

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Приоритетный национальный проект «Образование»
Национальный исследовательский университет**

***А. В. АРХИПОВ М. В. МИШИН А. В. ФИЛИМОНОВ
А. Н. АНДРОНОВ***

**МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА
И КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по университетскому политехническому образованию в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обу-
чающихся по направлению подготовки магистров
«Техническая физика»*

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2013

УДК 533.5, 536.483 (075.8)

М 54

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

ФТИ им. Иоффе РАН *Н.Т. Баграев*

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы

и устройства» СПбГЭТУ *Ю.А. Быстров*

Архипов А. В. **Методы получения вакуума и криогенных температур:** учеб. пособие / А. В. Архипов, М. В. Мишин, А. В. Филимонов, А. Н. Андронов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 214 с.

Учебное пособие посвящено описанию основных закономерностей физики разреженных газов, теоретических основ процесса откачки газов и паров, взаимодействию газов с поверхностью, технике получения вакуума, измерения полных и парциальных давлений, основам построения вакуумных систем.

Описаны основы общей теории рефрижераторов и ожижителей; общие принципы построения схем криогенных установок, представлены принципиальные схемы наиболее распространенных рефрижераторов с нестационарными потоками.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по образовательным программам «Молекулярная электроника» и «Биоэлектроника» направления подготовки магистров «Техническая физика», предусматривающим изучение и использование вакуумной физики и физики низких температур. Может быть использовано обучающимися по направлению «Электроника и микроэлектроника», а также аспирантами и специалистами, работающими в экспериментальной технической физике.

Пособие может быть полезно в системах повышения квалификации, в учреждениях дополнительного профессионального образования.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© А. В. Архипов, М. В. Мишин,
А. В. Филимонов, А. Н. Андронов, 2013
© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2013

ISBN 978-5-7422-4104-1

*Архипов Александр Викторович,
Мишин Максим Валерьевич,
Филимонов Алексей Владимирович,
Андронов Александр Николаевич*

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА И КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Учебное пособие

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 953005 – учебная литература

Подписано к печати 10.10.2013. Формат 60х84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,5. Тираж 40 экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в Издательстве Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1. Методы получения вакуума.....	12
1.1. Определение вакуума и его основные свойства.....	12
1.2. Молекулярно-кинетическая модель вакуума	13
1.2.1. Давление газа.....	15
1.2.2. Сечение взаимодействия и длина свободного пробега	18
1.2.3. Понятие о степенях вакуума	21
1.2.4. Молекулярный и вязкостный режимы.....	23
1.3. Физика процесса откачки газов и паров	24
1.3.1. Определение потока газа	24
1.3.2. Проводимость вакуумного канала.....	25
1.3.2.1. Проводимость отверстия.....	25
1.3.2.2. Проводимость длинного канала	26
1.3.3. Вакуумный насос и скорость откачки.....	27
1.3.4. Источники газа в вакуумной системе	30
1.3.4.1. Течи в вакуумной системе	30
1.3.4.2. Мнимые течи	30
1.3.4.3. Испарение	30
1.3.4.4. Газовыделение с поверхности	31
1.3.4.5. Растворение газа в объеме	35
1.3.4.6. Газопроницаемость стенок	35
1.4. Материалы высоковакуумных систем	36
1.4.1. Металлы	36
1.4.2. Стекла	38
1.4.3. Керамики.....	40
1.4.4. Синтетические материалы.....	41
1.5. Методы получения вакуума	42
1.5.1. Классификация вакуумных насосов.....	43
1.5.2. Механические насосы объемного действия	44
1.5.2.1. Поршневые насосы	44
1.5.2.2. Форвакуумные насосы с масляным уплотнением.....	45
1.5.2.3. Пластинчато-статорный насос	46
1.5.2.4. Пластинчато-роторный насос	46
1.5.2.5. Плунжерные (золотниковые) насосы	49
1.5.2.6. Двухроторные насосы	51
1.5.2.7. Особенности эксплуатации насосов с масляным уплотнением...	52

1.5.2.8. Диафрагменные насосы	57
1.5.2.9. Спиральные насосы	60
1.5.2.10. Винтовые насосы	61
1.5.2.11. Кулачковые (когтевые) насосы	63
1.5.3. Молекулярные насосы	65
1.5.3.1. Турбомолекулярные насосы	65
1.5.3.2. Пароструйные насосы	77
1.5.4. Насосы поверхностного действия	84
1.5.4.1. Адсорбционные насосы	87
1.5.4.2. Криогенные насосы	92
1.5.4.3. Геттерные насосы	95
1.5.5. Ионные насосы	97
1.5.5.1. Геттеро-ионные насосы.....	98
1.5.5.2. Магниторазрядные насосы	101
1.6. Методы измерения давления.....	107
1.6.1. Механические вакуумметры	107
1.6.2. Вакуумметры, использующие явления переноса	112
1.6.3. Ионизационные вакуумметры	122
1.6.3.1. Ионизационные вакуумметры с накаливаемым катодом	123
1.6.3.2. Ионизационные вакуумметры с холодным катодом.....	129
1.6.4. Измерение парциальных давлений.....	133
1.6.4.1. Статические масс-спектрометры	134
1.6.4.2. Динамические масс-спектрометры	136
1.6.4.3. Термодесорбционный газоанализатор.....	138
1.7. Конструкционные элементы вакуумных систем	139
1.7.1. Уплотнительные прокладки.....	139
1.7.2. Электрические вводы.....	144
1.7.3. Ввод механического движения	145
1.7.4. Вентили и натекатели	147
1.8. Архитектура вакуумных систем	149
1.8.1. Вакуумные системы на основе диффузионного и ротационного насосов	149
1.8.2. Вакуумные системы на основе турбомолекулярных насосов	152
1.8.3. Вакуумные системы на основе ионных насосов.....	154
1.8.4. Вакуумные системы на основе крионасосов.....	157
1.9. Средства течеискания	160
1.9.1. Вакуумметрический метод.....	160

1.9.2. Метод обнаружения течей при помощи ионного насоса	163
1.9.3. Галогенный метод	164
1.9.4. Масс-спектрометрический метод	165
2. Методы получения криогенных температур.....	170
2.1. Реальные газы и пар	170
2.1.1. Силы межмолекулярного взаимодействия	170
2.1.2. Уравнение Ван-дер-Ваальса.....	175
2.1.3. Изотермы реальных газов. Фазовые переходы	177
2.2. Методы получения низких температур.....	180
2.2.1. Эффект Джоуля–Томсона	180
2.2.2. Обратимое адиабатическое расширение	185
2.2.3. Магнитное охлаждение	188
2.3. Системы ожижения газов	193
2.3.1. Системы ожижения с использованием процесса дросселирования .	193
2.3.1.1. Простая система Линде–Хэмпсона	193
2.3.1.2. Система Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением...	195
2.3.1.3. Система Линде с двойным дросселированием	196
2.3.1.4. Каскадная система	197
2.3.1.5. Система Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением для неона и водорода.....	198
2.3.2. Системы ожижения с использованием процесса обратимого адиабатического расширения.....	200
2.3.2.1. Система Клода	200
2.3.2.2. Система Капицы	202
2.3.2.3. Система Гейландта	202
2.3.2.4. Система Клода с двумя уровнями давления	203
2.3.2.5. Система ожижения природного газа	204
2.3.2.6. Система Клода для водорода или неона.....	205
2.4. Методы измерения сверхнизких температур	206
Заключение	214
Библиографический список	215

ВВЕДЕНИЕ

Теперь следовало бы кое-что добавить о некотором тончайшем эфире, проникающем во все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и действиями частицы тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела, возбуждается всякое чувство, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниями этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими действия этого эфира были бы точно определены и показаны.

И. Ньютон, 1713 год

Философский спор о природе пустого пространства или вакуума зародился задолго до Ньютона и продолжался почти два тысячелетия. Еще Демокрит (460–370 гг. до н. э.) и его последователи утверждали, что Вселенная состоит из пустого пространства и бесконечного множества неделимых мельчайших частиц — атомов, тогда как по Аристотелю (384–322 гг. до н. э.) пространство определялось как граница окружающего тела относительно окружаемого. Поэтому «пустое пространство было бы абсурдом, так как здесь «окружающее» ничего не окружает». Для заполнения этого пространства Аристотель ввел понятие эфира, как важнейшего из пяти элементов, образующих мир. В науке XVII века это понятие получило новое содержание благодаря трудам Р. Декарта, Р. Бойля и И. Ньютона (см. эпиграф). Высокий авторитет Ньютона способствовал тому, что именно на основании представлений об упругом эфире в последующих работах Т. Юнга и О. Френеля были обоснованы основные понятия волновой оптики.

С тех пор неоднократно предпринимались попытки экспериментально доказать существование такого эфира, но все они неизменно заканчивались неудачей. Поэтому классическая физика в период своего расцвета в начале XX века вновь пришла к убеждению, что вакуум (и космический, и в пределах замкнутого объема) — это абсолютно пустое пространство, содержащее некоторое количество материальных частиц. Однако на очеред-

ном витке спирали познания законов природы появилось понятие физического вакуума, который может породить пару античастиц или двух гамма-квантов, образовавшихся при аннигиляции частиц, и, таким образом, ведет себя как некая материальная субстанция. Оказалось, что эта субстанция имеет колоссальную плотность, не встречающуюся в изученной атомной материи, например, в 1 см^3 протон-антипротонного вакуума по расчетам находится примерно 10^{39} частиц. Если к тому же учесть, что известные сейчас материальные формы занимают ничтожную часть объема Вселенной, то становится понятным, что в мире доминирует физический вакуум, который по плотности энергии превосходит все вместе взятые обычные формы материи и поэтому должен задавать свойства веществу, из которого построен окружающий мир. Р. Фейнман и Дж. Уиллер, например, показали в свое время, что в вакууме, заключенном в объеме обыкновенной электрической лампочки, содержится столько энергии, что ее хватило бы, чтобы вскипятить все океаны на земле. Однако современные теории (квантовая электродинамика, специальная теория относительности и другие) лишь постулируют существование физического вакуума, но не в состоянии описать все его свойства, без знания которых многие фундаментальные вопросы остаются не решенными. До сих пор не ясно, например, почему существует дискретный спектр масс частиц, почему одни из них устойчивы, а другие нет, почему у заряженных частиц один и тот же элементарный заряд, как рассчитать параметры частиц, хорошо известные из опыта, и т. д. Современная наука активно работает над решением этих проблем, однако, при всей их важности, они все же относятся скорее к области космологии и физики элементарных частиц, чем к технической физике, которая — по крайней мере, пока — трактует понятие вакуума в классическом смысле.

Тем не менее, созданная на основе такой упрощенной трактовки вакуумная техника, методы которой когда-то не выходили за пределы научной лаборатории, в настоящее время широко применяется во многих отраслях науки и техники. Первые области ее промышленного применения — откачка осветительных электроламп и электровакуумных приборов — по-прежнему имеют важное значение, но и производство пришедших на смену транзисторов и микросхем не смогло обойтись без вакуумного оборудования, позволяющего устранить источники загрязнений и обеспечивающего прецизионную обработку элементов микросхем, имеющих субмикрон-

ные размеры. В металлургии металлы вакуумной плавкой очищаются от растворенных газов и летучих примесей, проходят в вакууме отжиг и термообработку. Без вакуумной техники было бы невозможно производство в больших масштабах химически чистых и жаропрочных материалов. Пленки различных веществ, напыляемые в вакууме, находят применение в самых разных отраслях промышленности — от производства детских игрушек до технологии оптических и электронных приборов. В химической промышленности молекулярная дистилляция при низких температурах и давлениях в перегонном кубе позволила получать вещества, которые разлагаются, если перегонять их при атмосферном давлении. В медицине, биологии, пищевой промышленности сублимационная сушка позволяет обезвоживать при низких температурах в вакууме материалы, которые разрушаются при иных условиях. Появившаяся сравнительно недавно биоэлектроника также не может обойтись без вакуумной и криогенной техники. Без вакуумной техники не могла бы существовать и атомная промышленность, использующая ее для разделения изотопов, обработки материалов, в ускорителях элементарных частиц и термоядерных реакторах. Современная космонавтика также использует вакуумное оборудование для моделирования условий космического пространства. Наконец, разработка и развитие современных нанотехнологий требует исключительно стерильных условий, которые может обеспечить только вакуумная техника. В большинстве случаев для этой цели используются сверхвысокий вакуум и низкие температуры.

Поэтому знание основных законов состояния сильно разреженного газа, методов его получения, поддержания и диагностики, а также особенностей поведения различных материалов при низких температурах становится крайне актуальным. Физик-исследователь, обладающий навыками техники физического эксперимента, обязан владеть и вопросами построения вакуумных и криогенных систем, а также прогнозировать эволюцию объектов в условиях низких давлений и температур. Рассмотрению этих вопросов и посвящено данное учебное пособие.

1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАКУУМА И ЕГО ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

В технической физике и вакуумной технике принято следующее определение технического вакуума:

вакуум — это состояние газа, плотность которого меньше плотности воздуха в стандартных условиях.

Замкнутый объем, в котором создан вакуум, обладает рядом уникальных свойств, широко используемых в науке и технике.

1. «Силовое» воздействие атмосферного давления на границы этого объема позволяет создавать насосы и подъемные машины различного типа, проводить вакуумную формовку и другие подобные технологические операции.

2. *Теплоизолирующие свойства* вакуума основаны на том, что при пониженных концентрациях теплопроводность газа и конвекция становятся пренебрежимо малыми, и теплоотвод осуществляется только за счет излучения. Поскольку мощность теплового излучения по закону Стефана–Больцмана пропорциональна T^4 , вакуум как теплоизолятор особенно хорош при низких температурах. На основании этого свойства, например, еще в 1898 году Дж. Дьюар изобрел специальный сосуд, который до сих пор применяется для хранения сжиженных газов и в бытовых термосах.

3. Еще одно свойство вакуума заключается в том, что попавшие в него ускоренные частицы могут проходить очень большой путь, *не испытывая столкновений* с молекулами остаточного газа и, следовательно, не теряя свою энергию и не изменяя направление движения. Это очень важно для нормальной работы всех электронно- и ионно-лучевых приборов и устройств, электронных микроскопов, ускорителей заряженных частиц и т. п.

4. *Особые электрические свойства* разреженных газов связаны с возможностью ионизации атомов и молекул при столкновениях, если во время пробега между ними частицы набирают достаточную энергию. Если к тому же такие столкновения происходят достаточно часто, возникает газовый разряд, различные типы которого нашли применение в разнообразных газоразрядных приборах и газовых лазерах. С другой стороны, при очень

низкой концентрации газа вакуум является хорошим электрическим изолятором, что также используется на практике — прежде всего, в высоковольтной технике.

5. Наконец, одно из наиболее важных свойств с точки зрения современной технологии и физики поверхности заключается в том, что с уменьшением концентрации газа снижается и *поток инородных частиц на поверхность* помещенного в вакуум объекта. Это обеспечивает длительную работу накаливаемых катодов в различных электровакуумных приборах, уменьшает вредные последствия ионной бомбардировки стенок и электродов в вакуумных установках, сводит к минимуму источники загрязнений при проведении самых различных технологических операций, позволяет получать и исследовать атомно чистые поверхности различных материалов.

1.2. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАКУУМА

Оборудование для создания вакуума выпускается серийно. Но, чтобы использовать его эффективно и не наделать ошибок, полезно иметь некоторые теоретические представления. Так как вакуум — состояние газа, то и теория вакуума должна основываться на газовых законах, которые обычно описываются в рамках молекулярно-кинетической теории.

Рассмотрим некоторые ее положения, сопроводив их численными оценками для практически интересных случаев. Газ состоит из молекул, которые можно представить в виде упругих шаров, находящихся в непрерывном неупорядоченном движении. Столкновение между молекулами, как и столкновение молекул со стенками, предполагаются упругими.

Основные законы кинетической теории (Бойля–Мариотта, Шарля и Авогадро) могут быть сведены в один, называемый уравнением состояния. Если температура близка к комнатной, то число частиц и давление связаны однозначно:

$$pV = N \cdot k \cdot T, \quad (1.1)$$

где T — абсолютная температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-28}$ Дж/К — постоянная Больцмана, N — общее число молекул, p — давление и V — объем.

Температура — мера скорости хаотического поступательного движения частиц (вращение и внутренние степени свободы не рассматриваются).

Уравнение состояния отражает как раз равенство энергии макроскопического объема газа его тепловой энергии.

При соударении друг с другом или со стенками вакуумной камеры молекулы газа изменяют свои скорости как по величине, так и по направлению. Тем не менее, в состоянии равновесия систему молекул можно описать с вероятностной точки зрения. Математически такое описание определяется заданием функции плотности вероятности распределения молекул по скоростям.

Рассмотрим объем идеального газа, находящийся при температуре T . Функция распределения молекул по скоростям определяется формулой Максвелла:

$$dw_v = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(\frac{-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT} \right) \cdot dv_x dv_y dv_z. \quad (1.2)$$

Здесь dw_v — вероятность того, что молекула газа имеет скорость v с декартовыми компонентами в интервалах от v_x до $v_x + dv_x$, от v_y до $v_y + dv_y$ и от v_z до $v_z + dv_z$ (причем $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$), m — масса молекулы.

Соответственно, концентрация частиц с такими же компонентами скорости будет:

$$dn = n \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(\frac{-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT} \right) \cdot dv_x dv_y dv_z, \quad (1.3)$$

где n — общая концентрация частиц.

Формула (1.2) может быть представлена в виде произведения трех независимых сомножителей, каждый из которых определяет распределение по соответствующей декартовой компоненте скорости. Например, для компоненты x :

$$dw_{v_x} = f(v_x) dv_x = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mv_x^2}{kT} \right) dv_x. \quad (1.4)$$

Предэкспоненциальный множитель в этом выражении выбран таким образом, чтобы выполнялось очевидное условие нормировки:

$$\int_0^{\infty} f(v_x) dv_x = 1. \quad (1.5)$$

Интервалу абсолютных скоростей от v до $v + dv$ в пространстве скоростей v_x, v_y, v_z соответствует сферический слой объемом $4\pi v^2 dv$. Тогда вероятность того, что скорость молекулы лежит в диапазоне от v до $v + dv$

$$dw_v = f(v)dv = 4\pi \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \cdot v^2 dv, \quad (1.6a)$$

и соответствующая концентрация частиц определяется формулой

$$dn = n \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \cdot 4\pi v^2 dv. \quad (1.6б)$$

Формулы (1.6) можно также получить, сделав в (1.2) переход от декартовых координат к сферическим и выполнив интегрирование по углам.

Используя приведенные распределения, можно получить все основные величины, характеризующие состояние газа, и, в частности, наиболее вероятные и средние скорости частиц.

Наиболее вероятная скорость частицы соответствует максимуму функции распределения $f(v)$ и легко находится по стандартной методике исследования функции на экстремумы: $v_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$.

Средняя скорость определяется как первый момент функции распределения Максвелла: $v_{cp} = \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$, а *среднеквадратичная скорость* вычисляется из второго момента этой функции:

$$v_{cp.kв.} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{\pi m}}, \text{ где } \langle v^2 \rangle = \int_0^{\infty} v^2 \cdot f(v) dv.$$

1.2.1. Давление газа

Под давлением газа понимают средний импульс, передаваемый единице площади стенки сосуда молекулами газа в единицу времени. Рассмотрим плоскую стенку сосуда, в который помещен газ. Предположим также,

что молекулы газа не прилипают к стенке, а упруго отражаются. Выберем ось x перпендикулярно стенке сосуда, а оси y и z — произвольно в ортогональной плоскости. Будем считать стенку бесконечно тяжелой по сравнению с массой молекулы m , тогда изменение импульса Δp молекулы, налетающей на стенку со скоростью v_x вдоль оси x (y и z компоненты произвольны), составит

$$\Delta p = 2mv_x. \quad (1.7)$$

Определим число молекул, соударяющихся со стенкой сосуда площадью S в единицу времени. Рассмотрим множество молекул с проекцией скорости v_x . За время t до стенки долетят только молекулы, находящиеся на расстоянии менее $v_x t$, то есть в слое объемом $SV_x t$ (здесь мы предполагаем, что молекулы не сталкиваются друг с другом, т. е. t выбрано настолько малым, что *за это время гарантированно не произошло ни одного столкновения*). Согласно (1.6), концентрация молекул, имеющих скорости от v_x до $v_x + dv_x$, определяется выражением

$$dn = n \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mv_x^2}{2kT} \right) dv_x. \quad (1.8)$$

Таким образом, для числа молекул, сталкивающихся со стенкой площади S за время t , можно написать:

$$N = \int Stv_x dn = Stn \cdot \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}. \quad (1.9)$$

Тогда число молекул, сталкивающихся с единицей поверхности стенки в единицу времени (поток ν молекул на стенку)

$$\nu = n \cdot \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} = \frac{1}{4} n v_{cp}. \quad (1.10)$$

С учетом (1.7) и (1.8) для давления получим

$$p = \int_0^\infty \Delta p v_x dn = mn \cdot \left(\frac{kT}{3m} \right)^{1/2} = \frac{nmv_{cp, кв.}^2}{3}. \quad (1.11)$$

Поскольку $p = nkT$, то $kT = \frac{m\bar{v}_{cp.кв.}^2}{3}$, а

$$\bar{v} = \frac{p}{(2\pi mkT)^{1/2}}. \quad (1.12)$$

Естественная количественная характеристика вакуума — концентрация частиц. В нормальных условиях она определяется числом Авогадро N_A , поделенным на молярный объем:

$$\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{22400 \text{ см}^3} = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}. \quad (1.13)$$

Однако в науке и технике вакуум обычно оценивают с помощью единиц давления. Единица давления в системе СИ — Паскаль (Па): 1 Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м², расположенной перпендикулярно силе.

При низких давлениях удобнее пользоваться внесистемными единицами. Одна из них, широко распространенная в зарубежной литературе, — миллибар — кратна Паскалю:

1 Бар = 10⁶ дин/см² = 100 кПа и 1 мБар = 100 Па = 1 гектоПаскаль.

В отечественной вакуумной технике для измерения давления чаще используется другая внесистемная единица — миллиметр ртутного столба, которая в последнее время обычно обозначается как Торр (в честь Е. Торричелли).

Таблица 1.1

Соотношение между основными единицами давления

	Паскаль (Pa)	Бар (bar)	Техническая атмосфера (at)	Атмосфера (atm)	Торр (mm Hg)
1 Па	≡ 1 Н/м ²	10 ⁻⁵	10,197×10 ⁻⁶	9,8692×10 ⁻⁶	7,5006×10 ⁻³
1 Бар	10 ⁵	≡ 10 ⁶ Дин/см ²	1,0197	0,98692	750,06
1 ат	98 066.5	0,980665	≡ 1 кгс/см ²	0,96784	735,56
1 атм	101 325	1,01325	1,0332	≡ 101 325 Па	760
1 Торр	133,322	1,3332×10 ⁻³	1,3595×10 ⁻³	1,3158×10 ⁻³	≡ 1 мм рт. ст.

Первоначально 1 мм рт. ст. был определен как гидростатическое давление столба ртути высотой 1 мм при условии, что плотность ртути равна $13595,1 \text{ кг/м}^3$ (при $t = 0^\circ \text{ C}$), а земное ускорение соответствует нормальному ($9,80665 \text{ м/с}^2$ на широте 45°). В настоящее время, однако, введено иное определение: принято считать, что стандартное атмосферное давление (101325 Па) точно равно 760 мм рт. ст. , откуда $1 \text{ Торр} = 101325/760 \approx 133,3224 \text{ Па}$, что на $0,000014 \%$ отличается от прежнего определения. Соотношения между различными единицами измерения давления приведены в табл. 1.1.

1.2.2. Сечение взаимодействия и длина свободного пробега

В результате хаотического движения молекулы непрерывно сталкиваются друг с другом, причем этот процесс носит случайный (вероятностный) характер. Для его описания в теории столкновений обычно используется не вероятность (т. е. отношение числа желаемых событий к общему их числу), а *сечение*, которое определяется как отношение числа столкновений, происходящих в единицу времени, к потоку частиц, проходящему через единицу площади поперечного сечения среды в единицу времени. При таком определении сечение имеет размерность площади (в отличие от безразмерной вероятности).

