	1500	1500	1500	1000
ОО/МИН		<u> </u>		<b> </b>	ļ	<b> </b>	ļ	
Количество					25	14	20	140
масла в $\mu_{2}$	_	_	_	_	5,5	14	20	140
Расхол								
аслод	0.05	0.13	0.38	12		0.20	0.40	2.00
волы лм <sup>3</sup> /с	0,05	0,15	0,50	12	_	0,20	0,40	2,00
Мошность								
электродви-	2,2	7,5	22	630	2,2	11	15	55
гателя, кВт	2	- 2-			2		-	
Диаметр								
впускного	63	78	135	300	40	100	100	160
патрубка,мм								
Габариты:								
длина,мм	815	1195	1840	6600	650	1000	1070	2765
ширинамм	332	385	710	3110	400	575	875	1760
высота,мм	333	755	1220	2120	665	1035	1055	1355
Масса, кг	90	91	885	25000	185	600	880	4000





----- fan annymme;

— — e zerymselt

Характе-				Торговые	марки насос	сов		
ристики	ДBH-5-1	ДВН-	ДВН-	ДВН-	ДВН-	2ДВН-	2ДВН-	ДВН-
		5-2	50-1	50-2	1 50-1	500	1500	5000
Диапазон	$4 \cdot 10^{0}$	3·10 <sup>-2</sup>	$4 \cdot 10^{-2}$	3·10 <sup>-1</sup>	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{0}$	$4 \cdot 10^{0}$	$4 \cdot 10^{0}$
рабочих	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{1}$	$2 \cdot 10^2$	$1.10^{2}$	$1 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{1}$	$2 \cdot 10^{1}$	$2 \cdot 10^{1}$
давлений, Па								
Быстрота								
откачки, м <sup>3</sup> /с	0,005	0,007	0,045	0,050	0,135	0,500	1,500	5,000
Предельное								
давление:	$7 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$
общее,Па								
парциальное по		2	2		2			
воздуху,Па	_	5.10-3	7·10 <sup>-3</sup>	-	$7 \cdot 10^{-3}$	_	_	—
Наибольшее	2	2	2	2	2	2	2	2
давление за-	$1.10^{3}$	$1 \cdot 10^{2}$	$1.10^{\circ}$	$5 \cdot 10^{2}$	$5 \cdot 10^{2}$	$1.10^{2}$	$1.10^{2}$	$1 \cdot 10^{2}$
пуска, Па								
Расход	0.01		0.01	0.02	0.02	0.1	0.1	
охлаждающей	0,01	—	0,01	0,02	0,02	0,1	0,1	—
воды, дм <sup>°</sup> /с								
Мощность	0.10	0.10	07	15	15	7.5	10	29
электро-	0,18	0,18	0,7	1,5	1,5	7,5	10	28
двигателя, квт								
таоариты:	150	261	415	615	622	1275	1925	2580
длина,мм	438	201	413 240	043 260	025	1373	1855	2380
ширина,мм	138	180	240	300	240	845	380	890 1145
высота,мм	10/	224	290	525	200	04J	40J 920	1143
	1/	23	20	00	43	303	830	1900
диаметр	40	40	85	85	100	175	250	
входного	40	40	05	05	100	175	230	_
патруока,мм								

Характеристики двухроторных вакуумных насосов.