Физический смысл сечения можно пояснить на примере столкновения абсолютно твердых шаров. Будем считать, что влетающие в среду частицы имеют бесконечно малый размер, а молекулы среды представляют собой жесткие шарики диаметром D . При облучении среды равномерным потоком частицы, составляющие поток, должны попасть в один из этих шариков. Частицы, которые «промахнутся», не примут участия в столкновениях. Очевидно, что «прицельная площадь», при попадании в которую частица испытает одно столкновение, определяется поперечным сечением шарика $\sigma = \pi D^2/4$. Учет конечного размера влетающих частиц D_0 увеличивает указанную площадь до $\sigma = \pi(D+D_0)^2/4$, а при $D_0 = D$ получаем соответственно:

$$\sigma = \pi D^2. \quad (1.14)$$

Установим связь этого сечения с вероятностью столкновения. Общее число молекул среды в слое, перпендикулярном к направлению движения

частицы и имеющем площадь S и толщину dx , очевидно, равно $n_0 S \cdot dx$ (здесь n_0 — концентрация молекул). Поскольку вероятность столкновения с каждой из этих молекул определяется сечением σ , общее значение площади «непрозрачного» для частицы участка слоя получается суммированием по всем молекулам: $\sigma n_0 S \cdot dx$. Тогда вероятность dP того, что в данном слое произойдет столкновение, определяется отношением площади этого участка к общей площади слоя S :

$$dP = \frac{\sigma \cdot n_0 \cdot S \cdot dx}{S} = \sigma \cdot n_0 \cdot dx. \quad (1.15)$$

Если столкновения происходят независимо друг от друга, то при увеличении пути l , пройденном частицей в среде, вероятность столкновения $P(l)$ возрастает пропорционально этому пути:

$$P(l) = \int_0^l \sigma \cdot n_0 \cdot dx = \sigma \cdot n_0 \cdot l. \quad (1.16)$$

Отсюда, положив $P(l) = 1$, можно найти длину перемещения молекулы между столкновениями, усредненное значение которой называется *длиной свободного пробега* (стандартное обозначение λ):

$$\lambda = \langle l \rangle = \frac{1}{n_0 \sigma}. \quad (1.17)$$

Если скорость частицы v постоянна, то среднее время свободного пробега

$$\langle t \rangle = \frac{1}{n_0 \sigma v}. \quad (1.18)$$

Воспользовавшись соотношением $p = n_0 kT$, можно представить среднюю длину свободного пробега в виде

$$\lambda = \frac{kT}{\sigma p}, \quad (1.19)$$

т. е. при постоянной температуре средняя длина свободного пробега обратно пропорциональна давлению.

Модель упругих шаров вполне удовлетворительно описывает упругое взаимодействие медленных нейтральных молекул. При взаимодействии

заряженных частиц с молекулами и при больших энергиях взаимодействующих частиц формула (1.14) не справедлива, так как сечение взаимодействия в этом случае зависит не только от поперечного размера сталкивающихся частиц, но и от их относительной скорости v . Для описания взаимодействия произвольных частиц вводят понятие *эффективного сечения* $\sigma(v)$, которое имеет тот же физический смысл, но определяется не геометрическими размерами частиц, а потенциалом их взаимодействия. Такое эффективное сечение либо рассчитывают теоретически, либо измеряют экспериментально, например, определяя ослабление пучка частиц в среде и вычисляя длину свободного пробега или измеряя значение вязкости газов.

Поскольку эффективное сечение также имеет размерность площади, ему можно сопоставить эффективный диаметр рассеивающего центра. В частности, если принять за такой диаметр размер первой боровской орбиты $2a_0 \approx 1 \text{ \AA}$, то для сечения получим $\sigma \approx 3.1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. Величина πa_0^2 определяет характерный порядок атомных сечений и часто используется в качестве внесистемной единицы их измерения.

Например, среднее эффективное сечение столкновений для воздуха составляет $\sigma \approx 62,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. Тогда из (1.19) получаем для длины свободного пробега при комнатной температуре $\lambda [\text{см}] = 4,5 \cdot 10^{-3} / (p [\text{Торр}])$. Отсюда следует, что длина свободного пробега молекул воздуха при атмосферном давлении 760 Торр и температуре 273 К (нормальные условия) составляет $6 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 60 \text{ нм}$.

Если частица может взаимодействовать со средой по нескольким каналам, например, упруго рассеяться или ионизировать атом среды, то говорят об эффективном сечении определенного процесса σ_i , где i — порядковый номер процесса. В случае, если эти процессы независимы, полное сечение, определяющее длину свободного пробега, задается очевидной формулой:

$$\sigma = \sum_i \sigma_i. \quad (1.20)$$

При каждом столкновении вероятность P_i взаимодействия по определенному каналу есть

$$P_i = \frac{\sigma_i}{\sigma}. \quad (1.21)$$

Примеры зависимости сечений ионизации некоторых газов электронным ударом от энергии электронов приведены на рис. 1.1.

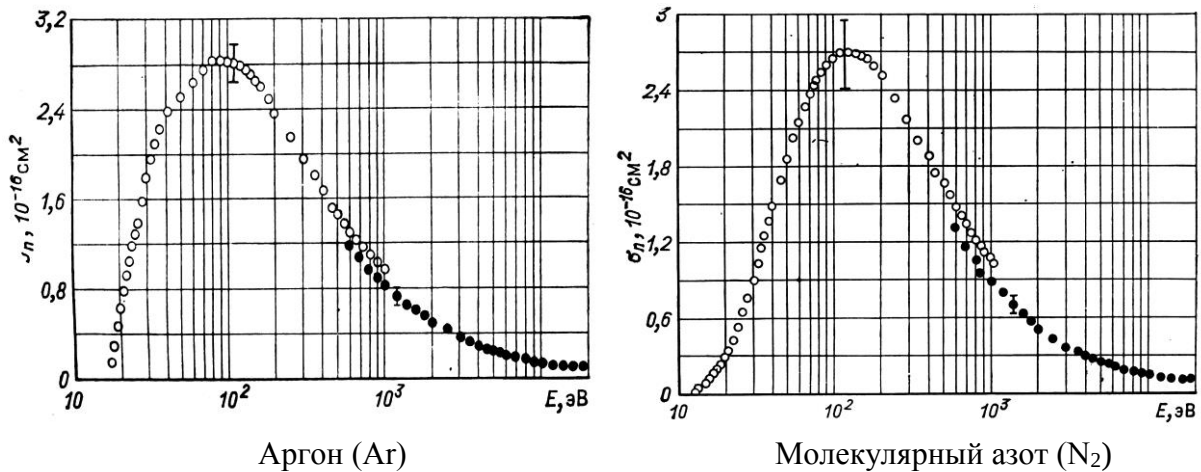


Рис. 1.1. Сечение ионизации аргона и азота электронным ударом

1.2.3. Понятие о степенях вакуума

Теперь, когда мы определили понятия давления и длины свободного пробега, можно ввести количественные характеристики, описывающие вакуум. В физике и технике, как уже отмечалось, вакуумом называют состояние газа, когда его давление ниже атмосферного, и различают четыре основных степени вакуума: низкий, средний, высокий и сверхвысокий. Для количественной оценки вводится *число Кнудсена*:

$$K_n = \frac{\lambda}{L}, \quad (1.22)$$

где L — характерный размер вакуумного объема; λ — средняя длина свободного пробега.

Область давлений, в которой средняя длина свободного пробега молекул много меньше характеристических размеров вакуумного объема, например, диаметра трубопровода, отвечает *низкому вакууму*. Низкий вакуум соответствует $K_n \gg 1$. При этом обмен энергией происходит исключительно между ближайшими молекулами при их столкновениях. На макроскопическом уровне такое взаимодействие проявляется в виде вязкости газа, и соответствующие процессы называют *вязкостными*.

Область давлений, в которой средняя длина свободного пробега молекул примерно равна характеристическим размерам вакуумного объема, получила название *среднего вакуума*. В этом диапазоне давлений столкновения молекул со стенками и друг с другом равновероятны. В области среднего вакуума $K_n \sim 1$.

В области *высокого* вакуума средняя длина свободного пробега молекул много больше размеров вакуумного объема, и молекулы гораздо чаще сталкиваются со стенками сосуда, чем друг с другом. В этом случае каждая молекула движется независимо от остальных, а процессы в газах называются *молекулярными*. В высоком вакууме $K_n \ll 1$.

Приведенная классификация является относительной, поскольку привязана к размерам сосуда. С появлением вакуумной микроэлектроники стало возможным создавать электровакуумные приборы субмикронных размеров, в которых граница высокого вакуума смещена в область более высоких давлений, чем в традиционной вакуумной технике. Например, воздух при атмосферном давлении в порах современных наноматериалов (с характерными для них размерами в несколько нанометров) находится, согласно приведенному определению, в состоянии высокого вакуума.

Еще одна степень вакуума — *сверхвысокий вакуум* — имеет абсолютное определение: в этой области за характерное время рабочего процесса не должно происходить заметного изменения свойств поверхности, связанного с адсорбцией остаточных газов. Оценим в качестве примера время адсорбции одного монослоя кислорода, считая, что его поверхностная концентрация составляет $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, и все попавшие на поверхность молекулы остаются на ней (коэффициент прилипания равен 1). Воспользовавшись формулой (1.12), получим, что при комнатной температуре и остаточном давлении кислорода 10^{-7} Торр это время составляет около 20 секунд. Таким образом, для того чтобы поверхность оставалась атомно-чистой в течение хотя бы одной минуты, необходимо снизить давление, как минимум, до 10^{-8} Торр. Это значение и принято считать границей, разделяющей высокий и сверхвысокий вакуум. На практике современные сверхвысоковакуумные установки обеспечивают давление остаточных газов на 2–3 порядка ниже, что позволяет гарантированно сохранить поверхность чистой во время измерений или технологической обработки.

Области давлений, обычно соответствующие тому или иному вакууму в вакуумных устройствах макроскопических размеров, представлены на рис. 1.2.

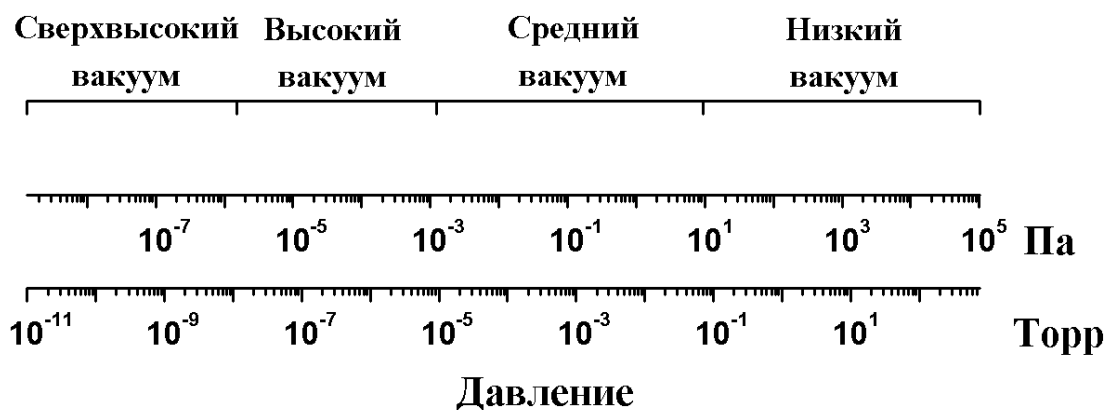


Рис. 1.2. Условное деление областей вакуума

1.2.4. Молекулярный и вязкостный режимы

Как уже отмечалось, режимы течения газа в вакуумной системе различаются в зависимости от соотношения между размерами сосуда и длиной свободного пробега. Если молекулы сталкиваются со стенками чаще, чем друг с другом, это молекулярный режим, в противном случае — вязкостный. Граница между этими режимами определяется геометрическими размерами сосуда и остаточным давлением. Если, например, сосуд имеет линейный размер 10 см, а длина свободного пробега примерно такая же, то, воспользовавшись формулой (1.17) и принимая для сечения столкновений типичное значение $\sigma = 10^{-15} \text{ см}^2$, получаем для концентрации n_0 значение порядка 10^{14} см^{-3} , что соответствует давлению 10^{-2} Торр .

Указанные режимы существенно различаются не только по названию, но и по физическому содержанию процессов переноса. Рассмотрим, например, равновесное состояние двух объемов газа одного сорта, соединенных малым отверстием и поддерживаемых при разной температуре.

Условие равновесия для вязкостного режима — силовое. Макроскопический объем газа в отверстии неподвижен, если силы, действующие на него с разных сторон, равны:

$$p_1 = p_2. \quad (1.23)$$

Для молекулярного режима равновесие означает равенство потоков в обе стороны, т. е. равенство частот пересечения молекулами плоскости отверстия. Согласно формуле (1.10), получаем условие, отличное от (1.23):

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.24)$$

1.3. ФИЗИКА ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ ГАЗОВ И ПАРОВ

1.3.1. Определение потока газа

Процесс откачки состоит в удалении газа из откачиваемого объема. Скорость уменьшения давления в сосуде определяется потоком откачиваемого газа. Если в данный момент в объеме сосуда находится N молекул массой m каждая, то скорость изменения массы M газа в сосуде можно определить как

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d(Nm)}{dt} = \frac{d\left(\frac{mpV}{kT}\right)}{dt} = \frac{m}{kT} \cdot \frac{d(pV)}{dt}, \quad (1.25)$$

так как $pV = NkT$ в предположении, что в процессе откачки ни состав газа, ни его температура не изменяются.

Значения давления и температуры легко измеряются (в отличие, например, от массы газа в объеме), поэтому их и используют для определения потока газа Q :

$$Q = \frac{d(pV)}{dt}. \quad (1.26)$$

Единицы измерения такого потока — Па·м³/с или чаще Торр·л/с. Зная этот поток, при известных m и T можно определить и массовый расход газа, т. е. фактическую скорость удаления его из объема:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{m}{kT} Q. \quad (1.27)$$

1.3.2. Проводимость вакуумного канала

Пусть имеются два герметичных объема, соединенных каналом, через который возможно движение газа. Если температура газа всюду одинакова и постоянна, поток газа между объемами пропорционален разности давлений:

$$Q = C(p_1 - p_2). \quad (1.28)$$

Коэффициент пропорциональности C называют коэффициентом проводимости или просто *проводимостью* канала. Как видно из формулы, проводимость измеряется в м³/с или л/с.

Пусть теперь есть 2 канала с проводимостями C_1 и C_2 . Нетрудно показать, что при параллельном соединении каналов

$$C = C_1 + C_2, \quad (1.29)$$

а при последовательном

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (1.30)$$

В определенном смысле, вакуумная проводимость является аналогом электрической проводимости. Если последовательно соединены несколько участков тракта откачки с существенно разной проводимостью, то суммарная проводимость определяется самым «плохим» участком.

1.3.2.1. Проводимость отверстия

Рассмотрим два сосуда большого объема, соединенных каналом и содержащих один и тот же газ при разных давлениях p_1 и p_2 . Пусть канал представляет собой отверстие площади A в диафрагме — тонкой перегородке между сосудами. Для молекулярного режима поток газа пропорционален разности частот ударов молекул о поверхность диафрагмы с разных сторон:

$$\Delta \nu = \frac{(p_1 - p_2)}{(2\pi m \cdot kT)^{1/2}} \cdot A. \quad (1.31)$$

Соответственно, массовый расход газа будет равен

$$\frac{dM}{dt} = m\Delta v = m \frac{(p_1 - p_2)}{(2\pi m \cdot kT)^{1/2}} \cdot A, \quad (1.32)$$

а поток газа:

$$Q = \frac{kT}{m} \cdot \frac{dM}{dt} = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} (p_1 - p_2) \cdot A. \quad (1.33)$$

Таким образом, проводимость отверстия в диафрагме C_0 равна

$$C_0 = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \cdot A. \quad (1.34)$$

Если подставить численные значения для воздуха при комнатной температуре, получим

$$C_0 [\text{л/с}] = 11,6 \cdot A [\text{см}^2]. \quad (1.35)$$

Можно показать (расчеты не приводим), что в случае вязкостного режима проводимость будет несколько больше:

$$C_0 [\text{л/с}] = 20 \cdot A [\text{см}^2]. \quad (1.36)$$

1.3.2.2. Проводимость длинного канала

Другой практически интересный случай — длинный (в пределе — бесконечно длинный) канал круглого сечения радиусом r , соединяющий два вакуумных объема. При расчете в случае молекулярного режима предполагается, что поверхности стенок для молекул «матовые», т. е. угловое распределение отраженных молекул — косинусоидальное для всех углов падения. Тогда:

$$Q = \frac{4}{3} r^3 \left(\frac{2\pi kT}{m} \right)^{1/2} \frac{dp}{dx}. \quad (1.37)$$

Если для длинного канала положить:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{(p_1 - p_2)}{L}, \quad (1.38)$$

где L — длина канала, то для его проводимости $C_{\text{дк}}$ получим:

$$C_{\partial\kappa} = \left(\frac{4r^3}{3L} \right) \cdot \left(\frac{2\pi kT}{m} \right)^{1/2}. \quad (1.39)$$

Для воздуха при комнатной температуре:

$$C_{\partial\kappa} [\text{л/с}] = 12,1 \frac{d^3}{L} [\text{см}^2], \quad (1.40)$$

где d — диаметр канала. Зависимость от радиуса здесь более резкая, чем в случае отверстия, а проводимость в $\frac{d}{L}$ раз меньше, чем для отверстия в диафрагме такого же диаметра.

Для короткого канала (длина и поперечный размер такого канала сравнимы) формула для проводимости $C_{\kappa\kappa}$ получается комбинацией формул для канала и диафрагмы:

$$C_{\kappa\kappa} = \frac{C_0}{1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{L}{r}}. \quad (1.41)$$

В вязкостном режиме для длинного канала поток газа зависит от давления нелинейно, и, строго говоря, понятие проводимости, введенное как коэффициент пропорциональности между этими величинами, теряет смысл. Формально можно записать:

$$C_{\partial\kappa} [\text{л/с}] = 23,9 \left(\frac{d^4}{L} \right) [\text{см}^3] \cdot p_{cp} [\text{Па}]. \quad (1.42)$$

Типичные значения d превышают 1 см (хотя и ненамного), а среднее давление p_{cp} обычно выше 1 Па (иначе это молекулярный режим). Поэтому проводимость на низком вакууме всегда выше, и трубопроводы, предназначенные для плохого вакуума, отличаются от высоковакуумных меньшим диаметром.

1.3.3. Вакуумный насос и скорость откачки

Вакуумный насос можно рассматривать как своего рода канал «в бесконечность», поскольку для всех типов вакуумных насосов количество удаляемого газа оказывается примерно пропорциональным давлению в широком диапазоне его значений:

$$Q = S_0 \cdot p. \quad (1.43)$$

Коэффициент S_0 называется *скоростью откачки* насоса.

Рассмотрим «идеальный» насос — такой, для которого все вошедшие в его объем молекулы не возвращаются обратно. Скорость его откачки в молекулярном режиме, очевидно, будет равна проводимости отверстия входного фланца насоса площади A :

$$S_0 = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} A. \quad (1.44)$$

При $A = 100 \text{ см}^2$ получается около $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Реальные насосы не идеальны, но порядок величины скорости откачки примерно таков — доли кубометра в секунду.

Если насос присоединяется к объему с давлением p_1 не непосредственно, а через канал с проводимостью C , давление на срезе насоса p_2 отличается от p_1 . Из условия постоянства потока газа во всех элементах откачного тракта (газ в нем не исчезает и не появляется)

$$Q = (p_1 - p_2) \cdot C = p_2 \cdot S_0 = p_1 \cdot S. \quad (1.45)$$

Здесь S — эффективная скорость откачки камеры, т. е. скорость откачки подключенного непосредственно к камере насоса, создающего разрежение столь же эффективно, как и «идеальный» насос со скоростью откачки S_0 , подключенный через канал с проводимостью C :

$$S = \frac{C}{1 + \frac{C}{S_0}} = \frac{S_0}{1 + \frac{S_0}{C}}. \quad (1.46)$$

«Узким местом», в смысле эффективности откачки, может быть как насос, так и вакуумпровод. При $C = S_0$ скорость откачки S уменьшается вдвое по сравнению с идеальным случаем $C = \infty$. Таким образом, самый хороший насос можно загубить неграмотным подключением. Для оценки необходимых параметров вакуумной системы полезно знать, что:

- скорость откачки хорошего насоса — порядка 100–500 л/с;
- проводимость канала диаметром 10 см и длиной 1 м — немногим более 100 л/с, а при диаметре 5 см — уже всего 15 л/с.

Рассмотрим еще одну гипотетическую ситуацию: в откачиваемую камеру поступает постоянный поток газа Q_{ex} . Скорость изменения массы газа, находящегося в откачиваемой камере, равна разности поступающей и удаляемой массы газа в единицу времени. При постоянных температуре и составе газа скорость изменения его количества можно характеризовать величиной (учитывая (1.26))

$$\frac{d(pV)}{dt} = Q_{ex} - Q_{bлx}, \quad (1.47)$$

где $Q_{bлx}$ — выходящий (удаляемый насосом) поток. При эффективной скорости откачки S он равен

$$Q_{bлx} = S \cdot p. \quad (1.48)$$

Зависимость давления от времени будет определяться уравнением:

$$\frac{d(pV)}{dt} = \frac{Vdp}{dt} = Q_{ex} - Sp. \quad (1.49)$$

Его решение:

$$p = \frac{Q_{ex}}{S} - \left(\frac{Q_{ex}}{S} - p_0 \right) \cdot \exp\left(\frac{-St}{V} \right). \quad (1.50)$$

Видим, что давление экспоненциально уменьшается со временем с характерным временем $\frac{V}{S}$. Например, для столитровой камеры скорость приближения давления к стационарному значению в 100 раз ниже, чем для литровой. Это, кстати, дает еще одно объяснение размерности скорости откачки — как объем камеры, для которой данный насос обеспечивает откачку с характерным временем 1 с.

Равновесие откачки и натекания наступит при равенстве входящего и откачиваемого потоков при $t = \infty$. При этом предельно достижимое давление будет равно

$$p_{пред} = \frac{Q_{ex}}{S}. \quad (1.51)$$

Эта формула показывает, в частности, что более низкое давление в вакуумном объеме можно получить двумя способами: снижать поступление

газа или увеличивать скорость его откачки (с учетом проводимости вакуумпровода).

1.3.4. Источники газа в вакуумной системе

1.3.4.1. Течи в вакуумной системе

Абсолютно герметических металлических вакуумных систем с разборными соединениями не существует — всегда есть подтекание атмосферного воздуха через микроскопические дефекты уплотнения этих соединений, которые при конструировании необходимо свести к минимуму. Однако более крупные течи, вызванные, например, механическим повреждением оболочки сосуда, дефектами сварки или разборных соединений, как правило, можно найти и устранить.

1.3.4.2. Мнимые течи

Мнимые течи — это области вакуумного объема, содержащие атмосферный воздух и соединяющиеся с этим объемом через неконтролируемый канал с плохой проводимостью. Типичным примером являются объемы под винтами резьбовых соединений или плохо заваренные пазухи. Вследствие низкой проводимости каналов вдоль резьбы или микротрещин в сварке время откачки воздуха из указанных объемов может оказаться неприемлемо большим. Возникновение мнимых течей, как правило, связано с ошибками в конструировании вакуумного оборудования.

1.3.4.3. Испарение

Над поверхностью любого вещества при любой температуре (отличной от абсолютного нуля) присутствуют пары. В условиях замкнутого объема их количество характеризуется так называемым давлением насыщенных паров при данной температуре. При этом давлении процессы испарения с поверхности и конденсации на ней протекают с равной скоростью и уравнивают друг друга. Для каждого вещества давление насыщенных паров экспоненциально растет с температурой: чем больше температура, тем выше скорость испарения.

Упругостью насыщенных паров обладают не только жидкости, но и твердые тела, так как испарение (сублимация) может происходить и из твердой фазы. Присутствие в вакуумном объеме веществ с высоким значением упругости паров может ограничить возможность получения вакуума.

Например, наличие воды в жидкой фазе не позволит понизить давление при комнатной температуре ниже 17,5 Торр.