## Таблица П.7.

Σ	(a)	ракте	ристики	турбо	рмолек	уляр	ных	насосов

Основные				Типы насосов			
характе-	TMH-	TMH-	TMH-	TMH-	TMH-	TMH-	TMH-
ристики	100	200	500	1000	5000	10000	20000
Диапазон	5·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	$1 \cdot 10^{-6}$	5·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	$1 \cdot 10^{-6}$
рабочих	$1 \cdot 10^{-2}$	$1.10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
давлений, Па							
Быстрота от-							
качкивоздуха	0,10	0,25	0,50	1,00	6,30	11,0	18,0
M <sup>3</sup> /c							
Предельное	10-7	10-7	o 1 or <sup>7</sup>	10-7	10-7	10-7	<b>a</b> 1 a-f
остаточное	10 '	10 '	8·10 <sup>-7</sup>	10 '	10 '	10 '	$2.10^{-5}$
давление, Па							
Наиоольшее	100	$10^{0}$	100	100	100	100	100
выпускное	10	10	10	10	10	10	10
Цастота							
врашения с <sup>-1</sup>	300	300	300	400	100	100	83.3
Мошность	200	200	200		100	100	00,0
электродви-	0.3	0.3	0.8	0.25	2.0	7.0	7.0
гателя, кВт	,		,	,	,	,	,
Источник пи-							
тания элек-	HBP-3	HBP-3	HB3	—	—	—	—
тродвигателя	СПЧ	СПЧ	СПЧФ				
Расход охла-							
ждающей	0,01	0,01	0,03	_	0,06	_	_
воды, дм <sup>3</sup> /с							
Диаметр	107	1.50	2.50				
впускного	125	160	260	—	500	—	—
патруока,мм							
диаметр	20	50	50		100		
выпускного	52	30	30	_	100	_	—
Габариты							
таоариты. лпина мм	_	675	_	_	_	_	_
ширина мм	_	310	_	_	_	_	_
высота ,мм	_	385	_	_	_	_	_
Масса, кг	110	205	210	190	1500	3500	3910
· · · ·							



Рис. П7 Характеристика турбомолекулярных насосов.

## Характеристики высоковакуумных паромасляных насосов.

Характе-			Торгов	ые марки на	сосов		
ристики	Н-	НВД-	НВДС-	DFR-	DFR-8000	DFR-	DFR-
	0,025-2	0,15	100	3000		20000	50000
Диапазон рабочих да- влений, Па	10 <sup>-4</sup> 10	10 <sup>-3</sup> 10	10 <sup>-4</sup> 1				
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	0,01	0,08	0,24	2,7	7,2	18	45
Предельное давление, Па	$1 \cdot 10^{-5}$	3.10-4	$1 \cdot 10^{-5}$	3.10-5	3.10-5	3.10-5	3.10-5
Наибольшее выпускное давление,Па	92	66	40	60	60	60	60
Мощность нагревателя, кВт	0,23	0,45	0,6	2,2	4,8	12	24
Расход воды дм <sup>3</sup> /с	_	0,02	0,02	0,1	0,1	0,2	0,2
Количество рабочей жид- кости,дм <sup>3</sup>	0,02	0,1	0,1	0,6	1,7	5,0	12
Диаметр впускного патрубка,мм	40	85	100	250	400	630	1000
Диаметр выпускного патрубка,мм	14	20	25	50	63	100	160
Габариты: длина,мм	_	295	275	_	_	_	_
ширина,мм высота мм	_	350	360		785	- 1130	- 1890
Масса, кг	_	9	8	23	69	173	420

#### Таблица П.9.

Характеристики		Типы н	насосов	
	НВБМ-0,5	НВБМ-2,5	НВБМ-5	НВБМ-15
Диапазон рабочих давлений, Па	5.10-314	$4.10^{-3}40$	$4 \cdot 10^{-3}40$	$4 \cdot 10^{-3}40$
Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с	0,80	2,60	5,70	17,5
Предельное давление, Па	$1 \cdot 10^{-3}$	7.10-4	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Наибольшее выпускное давление, Па	90	200	200	200
Диаметр входного патрубка, мм	160	250	400	630
Диаметр выходного патрубка, мм	70	100	160	160
Количество масла, дм <sup>3</sup> /с	7	23	57	120
Расход охлаждающей воды, дм <sup>3</sup> /с	0,04	0,1	0,2	0,5
Мощность нагревателя, кВт	2	6	12	36
Габариты: длина,мм	515	740	1150	1550
ширина,мм высота,	465	590	910	1500
ММ	1065	1710	2340	2700
Масса, кг	67	230	380	1550

#### Характеристики бустерных паромасляных насосов.



Рис.П8. Характеристики паромасляных насосов: \_\_\_\_\_ без ловушки, \_\_\_\_\_с ловушкой

Характеристики	Типы насосов							
	ЦВН-0,1-2	ЦВН-0,3-2	ЦВН-1-2	ЦВН-1,5-3				
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^0 10^5$	$3 \cdot 10^1 \ 10^5$	$5 \cdot 10^0 10^5$	$1.10^{0}10^{5}$				
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	0,002	0,004	0,006	0,010				
Предельное давление, Па	$1 \cdot 10^{0}$	$7 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{2}$	$3 \cdot 10^{0}$				
Количество отка- чиваемого азота, м <sup>3</sup> ·Па	$1.10^{3}$	$3 \cdot 10^{3}$	$1 \cdot 10^{4}$	$1 \cdot 10^{4}$				
Начальный расход жидкого азота, дм <sup>3</sup>	1,3	2	6	6				
Установившийся расход жидкого азота, дм <sup>3</sup> /ч	0,25	0,35	0,25	0,5				
Количество адсорбента, кг	0,1	0,3	1	1,5				
Время регенерации цеолита СаА-4в при атмосферном давлении, ч	3	2	3	3				
Мощность нагревателя, кВт	0,4	0,14	0,83	0,35				
Габариты: длина,мм ширина,мм высота, мм	192 192 390		124 124 390					
Масса, кг	1,3	_	4,2	_				

## Характеристики криоадсорбционных насосов.

	Типы насосов							
Характеристики	ЭГИН-	ЭГИН-	ЭГИН-	ЭГИН-	ЭГИН-			
	0,8/0,1	1,0/0,1	1,6/0,25	5/1	10/1,5			
Диапазон рабочих	$4 \cdot 10^{-7}$	4·10 <sup>-7</sup>	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$			
давлений, Па	$3.10^{0}$	$3 \cdot 10^{0}$	$3.10^{0}$	$3 \cdot 10^{0}$	$3 \cdot 10^{0}$			
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	0,8	1,0	1,6	5,0	10,0			
Предельное давление,	$7.10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7.10^{-8}$	$7.10^{-8}$			
Па								
Давление запуска	13	13	13	13	13			
насоса, Па								
Число испарителей	2	2	2	6	6			
Потребляемая	1,0	1,13	2,25	9,8	14,85			
мощность, кВт								
Габариты насоса:								
длина,мм ширина,мм	430	530	630	760	1100			
высота, мм	612	370	430	870	1100			
	580	525	540	1000	1000			
Габариты блока								
питания иуправления:								
длина,мм	647	—	—	—	—			
ширина,мм высота,	712	—	—	—	—			
MM	1034	_	_	—	—			
Масса насоса, кг	100	100	150	300	550			

## Характеристики геттерно-ионных насосов.



Рис.П11 Характеристики геттерно-ионных насосов

Основные			Ти	пы насосов			
характери-	НМД-	НМД-	НМД-	НМД-	НМД-	НМД-	НМД-
стики	0,0063	0,025	0,063	0,1	0,25	0,68	1
Диапазон							
рабочих	$4 \cdot 10^{-7}$	$4.10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	4·10 <sup>-7</sup>	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
давлений, Па	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$				
Быстрота							
откачки, м <sup>3</sup> /с	0,006	0,022	0,06	0,11	0,25	0,65	1,20
Предельное							
давление, Па	$7.10^{-8}$	$7.10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7.10^{-8}$	$7.10^{-8}$	$7.10^{-8}$	$7.10^{-8}$
Наибольшее							
давление	$1 \cdot 10^{0}$	$1 \cdot 10^{0}$	$1 \cdot 10^{0}$				
запуска, Па							
Диаметр вход-							
ного патруба,	25	100	100	100	160	250	250
ММ							
Габариты нас-							
оса: длина,мм	85	157	320	320	320	500	554
ширина,мм	80	84	106	180	327	350	500
высота, мм	160	220	320	320	340	580	580
Масса насоса,	2,9	8,4	21	32	53	190	290
КГ	<b>F</b> FF	5.0	5.57	5.0	517	59	<b>2</b> EE
Тип блока	БП-	ЫІ-	ЫІ-	ЫІ-	ЫІ-	ЫІ-	2×БП-
питания	0,0063	0,025	0,063	0,1	0,25	0,63	0,63
Габариты бло-							
ка питания:	400	400	400	400	400	400	400
длина,мм	480	480	480	480	480	480	480
ширина,мм	300	300	320	320	320	320	320 600
высота, мм	220	220	300	300	300	300	000
Масса олока	21	20	51	35	4/	4/	2×4/
питания, кг							