Для большинства твердых тел при комнатной температуре упругость паров очень мала и практической роли не играет. Но уже при нескольких сотнях градусов Цельсия для ряда металлов (кадмий, цинк, свинец) она может стать заметной. Например, для кадмия при 400°C упругость паров составляет $\sim 10^{-6}$ Торр. Это ограничивает применимость содержащих кадмий сплавов (например, латуни) в высоковакуумных системах, которые могут подвергаться такому нагреву. Как правило, чем выше требуемый вакуум, тем больше температура и время обезгаживания во время откачки, что, в свою очередь, еще больше сужает круг используемых материалов.

1.3.4.4. Газовыделение с поверхности

Все поверхности твердых тел всегда в какой-то степени покрыты адсорбированным газом. Если внешние условия долго остаются неизменными, устанавливается равновесие, при котором число покидающих поверхность молекул равно числу молекул, сажащихся на нее. После начала откачки идет процесс обезгаживания поверхности всех узлов и деталей вакуумной системы, который является одним из основных источников поступления газа в объем.

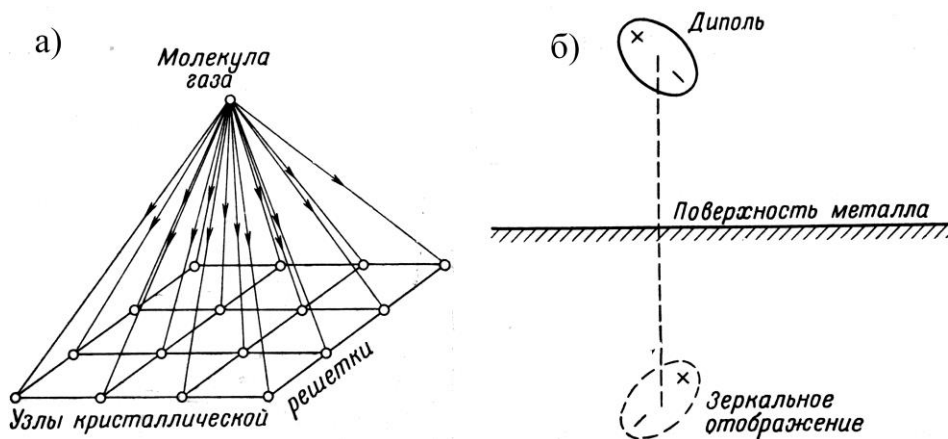


Рис. 1.3. (а) Силы Ван-дер-Ваальса, действующие на молекулу газа, находящуюся над поверхностью твердого тела;
(б) зеркальное отражение полярной молекулы (диполя) в неполярном твердом теле

Связь молекул с поверхностью может быть физической (за счет сил Ван-дер-Ваальса) или химической. В общем случае, силы Ван-дер-Ваальса

проявляются при взаимодействиях между частицами, которые (каждая в отдельности) электрически нейтральны, но взаимно поляризуются по мере сближения, в результате чего возникают силы взаимного притяжения между диполями. В это взаимодействие могут вносить свой вклад и силы электрического взаимодействия полярной или поляризуемой молекулы с поверхностью проводящего тела (рис. 1.3).

Принято считать, что электрические силы притяжения F_{np} молекулы к активному центру поверхности обратно пропорциональны расстоянию между ними в седьмой степени:

$$F_{np} = -a \frac{1}{r^7}. \quad (1.52)$$

Энергии, соответствующие этим силам, не превышают 10 ккал/моль (0,43 эВ/частица).

Взаимное сближение частиц под влиянием сил притяжения продолжается до тех пор, пока эти силы не уравновесятся возрастающими по мере сближения силами отталкивания, обусловленные квантовым обменным

взаимодействием, которое становится существенным, когда расстояние становится соизмеримым с диаметром частицы.

Силы отталкивания $F_{от}$ обратно пропорциональны расстоянию между частицами в степени u , где $u \geq 9$:

$$F_{от} = +b \frac{1}{r^u}. \quad (1.53)$$

На некотором расстоянии z_0 силы притяжения и отталкивания, действующие на молекулу газа, взаимно уравниваются, и молекула адсорбируется в устойчивое состояние, которое соответствует минимуму потен-

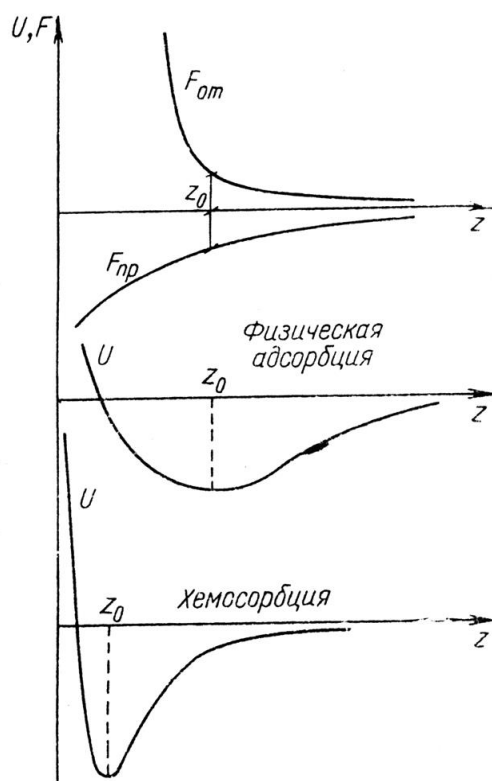


Рис. 1.4. Потенциальные ямы при адсорбции

циальной энергии системы U (рис. 1.4). Зависимость U от координаты можно оценить из очевидного уравнения

$$-\frac{dU}{dz} = F_{np}(z) + F_{om}(z). \quad (1.54)$$

Адсорбция сопровождается выделением энергии (удельной теплоты адсорбции), которая определяется глубиной потенциальной ямы. При нагреве образца молекулы получают добавочную энергию для преодоления потенциального барьера, что резко увеличивает вероятность их десорбции.

Физическую адсорбцию и хемосорбцию не всегда легко различить, но при последней связь адсорбата с поверхностью обычно более прочная. Хемосорбция сопровождается образованием валентных связей молекул или атомов газа с поверхностью. Некоторые из подобных реакций являются эндотермическими, поэтому в случае хемосорбции нагрев может приводить и к росту числа адсорбированных молекул. Условно считают, что при глубине потенциальной ямы менее 3–4 ккал/моль имеет место физическая адсорбция, при энергии связи свыше 8 ккал/моль — хемосорбция (рис. 1.4).

Адсорбированные молекулы могут располагаться мономолекулярным слоем или в несколько слоёв. После того как поверхность покрывается мономолекулярным слоем газа, силы взаимодействия обычно становятся намного слабее (именно слабое взаимодействие между молекулами и делает вещество газом). Поэтому для многих газов при комнатной температуре второй слой адсорбата не удерживается на поверхности. В любой момент времени поверхностная концентрация адсорбированного газа определяется динамическим равновесием между процессами адсорбции из окружающей среды и десорбции молекул с поверхности, т. е. зависит от давления, температуры, материала и сорта газа.

Если считать, что вся поверхность камеры покрыта одним монослоем газа, можно провести следующие оценки:

- концентрация молекул на поверхности — порядка 10^{15} см^{-2} ;
- если камера — литровый куб, то всего на стенках в монослой будет около $6 \cdot 10^{17}$ молекул;

—если все их перевести в объем, получим концентрацию $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что соответствует давлению около 0,1 Торр, т. е. низкому вакууму.

Таким образом, даже идеальная поверхность, покрытая монослоем адсорбата, представляет собою очень «вместительный» источник газа. Реально же поверхности деталей, не подвергнутых специальной обработке, бывают покрыты пористыми пленками окислов и загрязнений, и типичное количество «запасаемого» ими газа соответствует примерно 100 монослоям. При комнатной температуре через 1 час после начала откачки удельный поток газа с 1 м^2 поверхности q_0 составляет по порядку величины $10^{-4} \text{ Па м}^3/\text{с}$. Это значит, что при отключении насосов всего на 100 секунд давление в типичной камере с объемом $0,1 \text{ м}^3$ и площадью стенок 1 м^2 превысит 0,1 Па (или 10^{-3} Торр), что соответствует не очень хорошему предварительному разрежению. В дальнейшем скорость газовыделения с поверхности падает со временем, но достаточно медленно, приблизительно в соответствии с формулой

$$q = \frac{q_0}{t^n}, \quad (1.55)$$

где время t выражено в безразмерных единицах, а показатель степени n обычно близок к 1.

Чтобы ускорить обезгаживание вакуумного прибора (за счет увеличения интенсивности газовыделения), его прогревают в процессе откачки. Очевидно, что существенного эффекта можно ожидать при достижении температуры, которая, будучи выражена в энергетических единицах, окажется сопоставимой с теплотой адсорбции. Стандартными температурами прогрева собранного прибора при непрерывной откачке считают 450–600° С, а полное время обезгаживания может достигать нескольких суток. После такой обработки физически адсорбированного газа на поверхностях не остается, и скорость газовыделения с них снижается на 4–6 порядков. В лабораторной практике использование столь высоких температур часто оказывается невозможным из-за наличия в составе откачиваемых приборов деталей из нежаропрочных (например, полимерных) материалов. В этом случае полезным можно считать прогрев до той максимальной температуры, которая еще не приводит к повреждению наименее термически устойчивых элементов прибора.

1.3.4.5. Растворение газа в объеме

Помимо большого количества газа на поверхности, некоторое его количество растворено и в объеме материала. Растворимость газа определяется его видом. Скажем, азот обладает существенной растворимостью лишь в некоторых металлах — тех, которые могут образовывать нитриды (цинк, тантал, железо, молибден, марганец). Кислород же растворяется во всех металлах, кроме благородных. Диффузия растворенного газа приводит к его постепенному выходу в вакуум, т. е. к увеличению внутреннего газовыделения. Обезгаживание объема является еще более длительным процессом, чем обезгаживание поверхности, хотя также может быть ускорено повышением температуры. Однако поскольку процесс растворения газа в объеме довольно медленный, хорошие результаты дает предварительная прокалка деталей в вакууме или атмосфере слабогазостойкого или, наоборот, быстрооткачиваемого газа (того же водорода), причем даже при достаточно длительном периоде между прокаливанием и началом откачки (несколько дней). То же можно сказать и об обезгаживании собранного прибора — после кратковременного вскрытия откачка идет быстрее, чем после длительного пребывания вскрытой вакуумной камеры на атмосфере.

1.3.4.6. Газопроницаемость стенок

В ряде случаев коэффициент диффузии газа в материале аномально высок и запасы газа в объеме непрерывно пополняются снаружи. При комнатной температуре существенной газопроницаемостью обладают лишь тугоплавкие стекла по отношению к гелию (водород в стекле захватывается химически, а остальные молекулы слишком крупны). Но при повышении температуры коэффициенты диффузии газов в материалах растут, и появляется еще несколько практически интересных случаев. Например, нагретый палладий селективно пропускает водород (на 2 порядка лучше, чем другие металлы), что позволяет использовать его в качестве фильтра. Даже из обычной атмосферы в вакуумный прибор через нагретую палладиевую трубку будет поступать чистый водород. Аналогично, нагретая тонкостенная серебряная трубка может использоваться для напуска в камеру молекулярно чистого кислорода.

1.4. МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

При создании вакуумного оборудования часть требований к используемым материалам определяется конкретной решаемой задачей и не имеет отношения к условиям получения вакуума — например, электрическая проводимость или, напротив, диэлектрические свойства деталей, прозрачность их для различных излучений, магнитная проницаемость и т. д. Однако поскольку предельно достижимый в данной системе вакуум определяется скоростью поступления газа, возможность обеспечения достаточно малого натекания иногда является основным критерием при выборе конструкционных материалов для создания высоковакуумных систем. Это означает не только ограничение по газопроницаемости и величине упругости паров материала при температуре эксплуатации. Обычно в процессе обезгаживания системы необходим ее прогрев до достаточно высоких температур, и используемые материалы должны выдерживать такой прогрев без ухудшения (по крайней мере, необратимого) характеристик. Кроме того, при подборе материалов часто приходится принимать во внимание величины коэффициента теплового расширения (КТР) непосредственно контактирующих частей вакуумной системы. Изделия должны обладать достаточной прочностью и выдерживать атмосферное давление, в том числе и при повышенной температуре. Наконец, немаловажными характеристиками материала являются его стоимость и удобство обработки.

1.4.1. Металлы

Еще относительно недавно большинство вакуумных приборов и откачных систем изготавливались из стекла, но в настоящее время на смену стеклу пришли различные металлы. Упругость паров практически всех металлов, кроме калия, натрия и кадмия, достаточно низка. Цинк, свинец и олово не следует применять в прогреваемых системах. На необработанной (точнее, получаемой при стандартной механической обработке) поверхности присутствует достаточно толстый и развитый слой окислов, которые определяют большое количество адсорбированного газа (в основном, связанной с поверхностью воды) и высокое начальное газовыделение. Поэтому для получения высоких уровней вакуума желательна предварительная обработка поверхности — от пескоструйной до электрохимической полировки. Кроме того, для минимизации газовыделения, как уже отмечалось,

могут применяться предварительный отжиг во внешней печи или поверхностное распыление тлеющим разрядом непосредственно в камере.

В зависимости от конкретной решаемой задачи, используют различные металлы. Основным материалом для изготовления вакуумных оболочек, корпусов, вентилях и т. д. — *нержавеющая сталь* Х18Н10Т. От обычных сталей ее отличает высокая коррозионная стойкость, неферромагнитность, а также более низкий коэффициент диффузии водорода. Нержавеющая сталь хорошо сваривается (в аргоне) и паяется серебром, медью, оловом. Другие стали используют обычно лишь в качестве материала магнитопроводов и для иных специальных целей.

Медь (а используется в основном бескислородная медь) дороже, хуже обрабатывается и достаточно легко окисляется, причем ее окислы легко отслаиваются от поверхности. Тем не менее, медь используют для сменных прокладок в разъемных соединениях (используется легкая деформируемость термически отожженной меди) и там, где важна электрическая проводимость: для изготовления токоподводов, волноведущих структур, электромагнитных резонаторов, а также при пайке.

В высокочастотных резонаторах и при пайке используется также *серебро*, а для высоковакуумных прокладок и сеток ламп — *золото*.

Алюминий и сплавы на его основе почти не применяются в высоковакуумных системах из-за низкой температуры плавления.

Некоторые сплавы используются для согласования значения КТР со стеклами и керамиками. Таков, например, *ковар* — сплав железа, кобальта и никеля, согласованный по КТР с «молибденовыми» стеклами.

Если детали должны работать при очень высоких температурах, их изготавливают из иных материалов.

Вольфрам — наиболее высокотемпературный металл (температура плавления равна 3450° С), поэтому его используют для изготовления нитей накаливания. Он незаменим в этом качестве, хотя дорог, плохо обрабатывается и сваривается. Для тоководов и корпусов катодов электровакуумных приборов (ЭВП) используют *молибден* (2620° С), хотя он тоже плохо сваривается. Более дорогие *тантал* (2996° С) и *ниобий* (2469° С) хорошо свариваются и химически стойки, и корпуса катодов из них хороши, но у них втрое более низкая проводимость, и на тоководы они не годятся.

Никель (1455°C) применяют для изготовления деталей и узлов, работающих при более низких температурах. Он хорошо сваривается, пластичен и дешев, но при температуре ниже 350°C ферромагнитен. Кроме того, в контакте с вольфрамом никель образует легкоплавкую эвтектику.

Для специальных применений, предъявляющих особые требования к материалу, используются и другие металлы, например, палладий, платина, титан, сплавы бериллия и др.

1.4.2. Стекла

Из диэлектрических материалов наиболее употребляемо стекло. Преимущества стекла: дешевизна, легкость обработки, химическая пассивность, малое газовыделение даже с неподготовленной поверхности, низкая электропроводность, прозрачность. Недостатки: хрупкость и сложность точного соблюдения размеров, а также сложность изготовления разборных систем.

Стеклом можно назвать любое аморфное соединение, но на практике используют в основном стекла на основе *окиси кремния* SiO_2 , обычно с добавками окислов металлов: калия, натрия, бора, алюминия, свинца и др.

Такие смеси можно трактовать как соли кремниевой кислоты — силикаты: например Na_2SiO_3 . Чистая окись кремния образует так называемый плавленый кварц, решетка которого представляет собой совокупность тетраэдрических групп SiO_2 , связанных через атомы кислорода. По сравнению с решеткой кристаллического кварца, решетка плавленного кварца менее упорядочена (у кристалла ячейка в проекции шестиугольная, здесь же число атомов в ячейке непостоянно). Добавление атомов металлов заполняет ячейки этой решетки (см. рис. 1.5).

Многообразие видов стекол вызвано тем, что каждый из них оптимизирован для определенного применения. Стекла подразделяют на тугоплавкие (*твердые*) на основе окисей бора и алюминия (помимо SiO_2) и легкоплавкие (*мягкие*), получаемые добавлением оксидов натрия и свинца. Для первых температура размягчения (определяемая по моменту, когда стеклянная нить деформируется под своим весом) составляет $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$, для вторых — $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$, тогда как для кварцевого стекла — больше 1500°C . Для вакуумной техники чистый, немодифицированный кварц по ряду причин не оптимален. Во-первых, сквозь него достаточно легко диф-

фундирует гелий: давление в кварцевом сосуде с линейным размером несколько сантиметров и толщиной стенки ~ 1 мм в отсутствие откачки возрастает до 10^{-7} Торр всего за несколько минут; если при изготовлении сосуда использовалось твердое стекло, такое давление установится через несколько суток; для мягкого стекла этот процесс займет годы. Легкая диффузия гелия через кварц обусловлена большим размером ячеек его кремний-кислородной сетки, которые для более мягких стекол заполняются атомами металла. Во-вторых, кварц сложно обрабатывать из-за высокой температуры плавления. В результате, кварцевое стекло используют лишь в устройствах, работающих при высоких температурах, либо в тех случаях, когда требуется прозрачность в УФ области.

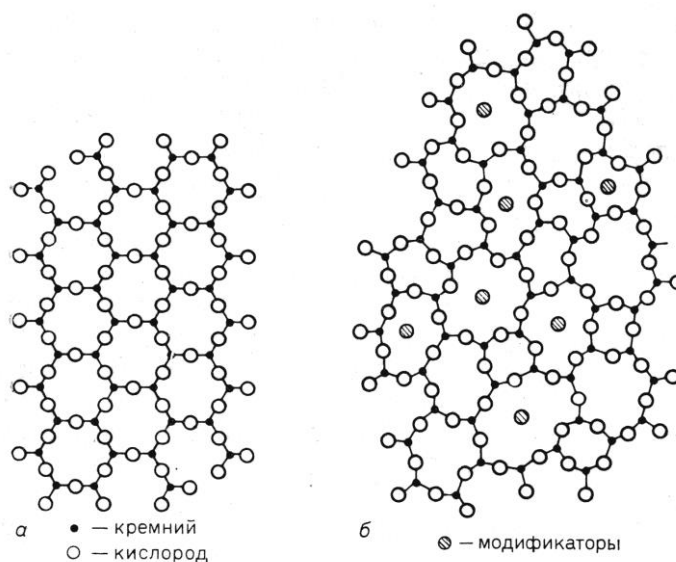


Рис. 1.5. Схематическое изображение структуры кристаллического кварца (а) и стекла (б)

Есть недостатки и у мягких стекол. Во-первых, их нельзя нагревать выше 350°C из-за размягчения. Во-вторых, даже при меньших температурах возникает опасность растрескивания стекла, особенно при неоднородном нагреве или при сварке с другими материалами, из-за больших значений коэффициента теплового расширения таких стекол ($\sim 70\text{--}120 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; у тяжелых стекол, например, КТР вдвое ниже, а у кварца равен $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$). Кроме того, при остывании стекла после изготовления деталей прибора температурные напряжения могут замораживаться и привести впослед-

ствии к самопроизвольному разрушению этих деталей. Для того чтобы устранить указанную опасность, требуется длительный отжиг при тщательно контролируемом снижении температуры. По этим причинам *натриевые* и другие мягкие стекла используют лишь в серийном производстве, когда можно гарантировать строгое соблюдение технологических процессов.

В лабораторной практике применяют в основном твердые стекла, согласованные по КТР с молибденом и коваром. Эффект остаточных механических напряжений остается, что составляет серьезную проблему при штучном ручном производстве, особенно, если необходимы высокие значения градиентов температуры (например, погружение части прибора в жидкий азот). При необходимости применения окон или трубок из плавленого кварца их сопрягают со стеклянной деталью через переход, состоящий из 4–5 стекол с возрастающим значением КТР.

1.4.3. Керамики

Керамики — это неметаллические камнеподобные материалы, получаемые спеканием массы заданного состава и состоящие из аморфной (стекловидной) и кристаллической фаз. Для изготовления керамик обычно также используют оксиды и силикаты, но более тугоплавкие, чем те, из которых изготавливают стекло. Как и стекло, керамика химически стабильна и имеет низкое давление паров. Но по сравнению со стеклом керамика имеет ряд преимуществ, в основном определяемых ее тугоплавкостью: лучшую стабильность параметров в широком диапазоне температур, возможность изготавливать детали в точном соответствии с заданными размерами. У керамики лучшие диэлектрические свойства, меньшее газовыделение, и, наконец, она существенно более прочна. Прочность позволяет соединять ее с металлами, несмотря на разницу КТР.

Свойства керамики определяются не только химическим составом, но и физической структурой. Например, доля стекловидной фазы может изменяться в широких пределах — до 70 % в фарфоре. В стеклокерамике, получаемой не спеканием порошка, а кристаллизацией стекла в специально создаваемых условиях (присадки, центрифугирование), меньше пор. Степень пористости определяет и вакуумные свойства. Для использования в качестве части вакуумной оболочки, естественно, лучше подходит менее

пористая керамика, а при использовании внутри вакуумной камеры пористая керамика предпочтительнее, поскольку быстрее обезгаживается.

По химическому составу выделяют *силикатные, оксидные и специальные керамики*.

Силикатные керамики изготавливаются из природных материалов, поэтому они дешевы, но имеют много примесей. Типичный пример — керамика из смеси 70 % талька ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и 30 % каолина ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с присадками окислов щелочных и щелочноземельных металлов. Кристаллизация, происходящая при спекании, дает в результате кристаллиты MgSiO_3 , связанные стекловидной фазой с высоким содержанием окислов щелочных металлов. К этому же классу относится циркон-силикатная керамика ($\text{ZrO}_2\text{—SiO}_2$), ценимая за малую величину КТР (как у молибдена).

Оксидная керамика получается из компонентов, полученных химически, и поэтому она лучше, но дороже. Однако сейчас цены падают, и она постепенно вытесняет силикатную. Типичный представитель — алюмооксидные керамики, содержащие от 85 до 100 % оксида алюминия. С увеличением его содержания прочность и диэлектрические свойства такой керамики улучшаются, повышается температура спекания (до $\sim 1850^\circ\text{C}$), но растет и стоимость. В зависимости от назначения изделий такая керамика также может изготавливаться с различной пористостью. Вакуумплотная керамика обладает минимальной закрытой пористостью и практически нулевым водопоглощением, способна обеспечить поддержание сверхвысокого вакуума и сохранение вакуумной плотности при нагреве до 500°C .

Применяют также керамику на основе ZrO_2 и BeO . Бериллиевая керамика хороша высокой теплопроводностью, но токсична.

1.4.4. Синтетические материалы

Синтетические материалы — это резина, полимеры, эластомеры, смолы, лаки и т. д. Традиционно *вакуумная резина* широко применяется в условиях низкого вакуума как для уплотнения, так и в качестве материала для вакуумпроводов (вакуумные шланги). Высокая эластичность и способность восстановления формы после снятия нагрузки позволяют получать надежное вакуумирование. Недостатки — относительно высокая газопроницаемость для водорода, гелия и азота и малая термостойкость, что ис-

ключает возможность использования резины в высоковакуумных участках установки.

Витон — материал, с виду похожий на очень жесткую черную резину специфического серо-фиолетового оттенка. Это эластомер на основе фторонасыщенных углеводородов, выдерживающий прогрев до 200° С. Используется, как правило, для изготовления кольцевых прокладок.