#### Характеристики магниторазрядных насосов.



Рис.П12 Характеристики магниторазрядных насосов

Тип	Диаметр	Проводимость,
запорной арматуры	условного прохода, мм	м <sup>3</sup> /с
3BЭ-100	100	1,2
3BЭ-160	160	3,34
<u>3B</u> 3-250	250	13,4
<u>3</u> BЭ-400	400	46,25
ВЭП-25	25	0,014
ВЭП-63	63	0,148
ВЭП-100	100	0,470
ВРП-25	25	0,011
ВРП-63	63	0,102
ВРП-100	100	0,332
КМУ1-10	10	0,0014
КМУ1-16	16	0,0040
КМУ1-25	25	0,0140
КМУ1-40	40	0,0400
КМУ1-63	63	0,1480

## Проводимость вакуумной запорной арматуры в молекулярном режиме течения газа.

Рекомендуется выбирать следующие номинальные размеры условных проходов элементов вакуумных систем (мм): 0,1; 0,25; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300.

Для использования во фланцевых, штуцерных соединениях и элементах трубопроводов допускается применение следующих номинальных размеров условных проходов (мм): 8; 12; 20; 32; 50; 80; 125; 200; 320; 500; 800; 1250; 2000; 3150; 5000 (ГОСТ 18626 – 73).

Условные обозначения элементов	вакуумных систем.

Элементы вакуумной	Обозначения							
системы	графическое	текстовое						
Насос вакуумный (общее обозначение)	a 60°	N						
Вращательный	\$\$ \$\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	NL						
Двухроторный		NZ						
Турбомолекулярный		NR						
Водокольцевой		NW						
Эжекторный		NH						
Диффузионный		ND						
Адсорбционный		NA						
Геттерный		NG						

	-	
Криосорбционный		NC
Ионно-сорбционный		NE
Магниторазрядный		NM
Ловушка (общее обозначение)		В
Охлаждаемая жидкостью, проточная		BW
Охлаждаемая воздухом		BA
Заливная		BL
Термоэлектрическая		BT
Сорбционная		BS
Ионная		BE
Манометрический преобразователь (общее обзначение)	a/2 5/4 a	Р
Деформационный		PD
Жидкостный		PL
Ионизационный		PA

Магнитный		PM
Тепловой	Ì	PT
Течеискатель (общее обзначение)		G
Масс-спектрометр	S S	S
Клапан (общее обозначение)		V
Клапан с ручным приводом		VH
Клапан с дистанционным управлением		VA
Клапан с электро-магнитным приводом		VE
Клапан с пневматическим или гидравлическим приводом		VP
Клапан с электромашинным приводом		VM
Клапан проходной		VR

Клапан угловой		VN
	Ť	
Клапан трехходовой		VT
Натекатель		VF
Камера вакуумная (общее обозначение)		CV
Прогреваемая часть вакуумной системы		СТ
Трубопровод (общее обозначение)		Т
Трубопровод прямой	<b>⊢−−−−</b>	TR
Колено	L,	TN
Тройник	μ.Τ	TT
Крестовина	μ. Η μ	TK
Гребенка		TG



VF	Натекатель НК - 20 (ОТ 4.463.225 ТУ)	1	
VA5	Клапан Ду 16	1	U=4 л/с
VA3, VA4, VH	Клапан Ду 16	3	U=4 л/с
VA2	Затвор ЗЭПМ - 100 (П6ЩМО.336.001ТУ)	1	U=3340 л/с
VA1	Клапан КЭУ - 63 (ОТМО.336.015 ТУ)	1	U=170 л/с
T7T9	Трубопровод ДУ10 (ОСТ 11.868.005-74)	3	L=50 мм
T4, T6	Трубопровод ДУ160 (ОСТ 11.868.010- 74)	2	L=200 мм
T1T3	Трубопровод ДУ 63 (ГОСТ 24935 - 81)	3	L=200 мм
S	Анализатор омегатронный РМО - 4С	1	
PT1PT3	Преобразователь термопарный ПМТ-2	3	
PA2PA3	Преобразователь ионизационный ПМИ- 12	2	
PA1	Преобразователь ионизационный ПМИ - 2	1	
NM	Насос НМД - 0,25	1	S=250 л/с
NL	Насос 3HBP - 1Д	1	S=1 л/с
ND	Hacoc H1C2	1	S=100 л/с
CV	Камера вакуумная $\phi$ 500, L=500	1	V=100 л
B2	Ловушка ЛС1Т - 25	1	U=2 л/с
B1	Ловушка ЛС1Т - 63	1	U=10 л/с
Обозначения	Наименование	Кол.	Примечания

Рис.П14 Пример выполнения принципиальной вакуумной схемы

Dy	D	<b>D</b> <sub>1</sub>	$D_2$	<b>D</b> <sub>3</sub>	$D_4$	<b>D</b> <sub>5</sub>	$D_6$	Η	$H_1$	h	d	n	S	$d_1$
10	55	40	12,2	14	22		19							
16	60	45	18,2	20	28	—	23	8	11		6,6	4		
25	70	55	27,2	30	38		33							
40	100	80	42,2	45	53		47			2,5				5,0
63	130	110	66,0	70	78	96	80	12	14		9	8	3,9	
100	165	145	103	110	118	128	110							
160	225	200	_	170	178	180	166	16	17	_	11	12	4,8	6,0
250	335	310	255	260	268	290	268			4,5			6,4	8,0
400	510	480	405	410	418	450	408	20	21		14	16		

# Разборное соединение с симметричными фланцами и резиновыми прокладками



Разборное соединение с несимметричными фланцами и резиновой прокладкой

Dy	D	<b>D</b> <sub>1</sub>	<b>D</b> <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	L	L <sub>1</sub>	1	d	n	a	h
10	46	14	34	22,5	13,5	10	5				3	2
15	52	19	39	27,5	18,5				6			
20	62	24	48	32,5	23,5	11	6	1,8		4		
25	70	30	55	38,0	29,0				7		4	
32	78	37	62	45,0	36,0	13	8					
50	110	56	90	69,0	55,0							
60	120	66	102	79,0	65,0				9			3,5
80	145	86	125	100	86,0	15	10	3,0		6		
100	170	106	145	120	106							
125	195	131	170	146	132				12			
160	235	166	210	188	168						5	
200	275	206	250	228	208	17	12					
260	340	266	308	288	268			4,2	14	8		
300	380	306	350	328	308	19	14					5
400	490	407	455	430	410	21	16		16			
500	600	508	565	530	510	25	20		18		6	



							Число		
$D_y$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	b	Η	болтов n	d	h
10	46	34	19,5	13,5					
15	52	39	24,5	18,5	8			6	
20	62	48	31,5	23,5		4			2
25	70	55	37	29				7	
32	78	62	44	36	10		4		
40	85	70	52	44					
50	110	90	70	55					
60	120	102	80	70	12			9	
80	145	125	100	90					
100	170	145	120	110		6			3,5
125	195	170	145	135	14				
160	235	210	180	170				12	
200	275	250	220	210	18				
260	340	308	280	270			8	14	
300	380	350	320	310	20	8			5
380	460	430	400	390				18	
500	600	565	525	515	24				