Тефлон (политетрафторэтилен, ПТФЭ, фторопласт-4) — тяжелый (плотность 2,2 г/см³) белый пластик с низким коэффициентом трения, использующийся благодаря этому в подшипниках трения, системах передачи вращения и т. д. Температура плавления тефлона весьма высока (~327° С), но он разлагается с выделением фтора. Другой недостаток — очень высокая проницаемость для гелия. Тефлон часто используется для изготовления прокладок на не слишком хороший вакуум, так как обладает холодной текучестью. С одной стороны, это может компенсировать дефекты соединяемых фланцев, а с другой — приходится все время эти фланцы подтягивать во избежание появления течей.

Существуют и другие синтетические материалы, специально разработанные для вакуумной техники. Такие материалы не выделяют органических веществ (не пахнут). Общие правила использования синтетических материалов таковы: на невысоком вакууме (до 10⁻⁷ Торр) при высокой скорости откачки в небольших количествах можно использовать практически все материалы (в том числе оргстекло, капрон, полиэтилен, клеи, герметики, лаки и т. д.). Меньшей скорости газовыделения можно добиться от тех материалов, которые удастся прогреть до более высоких температур, то есть более термостойких. При намерении достичь сверхвысокого вакуума, при низкой скорости откачки и тем более в отпаянных системах без автономной откачки от синтетических материалов лучше отказаться.

1.5. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА

Вакуумный насос — элемент вакуумной системы, непосредственно осуществляющий удаление газа из откачиваемого объема. Основные характеристики насоса — скорость откачки и ряд характерных значений давлений, определения которых удобно иллюстрировать с использованием зависимости скорости откачки от давления на входе насоса (рис. 1.6).

– *Предельное давление насоса $P_{пр}$* (левый ноль графика) — минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объема («на себя»); быстрота действия насоса при приближении к предельному давлению должна стремиться к нулю.

– *Наименьшее рабочее давление P_m* (левый край плато) — минимальное давление, при котором насос длительное время обеспечивает номинальное значение скорости откачки. Это давление, как правило, на порядок превышает $P_{пр}$.

– *Наибольшее рабочее давление $P_б$* (правый край плато) — максимальное давление, при котором насос длительное время обеспечивает номинальное значение скорости откачки. Рабочие диапазоны давлений вакуумных насосов (от наименьшего до наибольшего), в основном, определяются их принципом действия.

– *Давление запуска насоса P_z* (правый ноль) — максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу. Давление запуска может на 2–3 порядка превышать наибольшее рабочее давление.

Работа насоса вне плато зависимости $S(p)$ обычно возможна, но экономически неэффективна.

Если насос не связывает откачиваемый газ внутри себя, а выбрасывает его наружу, то, помимо входного, у таких насосов есть и выходное сечение. В этом случае еще одним параметром является предельное выпускное давление (противодавление).

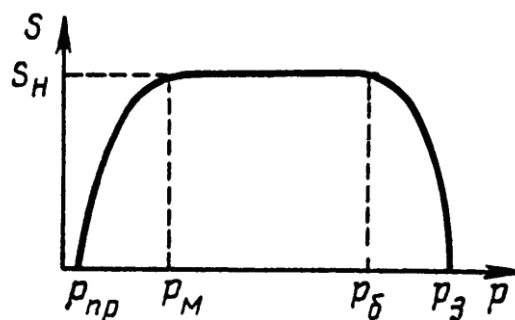


Рис. 1.6. Зависимости скорости откачки от давления на входе насоса

1.5.1. Классификация вакуумных насосов

Как правило, прежде всего классификация насосов исходит из того, на достижение какого вакуума эти насосы рассчитаны: низкого и среднего (насосы предварительного разрежения или форвакуумные насосы) или высокого и сверхвысокого вакуума (высоковакуумные насосы). Вместе с тем, любая классификация насосов достаточно условна, она различна у различ-

ных авторов. Однако названия конкретных типов насосов, как правило, устоялись и являются общепринятыми.

В частности, по принципу действия вакуумные насосы можно разделить на три большие группы: механические, поверхностного действия и ионные, внутри каждой из которых насосы также могут разделяться на различные конкретные типы (рис. 1.7).

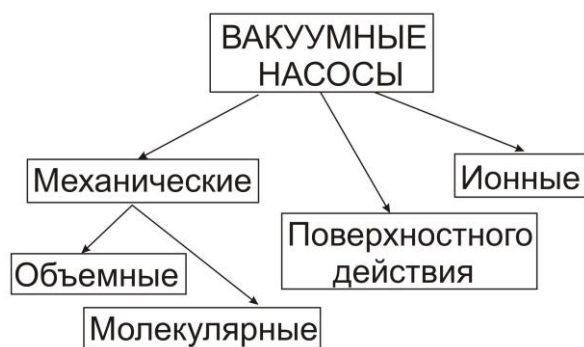


Рис. 1.7. Классификация вакуумных насосов

Начнем рассмотрение с механических насосов, которые, в свою очередь, подразделяются на насосы *объемные*, где откачка происходит за счет изменения величины занимаемого газом объема, и *молекулярные*, основанные на передаче импульса молекулам газа движущимися частями насоса.

1.5.2. Механические насосы объемного действия

Объемные насосы действуют по принципу увеличения объема заданного количества газа, вследствие чего, согласно закону Бойля–Мариотта, давление этого газа понижается:

$$p \downarrow = \frac{Q}{V \uparrow}. \quad (1.56)$$

В случае объемной откачки над газом последовательно выполняются следующие операции:

1. Впуск газа при расширении рабочей камеры.
2. Уменьшение объема камеры и сжатие находящегося в ней газа.
3. Удаление газа из камеры в атмосферу или на вход насоса следующей ступени.

1.5.2.1. Поршневые насосы

Простейший пример объемного вакуумного насоса — это *поршневой насос* (рис. 1.8), в котором откачка осуществляется за счет периодического изменения объема цилиндра. Первый такой насос был изобретен и создан еще в XVII веке бургомистром Магдебурга Отто фон Герике (вспомним

знаменитые «Магдебургские полушария») и после многочисленных усовершенствований сохранился до нашего времени.

Этот насос обычно начинает работать от атмосферного давления. Скорость его откачки вычисляется как произведение объема рабочей камеры на частоту. Для современных насосов это 10–4000 л/с. Цилиндры могут быть простого и двойного действия (рабочие камеры с двух сторон от поршня). Скорость движения поршня обычно не превышает 1 м/с.

Предельно достижимое давление насоса определяется натеканием газа через уплотнения, а также из «мертвого объема», остающегося над поршнем при максимальном сжатии, и составляет 1–10 Торр для одноступенчатого и 0,1 Торр для двухступенчатого насоса. Для улучшения предельного вакуума может применяться перепускание газа из мертвого пространства в конце хода поршня во вторую полость цилиндра, в которой заканчивается процесс всасывания. Недостатками подобной системы являются сильная зависимость скорости откачки от давления, недостаточная механическая уравновешенность и большие потери на трение. Это ограничивает рабочую частоту насоса и определяет его высокую удельную массу (10–20 кг/(л/с)) и значительное энергопотребление.

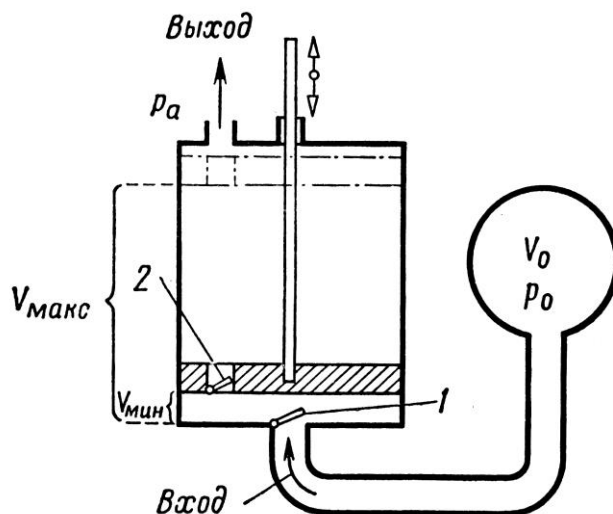


Рис. 1.8. Объемный (поршневой) насос:

1, 2 — автоматические клапаны;
 V_{max} — максимальный объем цилиндра;
 V_{min} — вредный объем;
 V_0 — откачиваемый объем;
 P_0 — начальное давление;
 P_a — давление на выходе

ного вакуума может применяться перепускание газа из мертвого пространства в конце хода поршня во вторую полость цилиндра, в которой заканчивается процесс всасывания. Недостатками подобной системы являются сильная зависимость скорости откачки от давления, недостаточная механическая уравновешенность и большие потери на трение. Это ограничивает рабочую частоту насоса и определяет его высокую удельную массу (10–20 кг/(л/с)) и значительное энергопотребление.

1.5.2.2. Форвакуумные насосы с масляным уплотнением

В настоящее время механические объемные насосы с масляным уплотнением остаются неизменным элементом большинства вакуумных систем. С их помощью создается предварительное разрежение в вакуумной системе и форвакуумное давление на выходе высоковакуумных насосов. Наибольшее распространение получили три типа механических объемных

насосов с масляным уплотнением: *пластинчато-статорные, пластинчато-роторные и плунжерные насосы.*

Пластинчато-статорные насосы — это, как правило, насосы малой производительности, пластинчато-роторные — средней, а плунжерные — средней и большой производительности.

1.5.2.3. Пластинчато-статорный насос

На рис. 1.9 схематично изображен пластинчато-статорный вращательный вакуумный насос.

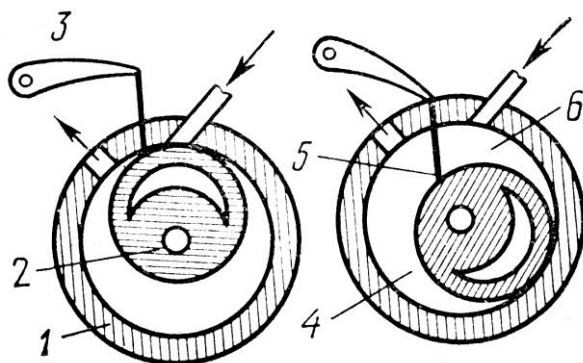


Рис. 1.9. Пластинчато-статорный насос:
1 — корпус; 2 — ротор; 3 — рычажно-пружинное устройство; 4 — камера сжатия; 5 — пластина; 6 — камера всасывания

В неподвижном корпусе 1 на валу эксцентрично расположен ротор 2. Полезный объем рабочей камеры насоса, ограниченный внутренней поверхностью корпуса статора 1 и наружной поверхностью ротора 2, разделяется пластиной 5 на полость всасывания 6 и полость сжатия 4. Пластина 5, расположенная в прорези корпуса насоса, с помощью пружины через рычаг 3 плотно прижимается к ротору 2. При вращении ротора 2 в направлении, указанном стрелкой, газ из откачиваемого сосуда через впускной клапан заполняет увеличивающуюся в объеме полость 6. В это время газ в полости 4 сжимается. Когда давление газа на выходной клапан превысит величину атмосферного давления, клапан откроется, и газ из полости 4 будет вытеснен в атмосферу. При дальнейшем вращении ротор 2, пройдя пластину 5 и выход впускного канала, отделяет в рабочей камере насоса следующую порцию газа от откачиваемого объема.

Такой насос работает в масляной ванне. Масло служит для герметизации соединений, а также снижения трения и охлаждения.

1.5.2.4. Пластинчато-роторный насос

На рис. 1.10 схематично изображен пластинчато-роторный насос. В цилиндрической рабочей камере корпуса 1 симметрично на валу (не пока-

зан на рисунке) расположен ротор 2, ось которого O' смещена относительно оси рабочей камеры O'' . В сквозной прорези ротора размещены пластины 3' и 3''. Пружиной 4 они прижимаются к корпусу насоса. В положении ротора, изображенном на рис. 1.10, а, пластинами 3' и 3'' и плоскостью касания ротора со статором полезный объем рабочей камеры разделен на три полости: I — полость всасывания; II — полость перемещения и частичного сжатия газа; III — полость вытеснения газа. При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, полость I увеличивается, и дополнительное количество газа из откачиваемого сосуда по впускному каналу 5 поступает в рабочую камеру насоса.

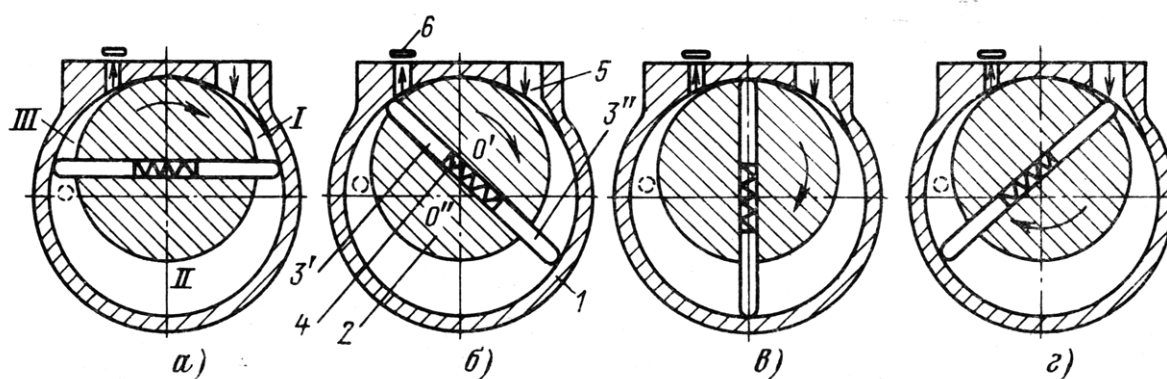


Рис. 1.10. Пластинчато-роторный вакуумный насос в различных фазах откачного цикла

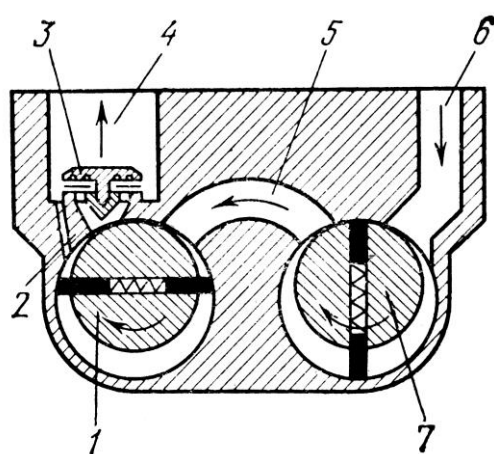


Рис. 1.11. Схематическое устройство двухступенчатого пластинчато-роторного насоса: 1, 7 — роторы; 2 — дроссельное отверстие; 3 — клапан; 4 — выпускной патрубок; 5 — соединительный канал; 6 — входной патрубок

Полость II уменьшается в объеме, в ней происходит сжатие газа. Полость III уменьшается, и газ из нее через выпускной канал под клапаном 6 вытесняется из насоса. При положении ротора, изображенном на рис. 1.10, б, заканчивается вытеснение газа из полости III. Предельный вакуум определяется «мертвым объемом» — пространством между пластиной 3 и корпусом насоса 1, возникающим после прохождения

ротором выходного клапана 6 (момент, предшествующий положению на рис. 1.10, в). Поэтому могут применяться двухступенчатые схемы, содержащие дополнительный канал отвода газа из «мертвого объема» через клапан 3 в выпускной патрубок 4 (рис. 1.11).

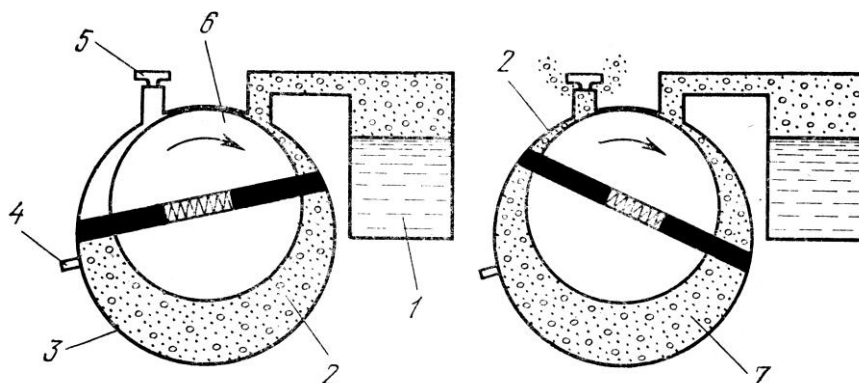


Рис. 1.12. Схема работы газобалластного пластинчато-роторного насоса:
1 — откачиваемый объем; 2 — камера; 3 — насос; 4 — газобалластное устройство; 5 — выхлопной клапан; 6 — ротор, 7 — камера сжатия

Отдельную проблему представляет откачка газа, содержащего значительную примесь паров, например, воды. При высокой степени сжатия пары конденсируются и смешиваются с маслом. Чтобы этого не происходило, после того, как камера с откачиваемым газом и парами оказывается изолированной от входного патрубка, в нее впускается сухой газ через дроссельное отверстие (рис. 1.12). На рис. 1.13 приведен пример внешнего вида пластинчато-роторного насоса.



Рис. 1.13. Внешний вид отечественного пластинчато-роторного насоса 2НВР-5дм (а) (скорость откачки — 5,5 л/сек, предельное давление — $5 \cdot 10^{-3}$ Торр) и пластинчато-роторного насоса компании Edwards E2M18 (б) (скорость откачки — 20,5 л/сек, предельное давление — $7,5 \cdot 10^{-4}$ Торр)

В этом случае выпускной клапан открывается раньше, при меньшей степени сжатия, и конденсации паров не происходит. Предельный вакуум, однако, при этом несколько ухудшается. Насос с таким приспособлением называется газобалластным. Газобалластное устройство присутствует практически во всех современных форвакуумных насосах.

Схему с двумя пластинами используют в насосах сравнительно малой производительности (~ 1 л/с). Насосы с быстротой откачки до 1000 л/с (при $P_{\text{пр}} \sim 10$ Торр) выполняются по другой схеме (рис. 1.14) с большим числом пластин.

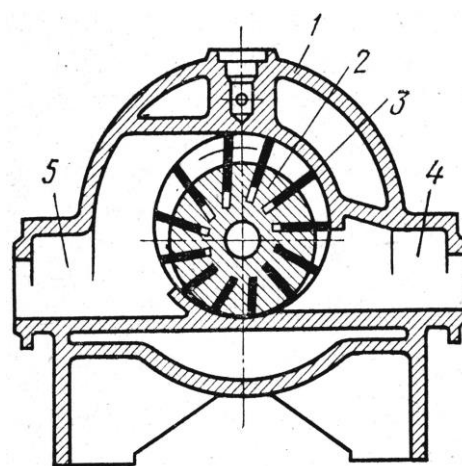


Рис. 1.14. Многопластинчатый насос: 1 — корпус; 2 — ротор; 3 — подвижные пластины; 4 — выпускной патрубок; 5 — входной патрубок

В этих насосах нет масляной ванны, а для уменьшения потерь на трение используются беговые кольца, которые приводятся во вращение пластинами. Отверстия в беговых кольцах обеспечивают прохождение откачиваемого газа. В некоторых конструкциях, имеющих пластины из антифрикционных материалов, можно обойтись без беговых колец.

1.5.2.5. Плунжерные (золотниковые) насосы

Сечение механического плунжерного насоса схематически изображено на рис. 1.15. По принципу действия такой насос во многом аналогичен пластинчато-статорному. Основное его отличие состоит в иной конструкции устройства, разделяющего пространство над эксцентричным ротором 2 на две отдельные полости: полость всасывания, связанную со входом насоса, и полость сжатия, открывающуюся на выпускной клапан. В насосе данного типа эту роль выполняет плунжер 1, состоящий из цилиндрической части, охватывающей ротор, и полой прямоугольной части 1, свободно перемещающейся в пазу шарнира (золотника) 7. Введение плунжерного узла вместо подпружиненной пластины (как в пластинчато-статорном насосе) означает усложнение и удорожание конструкции, что компенсиру-

ется улучшением эксплуатационных характеристик насоса — увеличением надежности, снижением предельного давления и уровня шума.

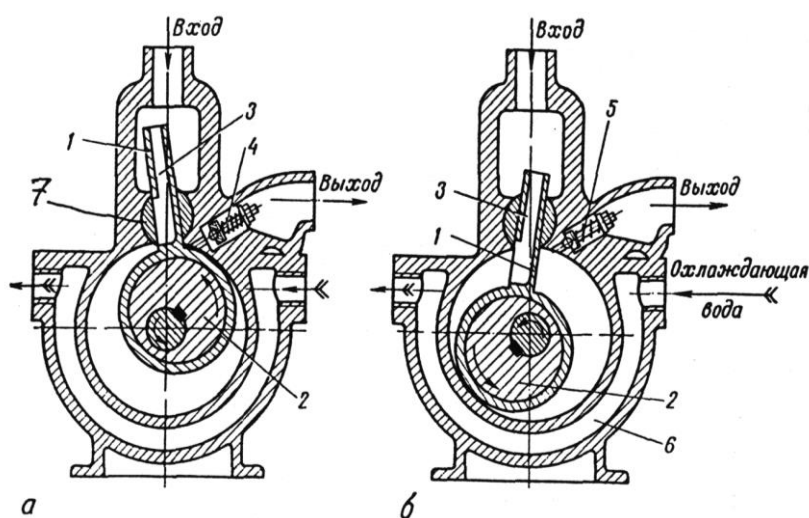


Рис. 1.15. Плунжерный вакуумный насос.
(а) — завершение периода удаления и начало периода наполнения; (б) — промежуточное положение: 1 — плунжер; 2 — ротор; 3 — канал в золотнике; 4 — выходной обратный клапан открыт; 5 — выходной обратный клапан закрыт; 6 — вода, охлаждающая статор насоса; 7 — шарнир

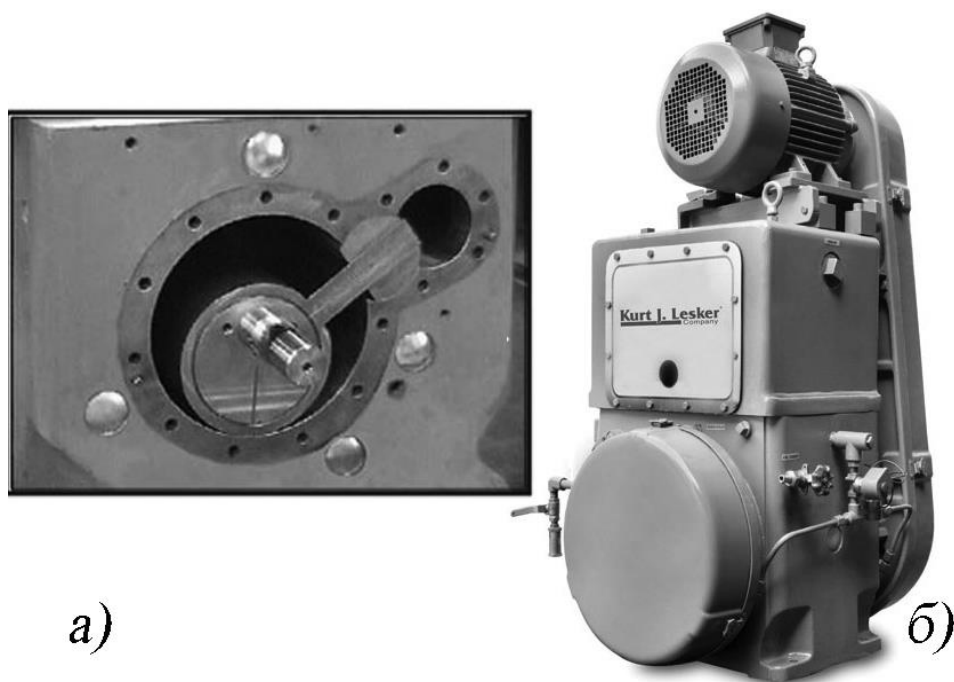


Рис. 1.16. Вид плунжерного механизма насоса (а) и плунжерный вакуумный насос компании Kurt J. Lesker KJLC412 (б). Скорость откачки — $425 \text{ м}^3/\text{час}$, предельное давление — $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$

Предельный вакуум для приборов этого класса — порядка 10^{-2} Торр, при двухступенчатой схеме — до 10^{-3} Торр. В качестве примера на рис. 1.16 приведен внешний вид плунжерного насоса и его основного механизма.

1.5.2.6. Двухроторные насосы

Схема устройства высокопроизводительного двухроторного насоса (в иностранной литературе их часто называют насосами Рутса) с обкатываемыми (леминискатными) профилями показана на рис. 1.17.

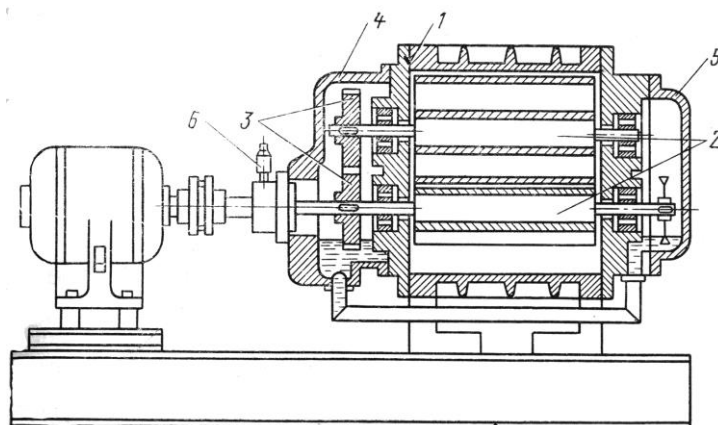


Рис. 1.17. Общая компоновка двухроторного насоса

В овальной рабочей камере корпуса 1 синхронно вращаются два ротора 2, в сечении напоминающие цифру "8". Последовательное положение роторов при вращении схематично изображено на рис. 1.18. Синхронность вращения обеспечивается закрепленными на валу роторов шестернями связи 3, вынесенными за пределы рабочей камеры. Смазка шестерен и опорных подшипников осуществляется разбрызгиванием масла из масляной ванны.

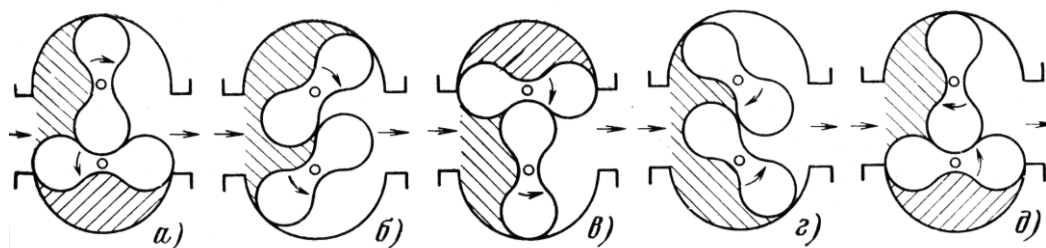


Рис. 1.18. Последовательные положения роторов при работе; стрелками показано направление потока откачиваемого газа и вращения роторов

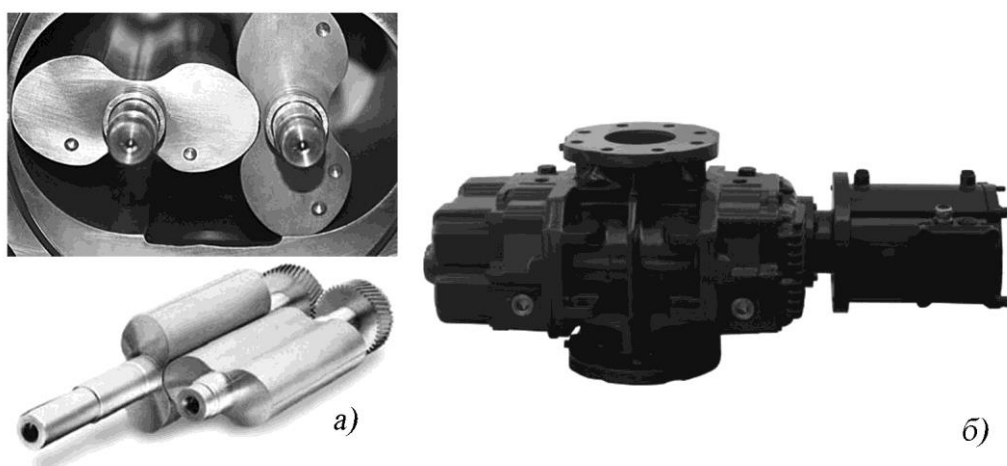


Рис.1.19. Внешний вид роторов (а), и двухроторного насоса компании Aerzen модель V750. Скорость откачки — $900 \text{ м}^3/\text{час}$, предельное давление — 10^{-3} Торр

При внешней синхронизации роторов зубчатой передачей теоретически они могут вращаться без зазора и трения (дважды перебрасывая газ на каждом обороте), поэтому частота вращения может быть очень большой (до 3000 об/мин). Реальная величина зазоров довольно велика ($\sim 0,5 \text{ мм}$), так что обратный поток газа с выхода на вход соизмерим с откачиваемым потоком во всем рабочем диапазоне давлений. Объемная скорость перемещения газа роторами постоянна и определяется геометрическими размерами рабочей камеры и скоростью вращения роторов. Количество же газа, протекающего по зазору, зависит от рода газа и разности давлений на входе и выходе насоса. Отсюда становится очевидной зависимость быстроты действия и предельного остаточного давления от рода откачиваемого газа и впускного и выпускного давлений. В вакуумной системе двухроторные насосы всегда работают последовательно с форвакуумными насосами. Такая двухступенчатая схема снижает предельное остаточное давление, повышает быстроту действия в области относительно низких впускных давлений, снижает обратный поток углеводородов, что позволяет получать разряжение до $5 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$ и скорость откачки 50–5000 л/с. Пример двухроторного насоса показан на рис. 1.19.

1.5.2.7. Особенности эксплуатации насосов с масляным уплотнением

Механические насосы производят откачку объема, начиная с атмосферного давления. Откачиваемый газ они вытесняют в атмосферу. По-

этому по отношению к механическим насосам не принято использовать такие характеристики, как наибольшее рабочее давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление. Основными вакуумными характеристиками механических вакуумных насосов с масляным уплотнением являются предельное остаточное давление и быстрота действия.

Быстрота действия механических насосов с масляным уплотнением практически не зависит от рода откачиваемого газа.

Остаточное давление насосов с масляным уплотнением определяется конструкцией насоса и свойствами рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости насосов с масляным уплотнением, как правило, используются масла, получаемые из промышленных минеральных масел. Кроме обычных требований (низкая кислотность, необходимая вязкость, хорошие смазывающие свойства и т. п.), к маслам для вакуумных насосов предъявляются дополнительные требования: низкое давление насыщенных паров в интервале рабочих температур насоса, малое поглощение газов и паров, стабильность вязкости при изменении температуры, высокая прочность тонкой (0,05–0,10 мм) масляной пленки, способной выдержать в зазоре перепад давлений, равный атмосферному давлению.

Остаточный газ (газ, оставшийся в вакуумной системе после откачки) механического вакуумного насоса с масляным уплотнением составляют воздух, газы откачиваемой среды, а также пары и продукты разложения рабочей жидкости насоса. В механическом вакуумном насосе, наряду с основным потоком в направлении откачки, существует обратный поток газа с выхода насоса в откачиваемый сосуд. Газы попадают во входное сечение насоса из циркулирующего в нем масла в результате перетекания по зазорам в откачном механизме. Разложение масла, в основном, происходит в результате возникновения высоких местных температур в областях непосредственных контактов трущихся металлических поверхностей. Образующиеся при этом легколетучие углеводороды в значительной степени обуславливают предельное остаточное давление насоса, так как они имеют существенно более высокие давления насыщенного пара, чем сама рабочая жидкость.

Стабильность характеристик насосов с масляным уплотнением определяется величиной зазоров между поверхностями, перемещающимися относительно друг друга, их количеством, а также качеством масла, посту-

пающего в рабочую камеру для уплотнения зазоров и смазки трущихся поверхностей. Максимальная быстрота действия и минимальное остаточное давление достигаются при таком притоке масла в рабочую камеру, которое обеспечивает и надежное уплотнение зазоров, и выброс в масляный резервуар в момент выхлопа верхнего слоя масла с растворенным в нем откачиваемым газом.

Несмотря на относительно низкую упругость паров масла, при длительной откачке механическим форвакуумным насосом эти пары диффундируют внутрь откачиваемого прибора. Избавиться от них очень трудно (как раз из-за низкой упругости паров), и любая поверхность в таком приборе со временем покрывается маслом. Это неприемлемо во многих случаях, особенно при исследовании поверхностных свойств, электронной эмиссии, а также при нанесении пленок. Поэтому помимо количественной характеристики вакуума (давления) используют еще и качественную характеристику — «*безмасляный вакуум*». Строго говоря, безмасляный вакуум можно получить лишь в том случае, если в схеме откачки ни один из элементов не содержит масел, и если ни один из элементов системы никогда не эксплуатировался с «масляной» откачкой. Однако отказ от применения насосов, использующих масла, создает значительные неудобства, поскольку альтернативные средства откачки имеют свои недостатки. Поэтому часто, если требования к отсутствию масла не слишком строги, идут на компромисс: содержащие масло насосы применяют, но с использованием специальных приемов, снижающих поток паров масла в прибор.

Таких приемов несколько. Один из них в отношении форвакуумного насоса — ограничить его работу тем периодом времени, пока в откачном тракте реализуется вязкостный режим откачки и встречный поток откачиваемого газа не позволяет происходить диффузии паров масла. После достижения давления 1–0,1 Торр механический объемный форвакуумный насос отсоединяют (чтобы исключить диффузию по стенкам вакуумпровода) и подключают насос другого типа — безмасляный, но не предназначенный для того, чтобы стартовать с атмосферного давления.

Другой способ уменьшить поступление масла в прибор — использование так называемых *ловушек*, т. е. устройств для парциальной откачки паров рабочих жидкостей. 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.

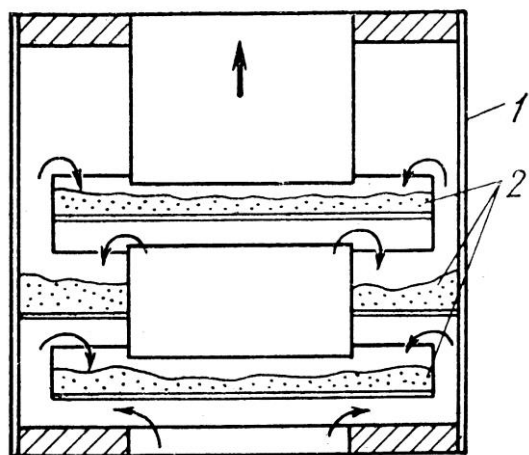


Рис. 1.20. Схема сорбирующей ловушки: 1 — корпус; 2 — кассеты с адсорбентом

Чаще всего используются *сорбирующие ловушки*, заполненные поглощающим пары масла материалом и геометрически не прозрачные для потока газа (рис. 1.20). Для получения заметного защитного действия в ловушке должны выполняться условия молекулярного режима течения газа вплоть до атмосферного давления, что соответствует наибольшему расстоянию между элементами ловушки 0,1 мкм. Такие размеры могут быть обеспечены только в пористых эле-

ментах, поэтому габариты ловушек зависят от удельной проводимости выбранных пористых материалов, в качестве которых применяются пористое стекло, стекловолокно, пористая медь и нержавеющая сталь, а также специальные материалы с развитой системой нанометровых пор — активированный уголь, цеолиты, силикагель. Обычно ловушки такого типа работают при комнатной температуре. Пример масляных ловушек показан на рис. 1.21.

Поглощение паров масла в этих ловушках осуществляется за счет адсорбции на внутренней поверхности стенок пор и капилляров, общая площадь которой может составлять десятки м². Время непрерывной работы такой ловушки составляет несколько сотен часов, по истечении которых поглощающий элемент должен быть заменен или очищен (продувкой атмосферным воздухом или прогревом до температур ~500° С).

Другой тип ловушки — *ионная* (диссоциирующая) ловушка (рис. 1.22). В ионных ловушках корпус 1, имеющий форму цилиндра, служит заземленным катодом для холодного разряда. Анодом является стержень 2, расположенный вдоль оси цилиндра. Разряд загорается при напряжении на аноде ~3 кВ и наличии осевого магнитного поля, создаваемого

внешним соленоидом 4. Электроны, эмитируемые катодом, движутся по удлиненной траектории к аноду, ионизируя остаточный газ. Положительные ионы, бомбардирующие поверхность корпуса, разлагают поверхностную пленку масла.



Рис. 1.21. Пример масляных ловушек. Цеолитовая, с электрическим подогревом для восстановления сорбента (а) (компания KJLC®), с фильтром из полимерных материалов (б) (компания Alcatel)

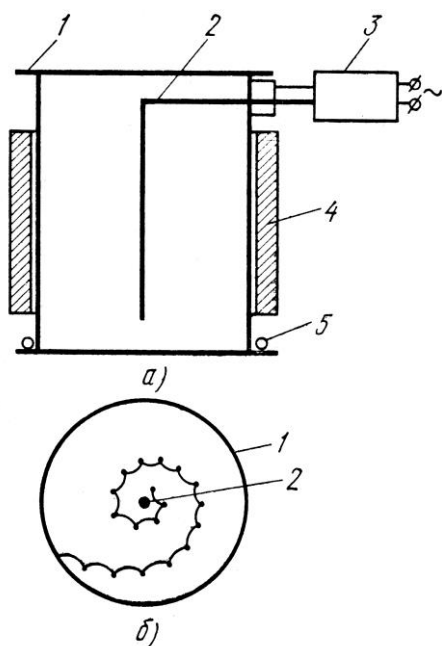


Рис. 1.22. Схема ионной ловушки; (а) — общий вид; (б) — типичная траектория электрона: 1 — корпус; 2 — анод; 3 — выпрямитель; 4 — соленоид; 5 — трубка водяного охлаждения

Это приводит к выделению легко откачиваемого водорода и полимеризации углеводородов на стенках ловушки с образованием нелетучей пленки. Охлаждение корпуса осуществляется проточной водой. Такая ловушка может уменьшить парциальное давление паров масла в 10–100 раз.

Еще один тип ловушек — это *конденсирующие* ловушки, охлаждаемые жидким азотом. Конструкции их могут быть разными, они могут быть изготовлены и из стекла, и из металла; типичные примеры показаны на рис. 1.23. Обычно стараются обеспечить геометрическую непрозрачность ловушечной системы, чтобы исключить возможность прохож-

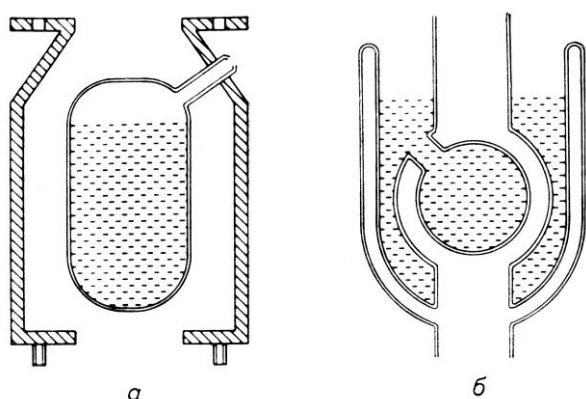


Рис. 1.23. Охлаждаемые ловушки:
(а) — металлическая; (б) — стеклянная

дения сквозь нее паров масла без соприкосновения с охлаждаемой поверхностью. Поскольку коэффициент прилипания молекул масла к такой поверхности близок к 1, это позволяет обеспечить почти 100 % перехват его паров. Одновременно ловушка осуществляет и эффективное вымораживание паров воды, которой в остаточных газах достаточно много.

Отметим, однако, что все перечисленные компромиссные методы являются в значительной степени самообманом. Во-первых, диффузия масла все равно происходит, хотя и медленнее. Во-вторых, в результате любой ошибки в манипуляциях или при аварии масло все же может попадать в прибор, и в этом случае оно остается в нем практически навсегда.

В последние годы развитие технологии и, как следствие, необходимость получения чистого вакуума, привели к появлению нескольких новых разновидностей безмаслянных механических форнасосов объемного действия, таких как диафрагменный, спиральный, винтовой и кулачковый.

1.5.2.8. Диафрагменные насосы

Основным конструкционным элементом таких насосов является эластичная металлическая или полимерная мембрана, ограничивающая с одной стороны объем рабочей камеры насоса (рис. 1.24). С другой стороны объем рабочей камеры ограничивают два подпружиненных клапана. Циклический изгиб мембраны с помощью механического привода приводит к изменению объема рабочей камеры насоса. Один из клапанов открывается на впуск газа в рабочую камеру, когда давление в ней снижается за счет увеличения рабочего объема, другой открывается на выпуск газа из рабочей камеры при уменьшении ее объе-

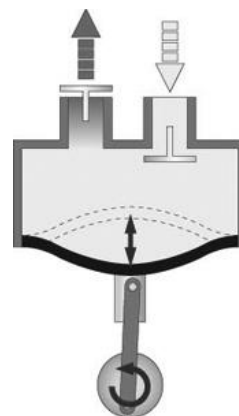


Рис. 1.24. Схема конструкции одноступенчатого диафрагменного вакуумного насоса

ма. Последовательные положения мембраны и клапанов при работе насоса показаны на рис. 1.25. Мембрана герметично отделяет рабочий объем насоса от механизма привода и таким образом исключает попадание в него паров смазочного масла. Изготовление или покрытие мембраны и элементов конструкции, имеющих контакт с откачиваемым газом, фторсодержащими эластомерами (PTFE, PP, PVDF) позволяет использовать насосы этого типа для откачки агрессивных газов и паров.

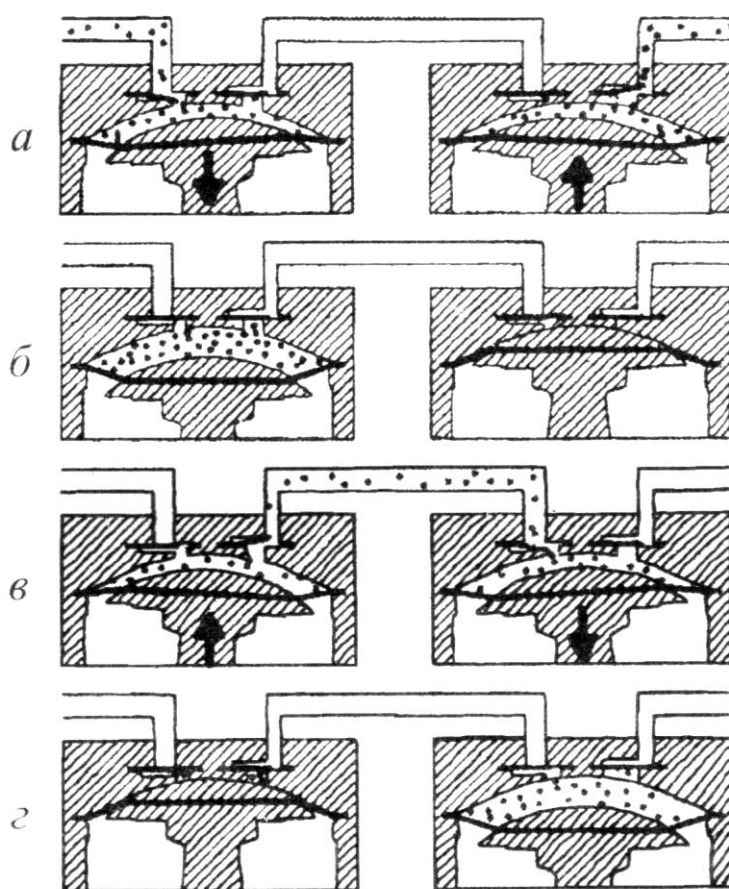


Рис. 1.25. Принцип работы двухступенчатого диафрагменного вакуумного насоса (показаны четыре последовательные фазы работы)

Из-за ограниченной величины упругой деформации мембран насосы этого типа характеризуются сравнительно небольшой скоростью откачки 0,1–6 м³/час. Кроме того, в диафрагменном насосе всегда остается «мертвый объем», газ из которого не может быть удален. В связи с этим, веду-

щие производители, как правило, делают насосы с несколькими последовательными каскадами откачки.

В случае одноступенчатого диафрагменного вакуумного насоса достижимое предельное давление достигает порядка 60 Торр, в двухступенчатых уже $\sim 7,5$ Торр, в трехступенчатых $\sim 1,5$ Торр, а в четырехступенчатых может достигнуть 0,3 Торр.

Несмотря на то что рабочие показатели диафрагменных насосов ниже, чем у других типов механических вакуумных насосов, то, что они являются наиболее чистыми из всех известных механических насосов, не имеют собственных выхлопов, не требуют масла, имеют относительно низкую стоимость, делает их привлекательными для решения ряда задач. Внешний вид такого насоса приведен на рис. 1.26.

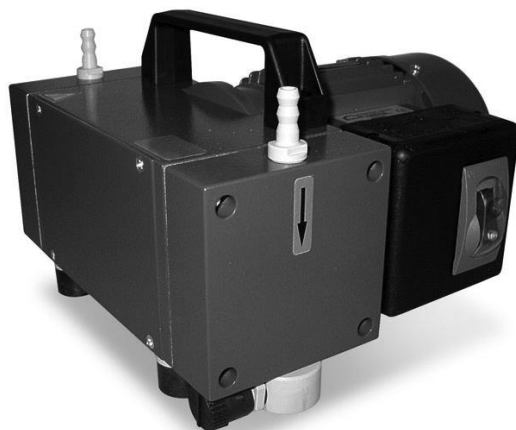


Рис. 1.26. Внешний вид химически защищенного диафрагменного вакуумного насоса серии LDPC компании KJLC. Предельное давление в случае двухступенчатой конструкции — 6 Торр, трехступенчатой — 1,5 Торр. Скорость откачки — $0,47\text{--}4\text{ м}^3/\text{час}$ (в зависимости от модели). Нарботка на отказ — 10000 часов

Наиболее типичным применением диафрагменных вакуумных насосов является предварительная откачка турбомолекулярных насосов, масс-спектрометрия, химический анализ, медицинское и биологическое оборудование, оборудование для пищевой промышленности.

1.5.2.9. Спиральные насосы

В основу механизма спирального насоса положены две одинаковые металлические спирали, вложенные одна в другую. Одна спираль зафиксирована и остается неподвижной в процессе работы насоса. Другая спираль совершает орбитальное движение — описывает небольшой круг относительно центральной точки, при этом сама спираль не вращается (рис. 1.27, б).

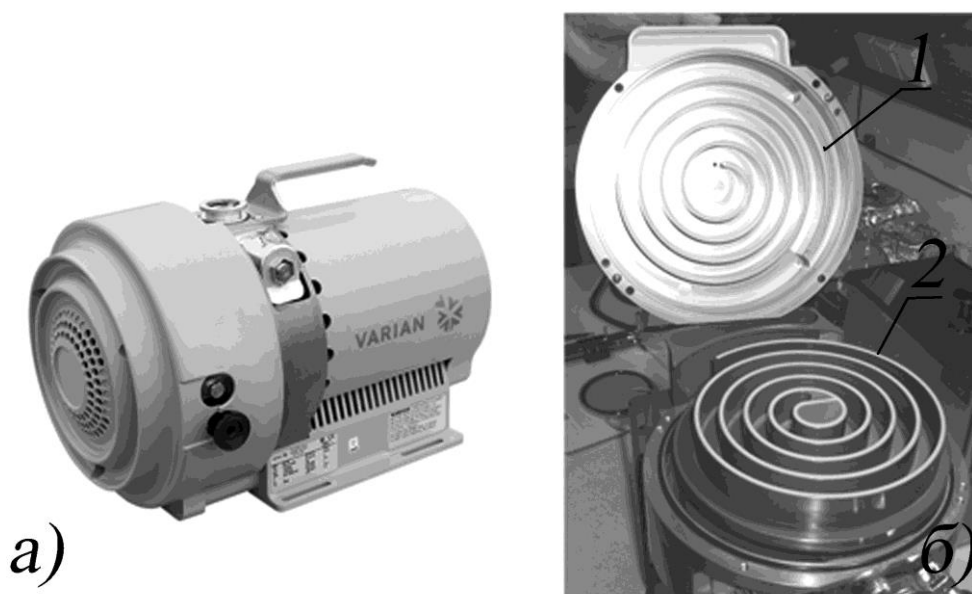


Рис. 1.27. Внешний (а) и внутренний (б) вид спирального насоса фирмы Varian SH-110 (скорость откачки — $5,4 \text{ м}^3/\text{час}$, предельное давление — $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$): 1 — неподвижная спираль; 2 — подвижная спираль

Рабочая камера насоса, образованная соприкасающимися спиралями, имеет серповидную форму. В начальной точке орбитального движения подвижной спирали рабочий объем связан с входным потоком газа (рис. 1.28).