Разборное соединение с фторопластовым уплотнителем



Dy	D	D <sub>0</sub>	<b>D</b> <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	$D_4$	Н	$H_1$	d <sub>1</sub>	<b>d</b> <sub>2</sub>	n	α
-	H11		±0,1	I <sub>s</sub> 9	h11	h11	h11	h11		H13		
16	16,0	27,0	18,3	21,4	34	18,5	8	13,0	M4	4,4	6	60°
40	35,0	58,7	41,8	48,3	70	38,5	13	18,0	M6	6,6	6	60°
63	59,5	92,1	77,0	82,6	114	66,5	18	23,0			8	45°
100	100,4	130,2	115,2	120,7	152	104,5	21	26,0			16	22°30'
160	150,0	181,0	166,0	171,5	202	160,6	22	27,0	M8	8,4	20	18°
200	200,0	231,8	216,8	222,3	253	206,0	25	30,0			24	15°
250	250,0	282,6	267,5	273,0	305	256,0	-				32	11°15'
Уплотнение												
				(ме	едь М	1)						
	$D_y$				$d_3$					$d_4$		
	16			21	,2±0,0	5				16,0±	0,2	
	40			48	3,1±0,0	5				36,8±	0,3	
	63			82	$2,4\pm0,03$	5				63,6±	0,3	
	100			12	$20,5^{+0,05}_{-0,10}$	5				101,7±	:0,3	
160 171,3 <sup>+0,05</sup> <sub>-0,10</sub>										152,5±	:0,5	
	200			22	$21,1^{+0,05}_{-0,10}$	5				203,4±	:0,5	
	250			27	72,8+0,05	5				254,0±	:0,5	





#### ЛИТЕРАТУРА

- Вакуумная техника: Справочник/ Е.С.Фролов, В.Е.Минайчев, А.Т.Александрова и др.- М.;Машиностроение,1992.- 471 с.
- Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.,Издательство стандартов,1992.-227 с.
- Данилин Б.С., Минайчев В.Е. Основы конструирования вакуумных систем.- М., Энергия, 1971.-392 с.
- 4. Дешман С. Научные основы вакуумной техники.-М.,Мир, 1964.-715 с.
- 5. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем.-М., Энергия, 1979.-504 с.
- Розанов Л.Н. Вакумные машины и установки. -Л.,Машиностроение, 1975ю-336 с.
- Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах.-М.,Атомиздат,1980.- 216 с.
- Фролов Е.С. Турбомолекулярные вакуум-насосы.-М.,Машиностроение,1980-119 с.
- Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы.-М-Л,Энергия,1965,-400 с.

## Обозначения основных физических величин

<i>а</i> — количество адсорбированного	<i>R</i> — универсальная газовая
газа	постоянная, $R = 8,31.10^3$
С — постоянная Сюзерленда	Дж/(кмоль.К)
<i>D</i> — коэффициент диффузии	Re – критерий Рейнольдса
<i>d</i> — диаметр молекулы	<i>q</i> — элементарный электрический
Е — тепловой поток	заряд
е — степень черноты	Q — газовый поток в условных
<i>F</i> — сила	единицах
G — массовый расход газа	S — быстрота откачки
<i>g</i> — ускорение земного притяжения,	s — растворимость газа в твердом
<i>g</i> = 9,80665 м/с	теле
<i>I</i> — энтальпия	<i>t</i> — время откачки
Кп — критерий Кнудсена	<i>T</i> — абсолютная температура
<i>k</i> — молекулярная газовая	<i>v</i> — скорость молекул газа
постоянная, <i>k</i> =1,38.10 <sup>-23</sup> Дж/К	V— объем
L — средняя длина свободного пути	<i>W</i> — мощность
М — молекулярная масса газа	U — проводимость вакуумной
<i>т</i> — масса молекулы	системы
N — молекулярный газовый поток	Z – сопротивление вакуумной
$N_A$ — число Авогадро, $N_A = 6,02.10^{26}$	системы
1/моль	α — коэффициент аккомодации
N <sub>q</sub> — число молекул, ударяющихся о	γ — вероятность конденсации
единицу поверхности в единицу	молекулы
времени	η — коэффициент динамической
Nu — критерий Нуссельта	вязкости
<i>n</i> — молекулярная концентрация газа	$\lambda$ — коэффициент теплопроводности
<i>р</i> — давление газа	ρ — плотность
	ω — телесный угол
## Предметный указатель

Абсорбент Абсорбция Авогадро Адсорбент Адсорбция физическая мономолекулярная полимолекулярная Бар Больцман Блистер-эффект Быстрота действия —откачки -- геометрическая — — эффективная Бойль-Мариотт Бурдон Вакуум низкий - сверхвысокий - средний - высокий Ввод электрический высоковольтный - сильноточный - термопарный Векшинский Вероятность конденсации Водородная «болезнь» Время адсорбции – откачки Газ балластный - пробный Газоанализатор времяпролетный - динамический - квадрупольный — магнитный - монополярный - омегатронный статический Газовыделение десорбционное – диффузионное Газопроницаемость Геде Гей-Люсак Герметичность Гигроскопатор Градуировка преобразователей общих давлений парциальных давлений Давление запуска - максимальное выпускное - наибольшее рабочее - наименьшее рабочее - предельное Дальтон Десорбция Диффузия газов Закон Авогадро - Бойля-Мариотта - Гей-Люсака - косинусный

Затвор Измерение газовых потоков - общих давлений - парциальных давлений Изотерма адсорбции — s-образная Испаритель дуговой - подогревный прямонакальный - электронно-лучевой Керамика алундовая - стеатитовая - форстеритовая Клей эпоксидный Кнудсен Концентрация газа Коэффициент адсорбируемости - аккомодации - диффузии — захвата - использования насоса - компрессии — подачи - относительной чувствительности - стоимостной — угловой - чувствительности Ловушка адсорбционная — ионная - конденсационная механическая - сорбционная Лэнгмюр Масло вакуумное Масс-спектрометр Манометрический преобразователь гидростатический - деформационный - компрессионный - магнитный мембранный - радиоизотопный — тепловой - электронный Моделирование течения газа методами механики сплошной среды угловых коэффициентов - статистических испытаний Насос вакуумный бустерный диффузионный двухроторный - жидкостно-кольцевой — золотниковый - ионно-сорбционный - криосорбционный - магниторазрядный механический пароструйный пластинчато-роторный - пластинчато-статорный - поршневой - ротационный - турбомолекулярный - фракционирующий - эжекторный

Натекание Натекатель Нестабильность откачки аргонная Нуссельт Оже-спектрометрия Откачка ионная криосорбционная - криоконденсационная молекулярная - объемная - пароструйная – хемосорбионная Паскаль Пайка мягкая - твердая Пеннинг Пицеин Плотность газа Проводимость Производительность насоса Поток газа массовый — прямой - обратный - условный Рамзай Разрешающая способность Расчет вакуумной системы проверочный - проектировочный времени откачки - централизованной системы - форвакуумного баллона Растворимость газа Режим течения молекулярный - квазистационарный - молекулярно-вязкостный - вязкостный - нестационарный стацинарный Резина вакуумная белая — черная Рейнольдс Сварка вакуумноплотная газовая - в защитной среде - диффузионная - дуговая - лазерная - холодная - электронно-лучевая Силикагель Сильфон Скорость газовых молекул - испарения - конденсации - адсорбции Совместность работы насосов Соединение металлической прокладкой резиновой прокладкой - фторопластовым уплотнением - «конфлат» Сопротивление трубопровода Сорбция Спай металла со стеклом согласованный - несогласованный

Средняя длина свободного пути Степень покрытия поверхности Степень черноты Схема вакуумная принципиальная — типовая — централизованная Сюзерленд Теплоемкость газа Теплообмен Теплота адсорбции - испарения — миграции - хемосорбции Течеискание высокочастотным разрядом - люминесцентным методом - масс-спектрометрическим методом - пробным газом - пузырьковым методом радиоизотопным методом Течеискатель галогенный - масс-спектрометрический Течь Topp Тройная точка Трубопровод эквивалентный Уголь активный Уравнение газового состояния - основное Условие нестационарности потока Устройство для передачи движения в вакуум вращательного - качательного - поступательного Френдлих Фторопласт Хемосорбция Цеолит Энергия - взаимодействия двух молекул — молекулы с поверхностью - ионизации Эффект притяжения молекул дисперсионный - индукционный ориетационный

## Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
В.1. Понятие о вакууме	5
В.2. История развития вакуумной техники	7
В.3. Применение вакуумной техники	9
Глава 1. Свойства газов при низких давлениях	13
1.1. Давление газа	13
1.2. Распределение молекул газов по скоростям	18
1.3. Средняя длина свободного пути	21
1.4. Взаимодействие молекул газа с поверхностью	25
1.5. Время адсорбции	26
1.6. Давление насыщенных паров	32
1.7. Степень покрытия поверхности молекулами газа	35
1.8. Растворение газов в твердых телах	42
1.9. Электрические явления в вакууме	45
1.10. Контрольные вопросы	51
1.11. Задачи	52
Глава 2 Теоретические основы	54
2.1. Степени вакуума	54
2.2. Явления переноса	56
2.3. Температурное равновесие давлений	63
2.4. Моделирование течения газа методами механики сплошной среды	65
2.5. Моделирование течения газа методом интегральных	
угловых коэффициентов	75
2.6. Моделирование течения газа методом статистических испытаний	80

2.7. Газовыделение	86
2.8. Основное уравнение	92
2.9. Контрольые вопросы	95
2.10. Задачи	96
Глава 3 Измерение вакуума	99
3.1. Классификация методов измерения	99
3.2. Механические методы	103
3.3. Тепловые методы	109
3.4. Электрические методы измерения общих давлений	113
3.5. Электрические методы измерения парциальных давлени	ій 123
3.6. Сорбционные методы	133
3.7. Градуировка преобразователей для измерения общих и г	тарциальных
давлений	136
3.8. Измерение газовых потоков	141
3.9. Методы течеискания	146
3.10. Контрольные вопросы	154
Глава 4 Механические методы получения вакуума	156
4.1. Общая характеристика вакуумных насосов	156
4.2. Объемная откачка	158
4.3. Конструкции объемных насосов	163
4.4. Молекулярная откачка	172
4.5. Конструкции молекулярных насосов	177
4.6. Пароструйная откачка	179
4.7. Рабочие жидкости	186
4.8. Конструкции пароструйных насосов	188
4.9.Ловушки	190
4.10. Контрольные вопросы	196

Глава 5 Физико-химические методы получения вакуума	197
5.1. Общая характеристика	197
5.2. Ионная откачка	198
5.3. Хемосорбционная откачка	200
5.4. Конструкции испарительных насосов	203
5.5. Криоконденсационная откачка	205
5.6. Криоадсорбционная откачка	208
5.7. Конструкции криогенных насосов	214
5.8. Йонно-сорбционная откачка	217
5.9. Конструкции ионно-сорбционных насосов	219
5.10. Контрольные вопросы	223
Глава 6 Анализ вакуумных систем	224
6.1. Типовые схемы вакуумных установок 224	
6.2. Расчет газовых нагрузок	234
6.3. Уравнения стационарной откачки	237
6.4. Соединения арматуры и откачиваемых объектов	240
6.5. Соединения насосов	244
6.6. Время откачки	250
6.7. Себестоимость откачки	256
6.8. Проверочный расчет вакуумной системы	260
6.9. Пример проверочного расчета	266
6.10. Контрольные вопросы	268
6.11. Задачи	269
Глава 7 Синтез вакуумных систем	271
7.1. База данных элементов вакуумных систем	271
7.2. Структурный синтез вакуумных систем методом перебора вариантов	273

7.3.Структурный синтез по типовым образам	278
7.4. Параметрический синтез вакуумной системы по коэффициенту	использования
вакуумног насоса	280
7.5. Многопараметрический синтез вакуумной системы	284
7.6. Схемы соединений и компоновки	287
7.7.Проектировчный расчет вакуумной системы	289
7.8. Пример проектировочного расчета вакуумной системы в	
стационарном режиме	294
7.9. Контрольные вопросы	304
Глава 8 Конструирование вакуумных систем	305
8.1. Конструкционные вакуумные материалы	305
8.2. Неразборные соединения	311
8.3. Разборные соединения	319
8.4. Вакуумные трубопроводы	326
8.5. Устройства для передачи движения в вакуум	329
8.6. Электрические вводы	336
8.7. Вакуумные затворы	338
8.8. Контрольные вопросы	345
Заключение	346
Приложения	348
1.Справочные данные	348
2.Выводы формул	360
3.Таблицы	368
Предметный указатель	391
Литература	395
Обозначения физических величин	396
Оглавление	397