По мере орбитального движения подвижной спирали происходят изоляция объема газа от входа насоса и его сжатие в уменьшающемся объеме рабочей камеры. Сжимаемый объем газа перемещается к оси прибора, где он приобретает максимальное давление и выбрасывается из насоса через выходной клапан. В этой орбитальной позиции входной поток газа снова подключен к рабочей камере, имеющей в этот момент максимальный объем.

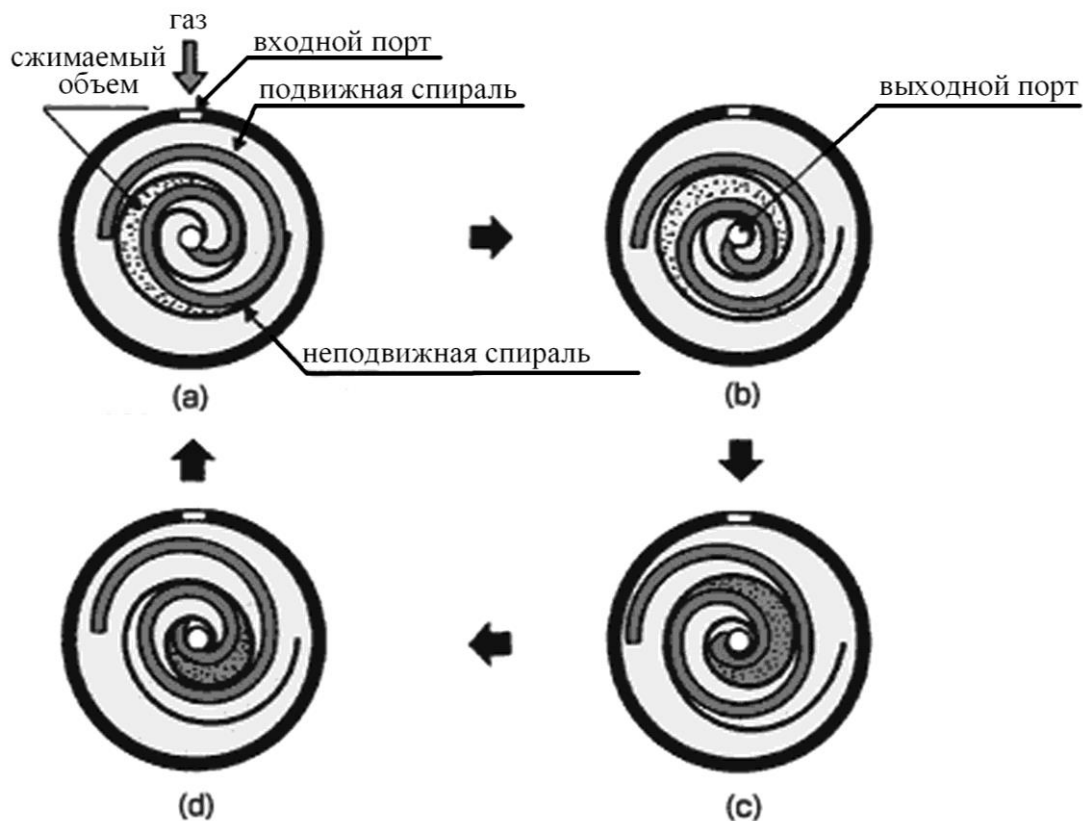


Рис. 1.28. Принцип работы спирального вакуумного насоса (показаны четыре последовательные фазы работы)

Такие насосы имеют высокую скорость откачки, до $30 \text{ м}^3/\text{час}$, и низкое остаточное давление 10^{-2} – 10^{-3} Торр.

Спиральные насосы используются для чистых сухих процессов, а также как насосы предварительного разряжения в системах с турбомолекулярными насосами. Использование таких насосов, как правило, не рекомендуется для откачки агрессивных газов, газов с большим содержанием пыли и паров. Они не должны использоваться за пределами диапазона температур окружающей среды от 5 – 40°C .

1.5.2.10. Винтовые насосы

Принцип действия основан на статическом сжатии газа в винтовой паре, состоящей из двух винтов, вращающихся в разные стороны с большой скоростью (3600 оборотов в минуту) (рис. 1.29). За счет особой формы винтов и наличия микрозазоров между ними вращение происходит без трения. Синхронизация вращения обеспечивается высокоточной зубчатой передачей, вынесенной за пределы рабочего объема насоса. При вращении

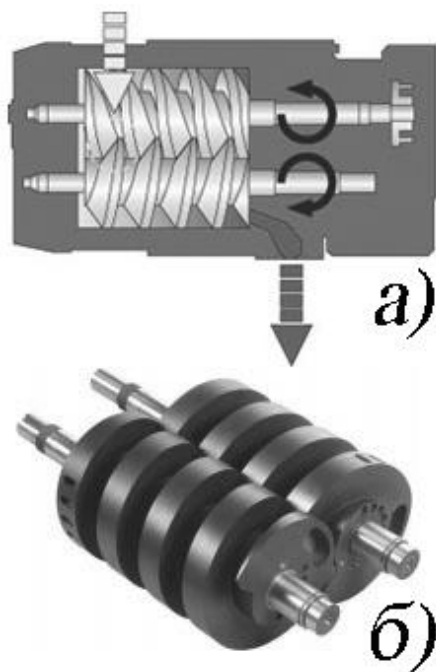


Рис. 1.29. Схема конструкции винтового вакуумного насоса (а) и фотография роторов винтового насоса (б)

винтов происходит увеличение объема ячеек, образованных винтовой поверхностью и корпусом, что приводит к всасыванию газа через входной фланец насоса и перемещению его к стороне нагнетания, где он выбрасывается при открытии выходного клапана. Охлаждение корпуса осуществляется с помощью водяной или воздушной системы. Вакуумные насосы этого типа осуществляют откачку газа без присутствия масла в рабочей камере.

Винтовые насосы обладают высокой производительностью $100\text{--}800\text{ м}^3/\text{час}$, предельное давление — до 10^{-3} Торр.

Корпуса и роторы насосов изготавливают из высокопрочной стали. Применяемые покрытия рабочих поверхностей позволяют использовать их в условиях связанных с откачкой агрессивных газов, паров, наличия твердых микрочастиц в откачиваемом газе. Пример такого насоса показан на рис. 1.30.



Рис. 1.30. Внешний вид винтовых вакуумных насосом серии ScrewLine компании Leybold. Предельное давление — $7,5 \cdot 10^{-3}$ Торр. Скорость откачки — $250\text{--}630\text{ м}^3/\text{час}$ (в зависимости от модели)

Винтовые насосы широко применяются в химической, фармацевтической, электронной промышленности, при нанесении покрытий, в научно-исследовательских работах, в моделировании космических условий и т. д.

1.5.2.11. Кулачковые (когтевые) насосы

Кулачковые насосы являются аналогами двухроторных. В поперечном сечении корпус насоса представляет собой два полых, параллельных друг другу цилиндра. На оси цилиндров закреплены роторы, имеющие два кулачка специфической когтевидной формы, вращающихся в противоположном направлении (рис. 1.31).

Вращение роторов строго синхронизировано, как и в двухроторных насосах. За счет формы кулачков и минимальных зазоров вращение происходит без трения. Всасывание газа последовательно происходит через входной канал.

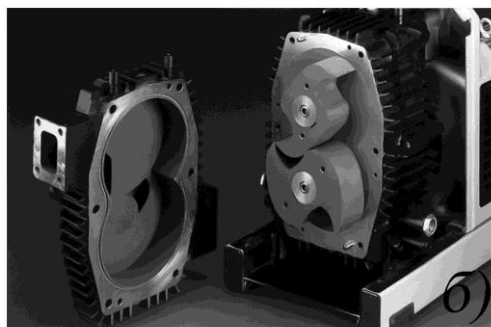
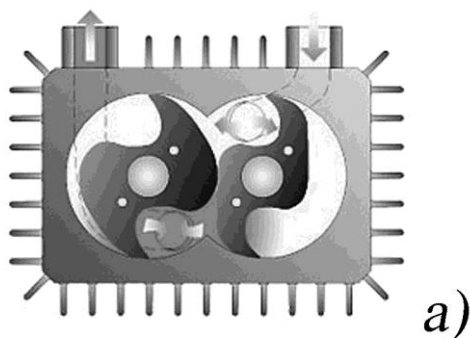


Рис. 1.31. Схема конструкции (а) и фотография внутреннего устройства (б) кулачкового вакуумного насоса

При вращении кулачков газ перемещается к стороне нагнетания. За счет постоянного уменьшения объема в пространстве между кулачками происходит сжатие газа до момента открытия выхлопного клапана. Такое «внутреннее сжатие» позволяет добиться очень высокого КПД. Выхлоп газа осуществляется через нагнетательный патрубок. В ряде конструкций насосов газ, прежде чем покинуть насос, проходит в пространстве между корпусом и звукопоглощающим кожухом, что позволяет получить более холодный воздух на выхлопе. Форма когтевидных кулачков рассчитана таким образом, что создаваемая в сжимаемом

объеме турбулентность не позволяет газу контактировать с внутренними достаточно долго, что снижает вероятность коррозии из-за взаимодействия с агрессивными газами и твердыми микрочастицами.

Количество ступеней откачки может быть разным, от двух до пяти, в зависимости от производителя и модели насоса. Для четырехступенчатых насосов (рис. 1.32) скорость откачки составляет от 50 до 250 м³/час, предельное давление — порядка 10⁻¹ Торр.

В ряде конструкций когтевой насос выполняется в виде многоступенчатой (обычно состоящей из 3 или 4 ступеней) машины, где одной из ступеней является двухроторная ступень Рутса, остальные — когтевые (рис. 1.33). Главным производителем и обладателем патента на данную конструкцию является компания Edwards.

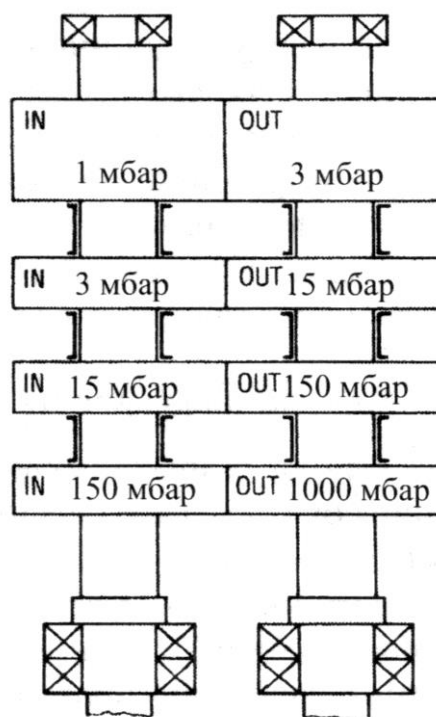


Рис. 1.32. Распределение давления в откачных секциях четырехступенчатого кулачкового насоса

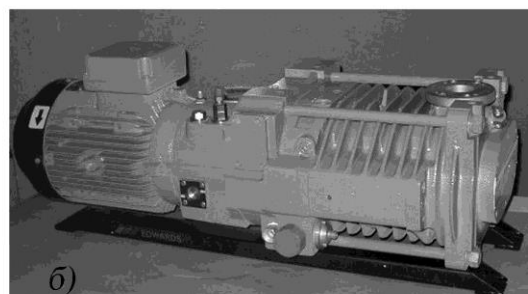
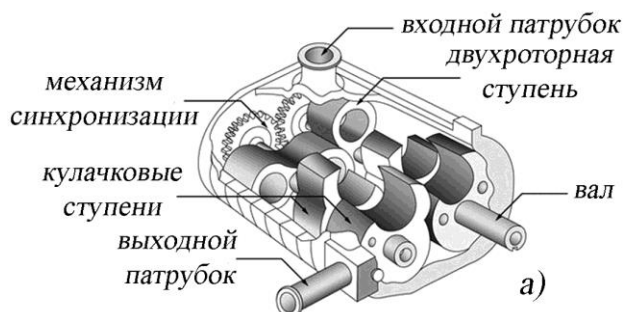


Рис. 1.33. Конструкция кулачкового вакуумного насоса с двухроторной ступенью Рутса (а), внешний вид насоса Technical Data GV80 Drystar, компании Edwards (б). Три ступени насоса кулачковые, одна двухроторная ступень Рутса. Скорость откачки — 80 м³/час, предельный вакуум — 0,02 Торр

Насосы данного типа используются для откачки камер больших объемов или для работы с высокими газовыми нагрузками. Например, установки роста различных кристаллических структур — поли- и монокристаллического кремния для изготовления подложек микроэлектронной техники, солнечных батарей и плоскопанельных дисплеев, сапфира для разнообразных промышленных применений и т. п. Данные приложения предъявляют

повышенные требования к надежной безостановочной работе откачных средств в условиях высоких газовых нагрузок при наличии твердых примесей в откачиваемом газе.

1.5.3. Молекулярные насосы

Принцип действия молекулярных насосов, как уже отмечалось выше, основан на передаче импульса молекулам газа в направлении откачки либо движущимися частями механического насоса (*турбомолекулярные насосы*), либо струей пара рабочей жидкости (*пароструйные насосы*).

1.5.3.1. Турбомолекулярные насосы

Первый турбомолекулярный насос (ТМН) был построен в 1958 г., когда Беккер (Becker) опубликовал работы по многоступенчатым молекулярным насосам с аксиально-поточной схемой. В том же году Хаблянян опубликовал результаты опытов по компрессору аксиального потока на тонких вращающихся дисках, работающему в высоком вакууме. После 1958 г. оригинальная идея Беккера неоднократно усовершенствовалась и в результате воплотилась в разработку современных промышленных ТМН, которые сочетают принципы молекулярного увлечения и осевого компрессора.

Турбомолекулярный насос с взаимно перпендикулярным движением рабочих поверхностей и потока откачиваемого газа представляет собой высокоскоростную турбину, которая состоит из серии вращающихся и не-

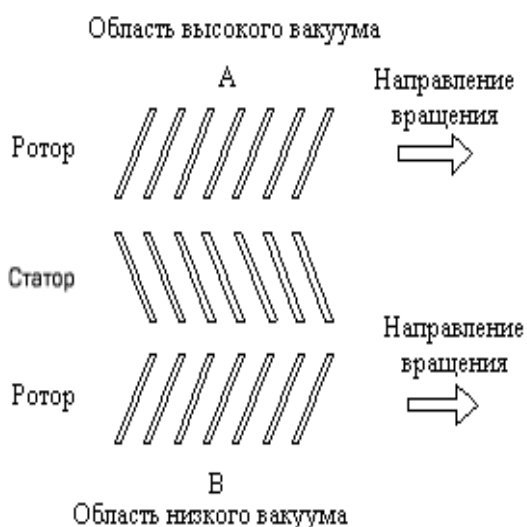


Рис. 1.34. К принципу действия турбомолекулярного насоса

подвижных дисков с наклонными прорезями (роторов и статоров), причем пазы в роторе и статоре имеют противоположный наклон. Современные насосы имеют 25–30 роторных секций и такое же число статорных.

Работа насоса основана на том, что при столкновении молекулы газа с поверхностью быстро вращающегося диска составляющая скорости движения молекулы, направленная вниз (рис. 1.34), увеличивается,

вследствие чего вероятность движения молекулы в направлении А–В значительно возрастает по сравнению с вероятностью движения в направлении В–А. Для передачи молекулам заметного импульса в направлении откачки необходимо, чтобы точки на окружности ротора имели линейные скорости порядка молекулярных (430 м/с). Поэтому вал таких насосов должен вращаться со скоростью 10000–60000 об./мин в зависимости от диаметра насоса.

Существуют схемы насосов с горизонтальным и вертикальным расположением вала ротора (рис. 1.35). При горизонтальном положении ротора движение газа в насосе после входа во всасывающий патрубок разветвляется на два потока, которые соединяются в выхлопном патрубке.

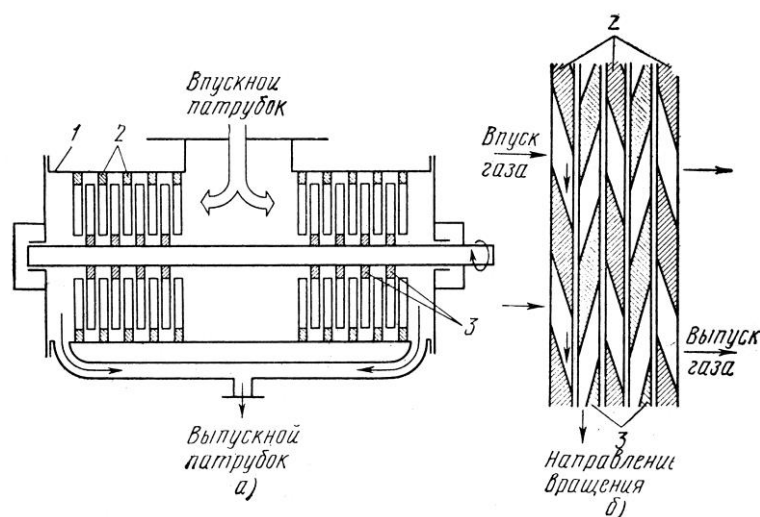


Рис. 1.35. Схемы турбомолекулярных насосов:
(а) с горизонтальным валом; (б) с вертикальным валом: 1 — ротор; 2 — статор; 3, 4 — лопатки ротора и статора

Явное достоинство насосов с вертикальным валом — предельная компактность и лёгкость благодаря естественному расположению первой решётки — роторного диска — непосредственно у разъёма входного фланца, а двигателя — внутри полого ротора. В то же время, насос с горизонтальным валом гораздо легче ремонтировать, поскольку подверженные износу подшипники в нём легко доступны и могут быть заменены без разборки насоса.

Параметры, характеризующие турбомолекулярные насосы (и, как правило, приводящиеся в технических характеристиках) — это производительность, скорость откачки, степень сжатия и базовое давление.

Под *производительностью* понимается поток откачиваемого газа Q , проходящего через турбомолекулярный и через форвакуумный насос. Максимальная производительность откачивающей системы, как правило, определяется форвакуумным, а не турбомолекулярным насосом.

Скорость откачки S турбомолекулярного насоса — это отношение производительности Q к входному давлению p :

$$S = Q/p. \quad (1.57)$$

Скорость откачки турбомолекулярного насоса постоянна в широком диапазоне давлений и зависит от геометрических размеров насоса и от скорости вращения ротора. Для большинства турбомолекулярных насосов скорость откачки почти не зависит от молекулярного веса частиц газа.

Степень сжатия K — это отношение парциального давления в линии форвакуума к входному парциальному давлению, измеренному при условии «нулевого потока» (путем инъекции газа в форвакуумную линию при заглушенном входе турбомолекулярного насоса). В технической спецификации на турбомолекулярный насос обычно приводится максимально достижимое значение K (при низком форвакуумном давлении).

Степень сжатия определяет отношение вероятностей пролета молекул любого газа в прямом и обратном направлениях. Легкие газы, тепловая скорость молекул которых больше, легче проникают через насос. Для них быстрота действия больше, а степень сжатия меньше. Степень сжатия существующих насосов составляет 10^2 – 10^3 по водороду, 10^7 – 10^{12} по азоту, больше или равна 10^{15} по углеводородам и возрастает с увеличением частоты вращения ротора. Увеличение угла наклона паза ведет к снижению степени сжатия и увеличению быстроты действия.

В рабочем режиме поток газа Q отличен от нуля и, очевидно, одинаков во всем вакуумном тракте, т. е.

$$Q = S_{\text{eff}} p_{\text{in}} = S_{\text{for}} p_{\text{for}}, \quad (1.58)$$

где S_{eff} — эффективная скорость откачки ТМН, p_{in} — входное давление, S_{for} — скорость откачки форвакуумного насоса и p_{for} — давление в линии форвакуума.

Отсюда следует, что отношение выходного и входного давлений R_p

$$R_p = \frac{p_{for}}{p_{in}} = \frac{S_{eff}}{S_{for}}. \quad (1.59)$$

Это отношение, очевидно, может изменяться от единицы до максимально возможной степени сжатия K . В общем случае эффективная скорость откачки является линейной функцией отношения давлений R_p , как показано на рис. 1.36. S_{eff} достигает максимального значения S (номинальная скорость откачки насоса), когда R_p равно единице, и стремится к нулю, когда значение R_p приближается к K .

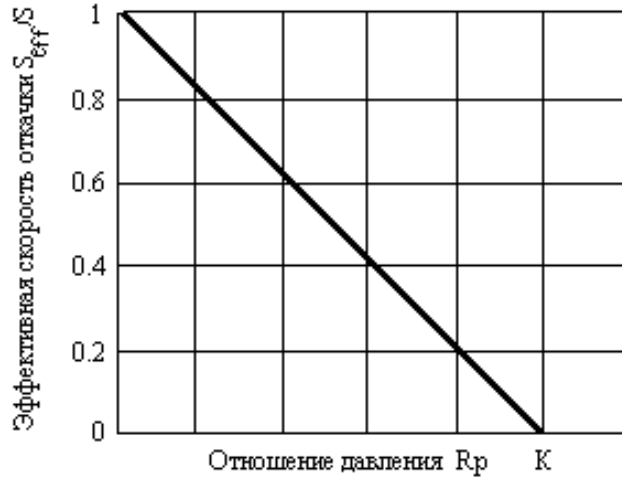


Рис. 1.36. Зависимость эффективной скорости откачки от отношения давлений

Зависимость S_{eff} от степени сжатия может быть представлена следующей формулой

$$\frac{S_{eff}}{S} = \frac{1}{1 - \frac{1}{K} + \frac{S}{S_{for}K}}. \quad (1.60)$$

При $K \gg S / S_{for}$ и $K \gg 1$, получаем, что $S_{eff} = S$. В этом случае скорость откачки турбомолекулярного насоса мало зависит от степени сжатия (и от производительности форвакуумного насоса). При $K = 1$, $S_{eff} = S_{for}$, т. е. определяется производительностью форвакуумного насоса.

Базовое давление P_{base} турбомолекулярного насоса — это установившееся давление в системе или отношение потока газа с внутренних поверхностей откачиваемого объема Q_{outgas} к скорости откачки насоса S_{eff} . Турбомолекулярный насос может начинать откачку с давления 10^2 Па (~ 1 Торр), но при этом быстрота действия его будет мала, а потребляемая мощность велика в результате тормозящего действия газа; к тому же в насосе будет выделяться заметное количество тепла. Рабочий диапазон впускных давлений турбомолекулярного насоса — 10^{-7} – 1 Па (10^{-9} – 10^{-2} Торр). При этом эффективная скорость откачки постоянна. При давлении

ниже 10^{-6} Па (10^{-8} Торр) заметным становится перетекание водорода и других легких газов со стороны форвакуума в откачиваемый сосуд и их относительное парциальное давление возрастает, что вызывает уменьшение быстроты действия турбомолекулярных насосов.

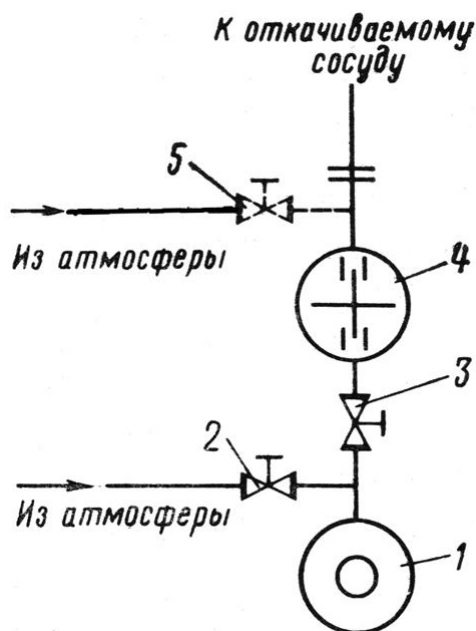


Рис. 1.37. Типичная схема подключения турбомолекулярного насоса: 1 — форвакуумный насос; 2, 5 — напускные вентили; 3 — выходной вентиль; 4 — ТМН

Типичная вакуумная схема подключения ТМН к откачиваемой камере показана на рис. 1.37. Как видно из рисунка, молекулярный насос, как правило, присоединяют непосредственно к откачиваемому сосуду без затвора, что позволяет достичь максимальной быстроты откачки рабочей камеры установки.

Если в момент остановки турбомолекулярного насоса в него не напускают атмосферный воздух, клапан 3 необходимо закрыть сразу после отключения электродвигателя.

Постепенное повышение давления в насосе будет способствовать торможению ротора. Откачка выключенного турбомолекулярного насоса форвакуумным насосом ведет к загрязнению и насоса, и откачиваемого сосуда парами масла. Поэтому следует избегать длительной работы форвакуумного насоса в период пуска и остановки ТМН.

Недопустима длительная работа насоса при высоких (> 10 Па) впускных давлениях, так как это приводит к выходу из строя электродвигателей, мощности которых не хватает для преодоления возросшей силы трения газа.

Большую опасность представляет попадание внутрь насоса относительно крупных твердых частиц. Для предотвращения этого во впускном патрубке насоса обычно устанавливают сетку с размерами ячейки 1×1 мм, которая, однако, снижает быстроту действия насоса примерно на 25 %.

Самый сложный, точный и дорогой узел насоса — ротор — нуждается в тщательной динамической балансировке, чтобы скомпенсировать силы, вызванные несимметричным распределением массы относительно оси вращения. Точность балансировки зависит от массы ротора и обратно пропорциональна квадрату рабочей частоты его вращения. Недостаточная балансировка ротора приводит к опасным для работы вакуумных устройств вибрациям, нагрузкам на подшипники и досрочному выходу насоса из строя.



Рис. 1.38. Керамические шарики в подшипниках ТМН фирмы Varian

Не менее важными узлами являются опорные устройства, обеспечивающие подвеску вала. Требование продолжительной работы при высоких частотах вращения с учётом размещения подшипников в вакууме выполнимо только при применении подшипников самой высокой точности и быстроходности. Так, в ТМН

фирмы Varian применяются подшипники с шариками из керамики (вместо стали) со специальной смазкой, имеющей экстремально низкое давление паров, что делает возможным длительную работу этих насосов без какого-либо обслуживания и обеспечивает высокую степень чистоты во всех рабочих режимах (рис. 1.38).

Шарики таких подшипников сделаны из нитрида силикона — поликристаллического материала с аморфной межгранульной связывающей основой, что имеет следующие достоинства.

Твердость — это критический аспект конструкции подшипников, существенно влияющий на качество работы и надежность насоса. Нитрид силикона вдвое тверже стали и имеет очень высокую устойчивость рабочей поверхности.

Вес — плотность нитрида силикона на 40 % меньше, чем плотность стали, что снижает центробежную нагрузку и уровень внутреннего напряжения на высоких скоростях вращения.

Трение — низкий коэффициент трения нитрида силикона уменьшает нагрузку на поверхность шариков и увеличивает срок службы подшипника в целом.

Температурная стабильность — обладая низким температурным коэффициентом расширения, нитрид силикона обеспечивает постоянную величину зазоров у движущихся деталей в широком диапазоне температур. Кроме того, этот материал имеет особенно высокую устойчивость к тепловому удару.

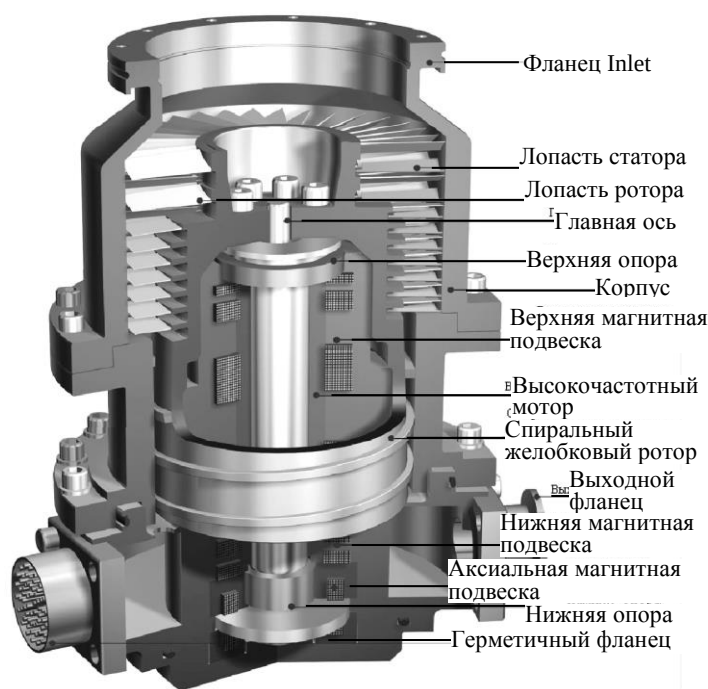


Рис. 1.39. ТМН с магнитной подвеской

Разработаны и используются и другие варианты конструкции подвески вала. Например, в ТМН фирмы Ebara применяется магнитная подвеска (рис. 1.39), в которой несмазываемые подшипники используются

для поддержания ротора в стационарном состоянии. Основные преимущества таких систем — чистота вакуума и низкий уровень вибрации. В некоторых ТМН (например, фирмы Alcatel (Adixen)) используется крепление оси ротора на газовых подшипниках.

Так как коэффициент компрессии (или степень сжатия) каждой ступени в турбомолекулярном насосе невелик, можно 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 их работы. Увеличение зазоров, снижая коэффициент компрессии насоса, слабо влияет на его быстроту действия.

На производстве и в лабораторных условиях успешно применяются турбомолекулярные насосы как отечественного, так и импортного производства.

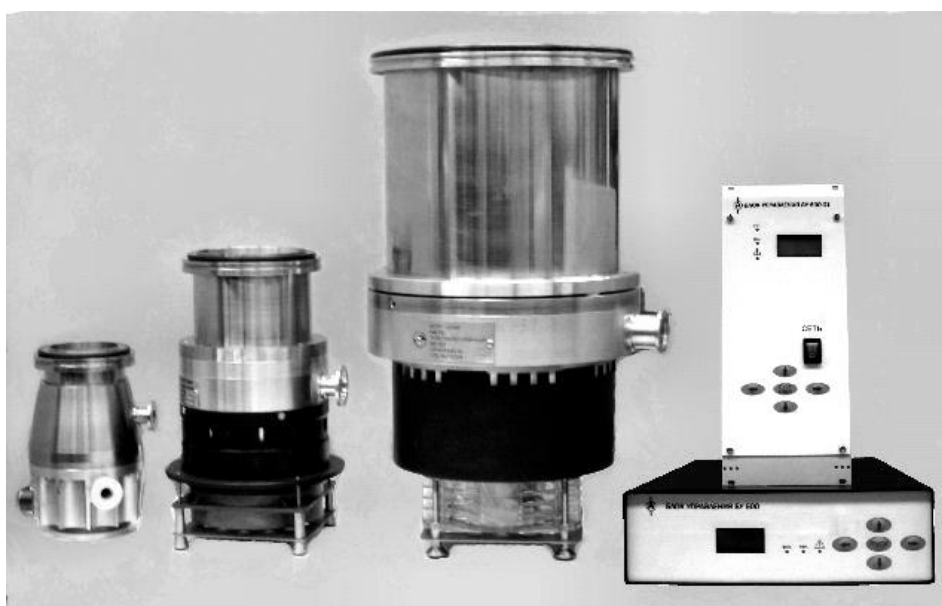


Рис. 1.40. Турбомолекулярные насосы BV-50, BV-150, BV-500 и блоки управления к ним

Таблица 1.2

Параметры турбомолекулярных насосов

<i>Параметры насоса</i>	BV-50	BV-150	BV-500
Быстрота действия (по азоту), м ³ /с	0,05	0,15	0,5
Максимальное форвакуумное давление, Па	1,3	1,3	1,3
Предельное остаточное давление, Па	1 10 ⁻⁶	1 10 ⁻⁷	1 10 ⁻⁶
Мощность, потребляемая на номинальном режиме, Вт	30	30	30
Наибольший диаметр, мм	110	139	260
Высота (водяное охлаждение/воздушное охлаждение), мм	–/200	196/282	360/460
Входной фланец	Ду63	Ду100	Ду200
Форвакуумный фланец	Ду10	Ду16	Ду24
Масса насоса, кг	2,7	6	32
Масса блока управления, кг	2,9	2,5	6,5

Для примера турбомолекулярных насосов, серийно выпускаемых в России, можно привести образцы продукции НТЦ «Энергонасос ЦКБМ», включающей турбомолекулярные насосы BV-50, BV-150 и BV-500 (рис. 1.40) с водяным или воздушным охлаждением. Присоединительный

высоковакуумный фланец выполняется под уплотнение с резиновым кольцом (стандарт ISO) или под уплотнение типа ConFlat. При установке насос может быть сориентирован в пространстве в любом положении.

Микропроцессорный блок управления выполняется в настольном, стоечном и встраиваемом бескорпусном исполнениях. На всех режимах работы насос управляется процессором, имеется выход на компьютер.

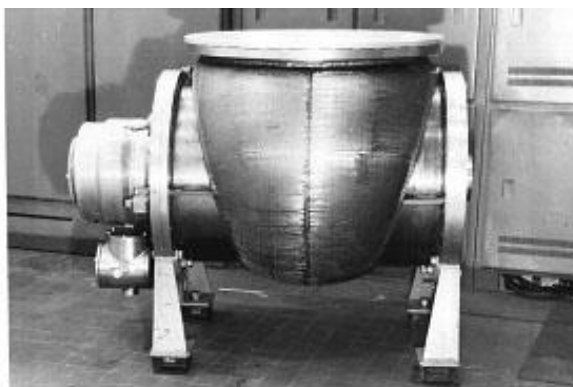
Параметры этих насосов представлены в табл. 1.2.

ФГУП «ЦКБМ» производит также и высокопроизводительные сверхвысоковакуумные турбомолекулярные насосы с быстротой действия 5 и 10 м³/с, представленные на рис. 1.41 и 1.42. Параметры этих насосов приведены в табл. 1.3.

Из зарубежных производителей турбомолекулярных насосов можно привести для примера фирмы Alcatel и Varian.



ТМНГ-5000



ТМНГ-10000

Рис. 1.41. Сверхвысоковакуумные турбомолекулярные насосы фирмы «ЦКБМ»

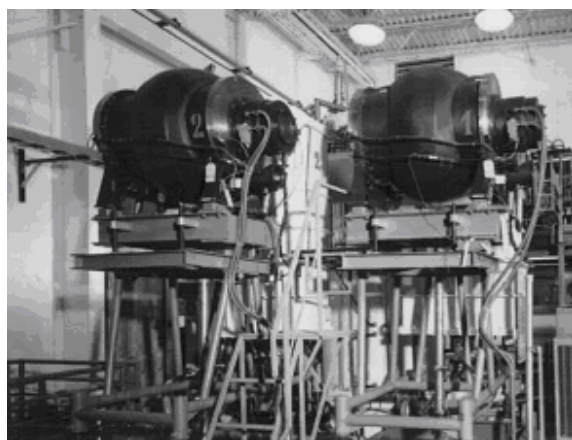


Рис. 1.42. Турбомолекулярные насосы ТМНГ-10000 на стенде в лаборатории Филиппс, Альбукерк, США

Таблица 1.3

Параметры сверхвысоковакуумных турбомолекулярных насосов

<i>Параметры насоса</i>	ТМНГ-5000	ТМНГ-10000
Быстрота действия (по азоту), м ³ /с	5	10
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Напряжение питания, В	380	380
Мощность, потребляемая насосом на номинальном режиме, Вт	400	400
Габаритные размеры (высота, ширина, длина), мм	700 × 650 × 1000	1120 × 1150 × 1385
Входной фланец	Ду 400	Ду 750
Форвакуумный фланец	Ду 50	Ду 65
Масса насоса, кг	415	960

Компания «Alcatel Vacuum Technology France» является подразделением французского холдинга «Alcatel». Она выпускает широкую гамму продукции (форвакуумные насосы, высоковакуумные турбонасосы, гелиевые течеискатели, арматура), находящую свое применение во всех областях вакуумной техники и в смежных отраслях промышленности.

Пример насоса, производимого фирмой «Alcatel», представлен на рис. 1.43, а параметры различных моделей приведены в табл. 1.4.



Рис. 1.43. Турбомолекулярный насос АТР-400

Таблица 1.4

**Спецификация некоторых турбомолекулярных насосов
фирмы Alcatel**

Модель	Скорость откачки, л/с	Максимальное создаваемое разряжение, мбар	Максимальное рабочее входное давление, мбар	Максимальное рабочее выпускное давление, мбар	Степень компрессии газа на турбине (по азоту)
ATH31+	33	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-1}$	45	$1 \cdot 10^{11}$
ATH200	200	$5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-3}$	4	$1 \cdot 10^9$
ATH300	300	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-1}$	10	$1 \cdot 10^9$
ATP80	80	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^7$
ATP100	100	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^7$
ATP150	140	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^8$
ATP400	400	$8 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^8$
ATP900	900	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^9$
ATH1300M	1250	$8 \cdot 10^{-9}$	0,5	1,5	$1 \cdot 10^7$
ATH1600M	1500	$6 \cdot 10^{-9}$	0,2	1,5	$6 \cdot 10^7$
ATH2300M	2100	$4 \cdot 10^{-9}$	0,15	1,5	$1 \cdot 10^8$



Рис. 1.44. Турбомолекулярный насос
Turbo-V 2K-G фирмы Varian

Фирма «Varian Vacuum Technology» с начала 1950-х годов заслуженно пользуется репутацией одного из лидеров области разработки и производства широкого спектра вакуумных насосов, гелиевых масс-

спектрометрических течеискателей, вакууметров и вакуумной арматуры. На рис. 1.44 показан внешний вид одного из выпускаемых этой фирмой ТМН, а в табл. 1.5 приведены основные его параметры.

Таблица 1.5

Спецификация турбомолекулярного насоса Turbo-V 2K-G

Номинальная скорость откачки	1600 л/с
Коэффициент сжатия (азот)	$3 \cdot 10^5$
Предельная глубина вакуума	$5 \cdot 10^{-8}$ мбар
Входной фланец	ISO 250 мм
Выходной фланец	KlampFlange 40 NW
Положение при эксплуатации	произвольное
Уровень вибрации на входном фланце	менее 0,01 мкм
Номинальная скорость вращения ротора	33000 об/мин
Рекомендуемый форнасос	$> 40 \text{ м}^3/\text{час}$

По сравнению со многими другими сверхвысоковакуумными насосами турбомолекулярным насосам присущ *ряд преимуществ*:

- способность переносить без разрушения резкие скачки давления (вплоть до прорыва в откачиваемый прибор атмосферы);
- широкий диапазон рабочих давлений (10^{-9} – 10^{-3} Торр);
- постоянная готовность к работе;
- высокая и примерно одинаковая скорость откачки по большинству газов;
- чрезвычайно высокая степень сжатия (10^{15}) для газов с молекулярной массой > 44 , что, в частности, обеспечивает давление углеводородов на входе турбомолекулярного насоса не более 10^{-13} Торр, т. е. практически безмаслянный вакуум при давлении на форвакууме 0,01–0,1 Торр, соответствующем остаточному давлению большинства насосов с масляным уплотнением.

Основные недостатки ТМН:

- обилие движущихся частей, подвергающихся высоким нагрузкам, сложная электротехника в блоке питания, высокоскоростной электродвигатель и, как следствие, высокая цена ТМН;
- сложность ремонта;
- наличие масла;

- достаточно длительное время на разгон и торможение ротора;
- потребность в предварительном разрежении;
- не очень низкое предельное давление.

1.5.3.2. Пароструйные насосы

Откачивающее действие пароструйного насоса основано на увлечении удаляемого газа струей пара. В зависимости от скорости и плотности струи и давления газа изменяется как режим истечения струи из сопла, так и механизм захвата удаляемого газа.

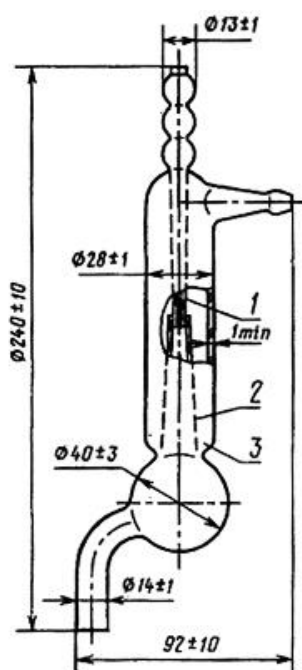
Чем выше давление откачиваемого газа, тем большей должна быть плотность используемого в насосе рабочего тела. При высоких давлениях увлечение газа происходит в результате турбулентно-вязкостного перемешивания вихрей потока рабочего вещества с частицами газа (эжекторные насосы) и вязкостного захвата газа в ламинарную струю (бустерные насо-

сы). При очень низких давлениях, когда свободный пробег молекул газа велик по сравнению с геометрическими размерами насоса, работает диффузионный механизм проникновения молекул газа в поток пара. В этом случае плотность струи должна быть малой, а ее скорость большой для эффективной передачи импульса молекулам газа.

Эжекторные насосы

Насосы этого типа работают при давлениях, соответствующих вязкостному режиму откачки, и используют внутреннее трение между слоями откачиваемого газа.

Типичный представитель класса — водоструйный насос (рис. 1.45), часто используемый в медицине. Струя воды под давлением водопровода подается в узкую трубку-сопло, приобретает



1 — сопло; 2 — диффузор; 3 — корпус

Рис. 1.45. Эскиз стеклянного водоструйного насоса: боковой патрубок соединяется с откачиваемым объемом, верхний с водопроводом, а через нижний происходит слив воды, насыщенной пузырьками откачанного газа

большую скорость и, проходя зазор между срезами сопла и встречно расположенной трубки-диффузора, увлекает окружающий газ за собой. В нижней части насоса вода несет пузырьки откачиваемого газа. Для данного типа насоса величина предельного вакуума — порядка 10 Торр.

Для паромасляного или пароструйного эжекторного насоса рабочим телом является специально создаваемый поток паров, а происходящие при откачке процессы можно описать с использованием *закона Бернулли* — давление в быстродвижущемся потоке ниже, чем в покоящемся.

По общей схеме построения пароструйные насосы (рис. 1.46) близки к водоструйному.

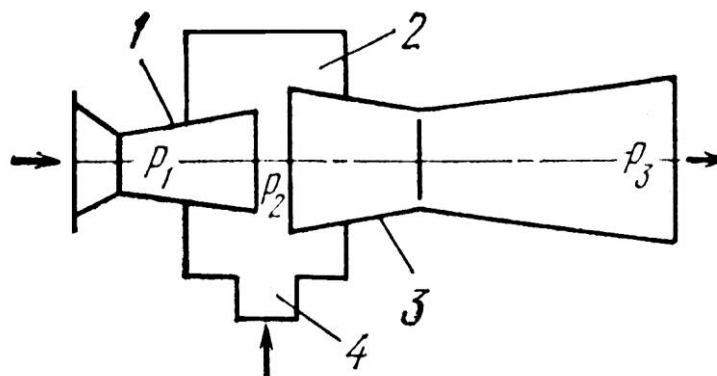


Рис. 1.46. Схема пароструйного эжекторного насоса: 1 — сопло; 2 — камера смешения; 3 — диффузор; 4 — патрубок, присоединяемый к откачиваемому объему

Рабочее тело (пар) подается в сопло при давлении несколько выше атмосферного. Расширяясь в сопле, пар совершает работу, его давление падает, в результате чего в струю затягиваются откачиваемые газы и образовавшаяся смесь выбрасывается в выхлоп. Изоляция откачиваемого объема от объема выхлопа осуществляется самой струей, заполняющей все выпускное сопло-диффузор. Предельное давление, обеспечиваемое такими насосами сравнительно высоко — 10^{-4} Торр.

Диффузионные насосы

Простейший диффузионный насос устроен практически так же как эжекторный (рис. 1.47). Отличие состоит в объемном характере взаимодействия газа с потоком пара. Для реализующихся в данном случае усло-

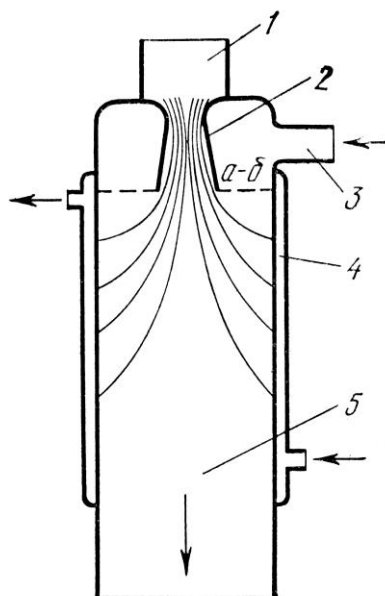


Рис. 1.47. Схема простейшего диффузионного насоса:

- 1 — паропровод; 2 — сопло;
- 3 — впускной патрубок;
- 4 — холодильник;
- 5 — выпускной патрубок

на ней, а молекулы откачиваемого газа продолжают свое движение в сторону выпускного патрубка, откуда они откачиваются насосом предварительного разряжения. Конденсат рабочей жидкости со стенки холодильника стекает в испаритель и вновь включается в рабочий цикл насоса.

Многоступенчатый диффузионный насос (рис. 1.48, а) является своего рода реализацией последовательного соединения нескольких диффузионных насосов в одном корпусе. В таком насосе обычно применяют общий испаритель и общий паропровод для питания сопел отдельных ступеней. Пар проходит по паропроводу и выходит в откачиваемый

вий длина свободного пробега больше размеров устройства, и взаимодействие откачиваемого газа с рабочим телом насоса имеет вид парных столкновений молекул.

Пар рабочей жидкости поступает из испарителя в паропровод 1 и далее в расширяющееся сопло 2. Молекулы откачиваемого газа через патрубок 3 поступают в кольцевой зазор (а-б) между соплом и корпусом и диффундируют в струю пара рабочей жидкости. В результате столкновения с молекулами пара молекулы газа приобретают преимущественное направление движения в сторону выпускного патрубка 5. Смесь рабочего пара с газом попадает на охлажденную стенку холодильника 4. При этом пар конденсируется

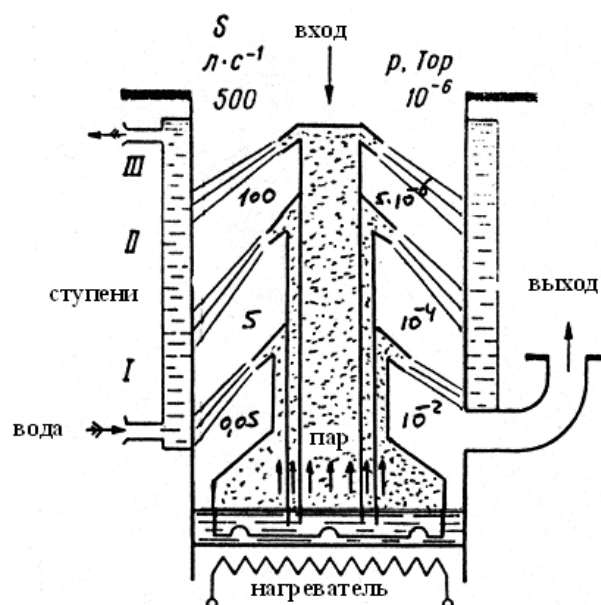


Рис. 1.48, а. Схема трехступенчатого паромасляного насоса

мое пространство через *кольцевое тарельчатое сопло*, которое разворачивает струю пара на 180° и направляет ее вдоль внешней стороны паропровода. Молекулы газа диффундируют в струю пара и уносятся вместе с ним к стенке корпуса насоса; пар конденсируется на охлаждаемой водой стенке, а газ, который теперь имеет большую плотность, чем у впускного отверстия, перетекает к соплу следующей ступени, где процесс повторяется. Пройдя все ступени диффузионного насоса, газ поступает на вход механического форвакуумного насоса, с помощью которого удаляется окончательно.

Поскольку все ступени прокачивают один поток газа, их параметры должны удовлетворять условию

$$Q = S_1 p_1 = S_2 p_2 = S_3 p_3, \quad (1.61)$$

где S_i — скорость откачки; p_i — давление для i -й ступени насоса. При этом чем выше давление в области ступени, тем меньше может быть скорость ее откачки при той же производительности.

Например, для пароструйного насоса с быстротой откачки $S = 100$ л/с при перепаде давлений на нем 10^{-2} – 10^{-6} Торр следует использовать форнасос с $S_{\text{фор}} = 0,1$ л/с.

Быстрота действия насоса определяется скоростью откачки первой ступени со стороны входа в насос, поэтому зазор между колпачком тарельчатого сопла и стенкой там наибольший. В то же время, струя пара играет и роль своеобразного клапана между областями с высоким и низким давлением, не допуская обратной диффузии газа.

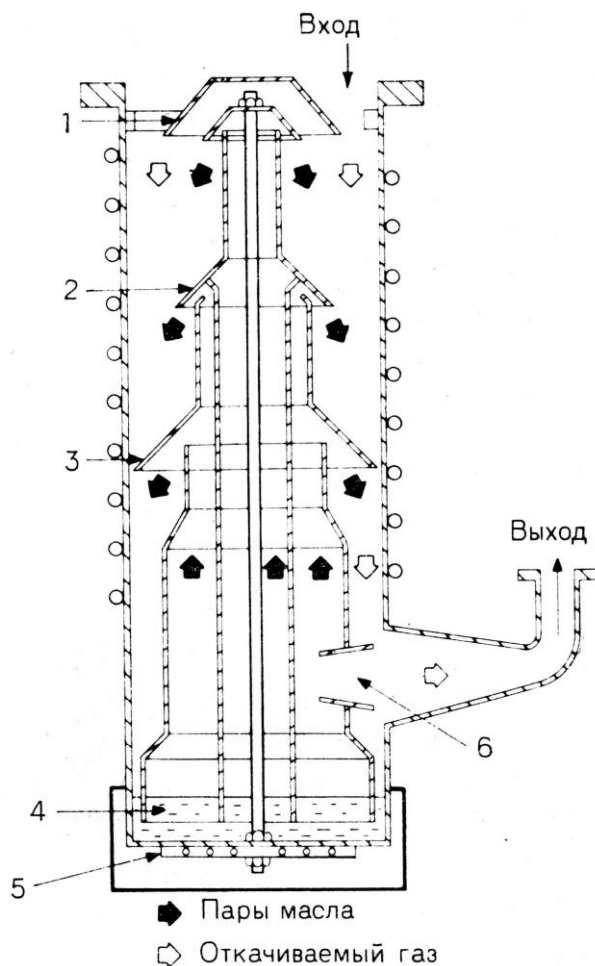


Рис. 1.48, б. Трехступенчатый диффузионный насос с эжектором:
1, 2, 3 — сопла I, II и III ступеней;
4 — рабочая жидкость;
5 — нагреватель;
6 — эжектор

Коэффициент сжатия и максимальное выпускное давление определяются нижней ступенью, поэтому рабочий зазор здесь минимален.

Иногда в качестве последней ступени ставят эжекторный насос (рис. 1.48, б), в котором вместо конического тарельчатого сопла с большой поверхностью применяют сопло (или несколько сопел) малого диаметра, дающих короткую, но плотную струю пара. Эжекторная ступень позволяет работать при более высоком давлении форвакуума.

Скорость откачки диффузионных насосов обычно оценивают в предположении, что насос откачивает все молекулы, попавшие в кольцевой зазор и соударяющиеся без отражений с молекулами пара струи. Скорость откачки в этом случае будет тем больше, чем меньше молекулярная масса газа. В действительности, быстрота откачки насоса обычно составляет 0,3–0,4 от максимально возможного значения вследствие отражения молекул газа от струи, ограниченной пропускной способности входного патрубка насоса, обратной диффузии газа и т. п. Примеры диффузионных насосов показаны на рис. 1.49.



Рис. 1.49. Внешний вид отечественного диффузионного насоса компании «Гидромех» НВДМ-100 (а) (скорость откачки — 340 л/с, предельное давление — $6,6 \cdot 10^{-7}$ Торр), диффузионного насоса компании Varian HS2 (б) (скорость откачки — 340 л/с, предельное давление — $5 \cdot 10^{-8}$ Торр)

К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляются следующие требования:

- большой молекулярный вес, необходимый для эффективной передачи импульса молекулам всех откачиваемых газов;
- минимальная упругость паров при комнатной температуре, определяющая наименьшее предельное давление;
- максимальная упругость пара при рабочей температуре в кипятильнике и малая теплота парообразования — для увеличения выпускного давления и снижения требуемой мощности подогревателя;
- стойкость к разложению при нагревании, химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам и по отношению к материалам насоса, позволяющая увеличить срок службы как рабочей жидкости, так и самого насоса;
- минимальная способность растворять газы — для уменьшения обратного потока газов.

В качестве рабочей жидкости пароструйных насосов применяются ртуть, минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот, кремнеорганические соединения.

Ртуть как рабочая жидкость пароструйных насосов имеет следующие достоинства: большой атомный вес, 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 (около 10^{-3} Торр).

Минеральные масла для пароструйных насосов (ВМ-1, ВМ-5) получают путем вакуумной дистилляции продуктов переработки нефти. Они характеризуются низкой упругостью пара при комнатной температуре (10^{-8} Торр), 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 себаценовой кислот с высшими спиртами, а также полифениловые соединения, состоящие из бензольных радикалов, соединенных в цепи через атомы кислорода. Полифениловые эфиры ПФЭ обладают очень низким давлением паров

при комнатной температуре (10^{-11} Торр) и высокой термоокислительной стойкостью, но довольно дороги.

Кремнеорганические жидкости для пароструйных насосов (ВКЖ-94, ПФМС-2) — это полисилоксановые полимерные соединения, состоящие из функциональных групп $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$. Они обладают высокой термоокислительной стойкостью и достаточно низкой упругостью пара при комнатных температурах (10^{-7} Торр).

Чаще всего в насосах используют дешевые минеральные масла. Кремнеорганические жидкости употребляются в системах с частым напуском атмосферного воздуха. Эфиры, стоимость которых еще велика, применяются для систем, где требуется получение сверхвысокого вакуума. Ртуть из-за токсичности применяется в пароструйных насосах только для откачки ртутных систем, например, ртутных выпрямителей.

Преимущества диффузионных насосов:

- высокая скорость откачки (200–1500 л/с) при небольшом энергопотреблении;
- неприхотливость по отношению к электропитанию, отсутствие электроники;
- отсутствие движущихся частей, легкость ремонта, возможность кустарного изготовления устройства с требуемыми характеристиками (на стекле);
- откачиваемый газ выбрасывается наружу, т. е. отсутствует «эффект памяти» и ресурс непрерывной работы не ограничен;
- способность откачивать любые вещества, кроме очень химически активных, в том числе инертные газы;
- малая стоимость;
- достаточно низкое для столь дешевой конструкции предельное давление (до 10^{-6} Торр, а при некоторых ухищрениях и еще лучше).

Недостатки:

- так или иначе, следы рабочего вещества попадают в прибор; приходится выбирать между ртутью и маслом — и то, и другое плохо для качества вакуума, а ртуть еще и вредна для здоровья;
- длительное время включения и выключения (определяется нагреванием и остыванием), из-за которого насос плохо стыкуется с другим откачным оборудованием;

- при аварийном напуске атмосферы рабочее вещество разлетается по всему прибору, а масло еще и окисляется, превращаясь в трудноудаляемую смолу;

- при аварийном исчезновении электропитания (при этом прекращается предварительная откачка, если нет форколбы) или водоснабжения (охлаждение холодильника) рабочее вещество также может разлететься по всему прибору раньше, чем нагреватель диффузионного насоса успеет остыть;

- получаемый вакуум недостаточно хорош по нынешним меркам, а использование такого насоса в качестве предварительной ступени для сверхвысоковакуумных насосов не всегда оправдано (из-за потока рабочего вещества и из-за возможности испачкать маслом дорогое оборудование при аварии).

Применение. В научном эксперименте диффузионные насосы используют все реже. Однако они широко используются в технологическом оборудовании и аналитических приборах, что связано с их дешевизной (по сравнению с альтернативными насосами) и разработкой новых масел с низкой упругостью паров. Поэтому большинство крупнейших мировых производителей вакуумного оборудования продолжают выпускать диффузионные насосы и в настоящее время.

1.5.4. Насосы поверхностного действия

Принцип работы насосов поверхностного действия заключается в искусственном смещении равновесия процессов адсорбции или конденсации, с одной стороны, и десорбции или испарения, с другой. В соответствии с реализуемым механизмом, насосы поверхностного действия разделяются на *адсорбционные* (использующие механизмы физической адсорбции–десорбции) и *криогенные* (использующие механизм конденсации–испарения). Поверхность и объем прибора обычно находятся в состоянии, близком к равновесному — число частиц, оседающих в единицу времени на единице площади поверхности ν_+ , близко к плотности потока покидающих поверхность частиц ν_- :

$$\nu_- = \nu_+ . \quad (1.62)$$

Скорость ухода частиц с поверхности можно выразить формулой:

$$\nu_- = \frac{N}{\tau_0} \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1.63a)$$

где N — концентрация частиц данного сорта на поверхности, имеющей температуру T , τ_0 — период тепловых колебаний этих частиц при данной температуре, E — энергия связи частиц с поверхностью. Скорость прихода частиц описывается выражением

$$\nu_+ = \frac{f \cdot p}{(2\pi \cdot m \cdot kT_z)^{1/2}}, \quad (1.63b)$$

где f — коэффициент прилипания (адгезии) молекул с массой m , T_z — температура газа. T_z может отличаться и от температуры поверхности, и от комнатной температуры, но этим обычно можно пренебречь, поскольку зависимость интересующих нас величин от T_z все равно является слабой.

Используя (1.62) и (1.63), можно оценить равновесное давление в вакуумной системе

$$p = \nu_+ \sqrt{2\pi mkT} = f \frac{N}{\tau_0} \sqrt{2\pi mkT} \cdot e^{-\frac{E}{kT}}. \quad (1.64a)$$

Поверхностная концентрация частиц N в процессе их адсорбции или конденсации на чистой поверхности возрастает только до тех пор, пока не сформируется монослойное покрытие. Дальнейший рост поверхностной пленки происходит за счет увеличения ее толщины, а не N . Поэтому основную роль в снижении парциального давления в системе (т. е. в откачке данного сорта газа или пара) играет понижение температуры, точнее, увеличение отношения E / kT в показателе экспоненты.

Для приближенных оценок ожидаемого значения давления можно принять для всех веществ $f = 1$, $N \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $\tau_0 \approx 10^{-13} \text{ с}$. Тогда

$$p [\text{Торр}] = 2,85 \cdot 10^5 \sqrt{MT} \cdot e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (1.64b)$$

где M — молекулярный вес в атомных единицах массы.

Энергия связи E молекул со стенкой определяется как сортом остаточного газа, так и свойствами поверхности, а также типом связи (конденсация, физическая адсорбция, абсорбция, хемосорбция). Поэтому скорости откачки по разным газам для насосов поверхностного действия сильно от-

личаются друг от друга — гораздо сильнее, чем в случае механических и пароструйных насосов. Кроме того, скорость откачки не одинакова для насосов поверхностного действия различных типов. Для сравнения напомним, что средняя тепловая энергия kT при комнатной температуре составляет 0,025 эВ, при температуре жидкого азота (77 К) — 0,0067 эВ, а при температуре жидкого гелия (4,2 К) — 0,00036 эВ.

В табл. 1.6 приведены значения энергии физической адсорбции (осаждения на чистую поверхность материала стенки) E_a и энергии конденсации (осаждения на слой газовых молекул) E_k для газов, определяющих остаточное давление в вакуумных системах. Неоднозначность определения энергии адсорбции вызвана различием значений этой величины для различных поверхностей.

Таблица 1.6

**Значения энергий связи молекул с поверхностью
и соответствующие им равновесные давления (в Торр)**

	масло	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	CO	O ₂	N ₂	H ₂	Ar	Ne	He
E_k , эВ	1,171	0,469	0,262	0,095	0,065	0,071	0,058	0,009	0,068	0,019	$8,6 \cdot 10^{-5}$
P	78 К	0	$5,7 \cdot 10^{-24}$	$2 \cdot 10^{-10}$	7,4	—	—	—	—	—	—
	4,2 К	0	0	0	0	0	0	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0	$4,3 \cdot 10^{-17}$	—
E_a , эВ	0,993	0,954	0,291– 0,343	0,187	0,130	0,130– 0,208	0,117– 0,199	0,095	0,152	0,043	0,022
P	$T_{\text{комн}}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$8,3 \cdot 10^{-10}$	322–41	—	—	—	—	—	—	—
	78 К	0	0	$1,2 \cdot 10^{-5}$ – $2,7 \cdot 10^{-12}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$ – $5,3 \cdot 10^{-7}$	0,37– $1,9 \cdot 10^{-6}$	63	$2,5 \cdot 10^{-3}$	—

Эти данные позволяют оценить по формуле (1.64б) соответствующие значения равновесного давления, т. е. эффективность откачки указанных газов.

Такие оценки были проведены для двух наиболее часто встречающихся на практике температур: в случае конденсации это температуры жидкого азота и жидкого гелия, а в случае адсорбции — комнатная температура и температура жидкого азота. Результаты этой оценки также приведены в соответствующих строках табл. 1.6 (давление указано в Торр). Прочерк в графе означает, что расчетное значение давления оказалось больше атмосферного и, соответственно, в данном случае откачки за счет связывания молекул газа на поверхности не происходит.

Из табл. 1.6 видно, что в случае криогенной откачки при температуре жидкого азота надежно «вымораживаются» лишь пары масла и воды, а также углекислый газ, остальные газы практически не откачиваются. В то же время при температуре жидкого гелия надежно удаляются все газы, кроме самого гелия и водорода.

При адсорбционной откачке, очевидно, необходимо охлаждение, так как без этого из откачиваемого объема удаляются только пары масла и воды. Однако и при температуре жидкого азота остаются проблемы с инертными газами, водородом и окисью углерода. В принципе, равновесное давление можно понизить и за счет уменьшения поверхностной концентрации адсорбата N (см. формулу (1.64а)), например, путем периодического или непрерывного обновления адсорбирующей поверхности. Однако этот способ обычно реализуется лишь в сверхвысоковакуумных насосах, основанных на этом же принципе.

1.5.4.1. Адсорбционные насосы

Это название закрепилось за насосами, использующими явление физической адсорбции. Максимальное количество газа, которое может поглотить такой насос, является конечным и соответствует монослою откачиваемого газа на всей рабочей поверхности, поэтому в их составе используют пористые материалы, поверхность которых велика.

Активированные угли — пористые углеродные адсорбенты, получаемые из торфа, каменного угля, древесины (береза, кокос) и др. Исходные материалы подвергаются термической обработке без доступа воздуха для удаления воды и смол, а затем, активируются окислением при 900°C в присутствии H_2O или CO_2 . Площадь поверхности достигает $2000\text{ м}^2/\text{г}$ при плотности порядка $0,5\text{ г/см}^3$.

Цеолиты («молекулярные сита») — алюмосиликаты (природные и синтетические), содержащие, помимо SiO_2 и Al_2O_3 , также окислы щелочных и щелочноземельных металлов и большое количество кристаллизационной воды (например, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). После удаления этой воды термообработкой при $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ в веществе появляется регулярная мелкопористая структура. Диаметр пор постоянен для цеолита определенного типа, но изменяется от типа к типу в пределах от $0,5$ (цеолит марки 5А) до нескольких нм. Активная поверхность может достигать $1000\text{ м}^2/\text{г}$

при плотности порядка $0,7 \text{ г/см}^3$, т. е. в десятки тысяч раз превышать внешнюю поверхность гранулы.

Силикагель — аморфная форма гидратированного кремнезема $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, получаемая при взаимодействии силикатов щелочных металлов и минеральных кислот. При высушивании гидрогеля получается структура из сферических частиц с порами $10\text{--}70 \text{ \AA}$. Площадь поверхности — до $500 \text{ м}^2/\text{г}$ при плотности $0,7 \text{ г/см}^3$.

Конструкция типичного адсорбционного насоса показана на рис. 1.50. Активное вещество загружается в кассету, стенки которой обычно охлаждаются жидким азотом. Форма кассеты делается такой, чтобы обеспечить, с одной стороны, хорошую теплопроводность от охлаждаемой стенки ко всем частям объема активного вещества, а с другой — достаточно свободный доступ к нему молекул газа из откачиваемого объема.

Цикл работы адсорбционного насоса следующий. Сначала при закрытом вентиле, соединяющем его с вакуумной системой, производят регенерацию, т. е. восстановление сорбционной активности адсорбента. После регенерации печь заменяется сосудом Дьюара и насос охлаждается до температуры жидкого азота, при которой насос способен производить откачку. При насыщении адсорбента откачиваемым газом производят его повторную регенерацию, для чего насос предварительно отделяется вентилем от откачиваемого объема. Во время прогрева насоса необходимо удалять из системы выделяющийся газ. Если насос при этом закрыть, давление в нем может намного превысить атмосферное. Чтобы насос не разрушился, в нем обязательно предусматривается клапан избыточного давления, выпускающий избыточный газ наружу. Допустимое количество регенераций достигает нескольких сотен. Если перед очередной

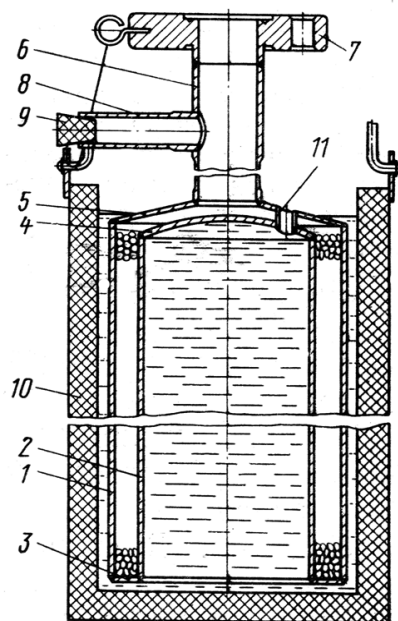


Рис. 1.50. Цеолитовый адсорбционный насос:
1 — внешний цилиндр;
2 — внутренний цилиндр;
3 — днище; 4, 5 — верхнее днище; 6, 8, 11 — патрубки; 7 — фланец; 8 — патрубок; 9 — пробка; 10 — сосуд Дьюара

откачкой не проводить регенерацию, то установившееся остаточное давление будет примерно на порядок выше.

Часто откачиваемый сосуд снабжается двумя цеолитовыми насосами, подключенными параллельно. Это обеспечивает непрерывность откачки: в то время как один из насосов откачивает объем, в другом производится регенерация адсорбента.

Изготавливают насосы *погружного* и *заливного* типов, различающиеся технологией обращения с охладителем.

Первые предназначены, в основном, для кратковременной работы — теплоизоляция хладагента здесь хуже, но зато его потери при первичной заливке насоса минимальны, а избыток после окончания откачки можно слить обратно в сосуд Дьюара.

В заливных насосах азот располагается в объеме, теплоизолированном создаваемым насосом вакуумом (т. е. аналогичном сосуду Дьюара), поэтому потери хладагента при длительной работе минимальны и определяются, в основном, теплом, выделяющимся при поглощении откачиваемого газа. В заливных насосах используется, как правило, активированный уголь. Этот материал электронейтральный, и адсорбция газа на его поверхности обусловлена дисперсионными силами взаимодействия, ее энергия ниже, чем для цеолита, где поверхность полярна, и силы взаимодействия поляризационные. Казалось бы, это говорит в пользу цеолитов: газ на их поверхности держится прочнее. Но на самом деле при температуре жидкого азота (а других хладагентов не используют) энергия связи с углеродной поверхностью вполне достаточна для эффективной откачки. Зато после окончания процесса откачки, когда надо удалить накопленный газ, для насоса с угольным наполнением достаточно нагрева до комнатной температуры, тогда как цеолитовый насос требуется прогреть до 200–500° С специальной электропечкой.

Вообще говоря, при не очень большом объеме вакуумной камеры ($w/v \sim 10^{-4}$ г/см³, если, например, $v \leq 100$ л, а $w \sim 1$ кг) возможна ее откачка адсорбционным насосом «с атмосферы». Таким образом может быть достигнуто давление порядка 10^{-2} Торр, причем большую часть остаточного газа составит неон (рис. 1.51). Этот газ откачивается исключительно плохо, особенно при высокой степени покрытия поверхности адсорбента более активными газами. Из рис. 1.51, в частности, видно, что при уменьшении

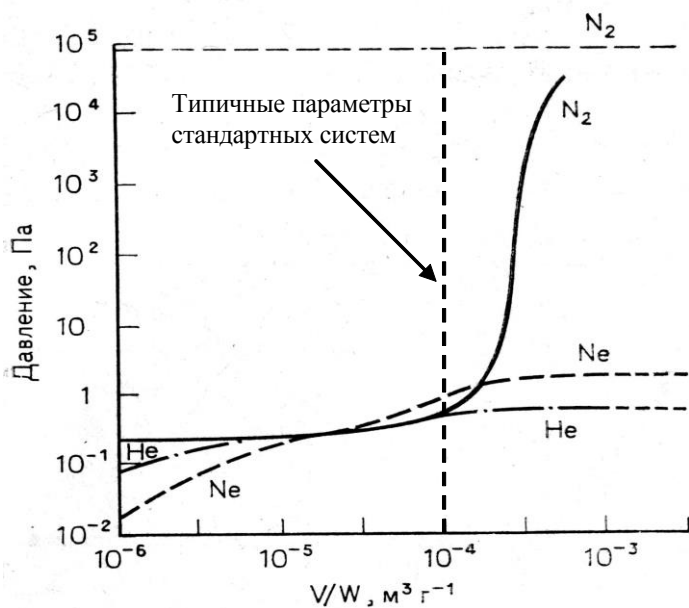


Рис. 1.51. Зависимости равновесных давлений для He, Ne, и N₂ от V/W: V — откачиваемый объем; W — масса цеолита (цеолит марки 5A при T=78 К; ---- парциальные давления газов в атмосферном воздухе)

давления азота на 6 порядков (до 10^{-3} Торр), давление неона падает лишь на порядок (до $5 \cdot 10^{-3}$ Торр). Давление гелия при этом ниже просто потому, что его меньше в атмосфере.

Остающийся в объеме газ можно попытаться откачать вторым таким же, но «чистым» насосом. Повторная адсорбционная откачка позволит снизить давление азота до 10^{-7} Торр, а неона — еще на порядок, до $5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Для многих практических приложений наличие в системе инерт-

ных газов не слишком важно, и такой вакуум может оказаться вполне приемлемым. Однако дальнейшее повторение процесса откачки не даст эффекта, так как давление неона уменьшаться при этом уже не будет.

Если поступиться принципом *безмасляной откачки*, предельные давления, достижимые с помощью адсорбционного насоса, можно существенно понизить. Откачав хотя бы до 0,1 Торр вакуумную камеру и сам адсорбционный насос механическим форнасосом, неизбирательным к составу газа, мы уменьшим парциальное давление неона на 4 порядка (до $5 \cdot 10^{-6}$ Торр) еще до начала работы адсорбционного насоса. Работа механического насоса при этом может быть кратковременной, откачка будет происходить в вязкостном режиме, и поступление паров масла в камеру будет небольшим. Кроме того, адсорбционный насос эффективно улавливает пары масла, и сам служит в качестве поглощающей ловушки. Такие адсорбционно-механические системы были созданы, и рекордное давление, полученное с их помощью, составило порядка 10^{-8} Торр. Однако такие рекорды не имеют большого практического смысла. Основной областью использования адсорбционных насосов остается создание предварительного разре-

жения для более производительных магниторазрядных и криогенных насосов.

Адсорбционные насосы при работе постепенно деградируют. Каждый цикл откачки приводит к дополнительному растрескиванию рабочего вещества с выделением мелкодисперсной пыли, которая, попадая в вакуумную систему, может стать источником проблем, например, не позволяя вакуумным вентилям закрываться до конца. Поэтому вход адсорбционного насоса закрывают фильтром из пористого вещества — обычно из спеченного медного порошка («пористая медь»). Другая причина деградации рабочего вещества — поглощение плохо откачиваемых масел и других подобных веществ, закрывающих поры сорбента. Поэтому рабочее вещество время от времени приходится заменять.

Достоинства сорбционных насосов:

- возможность безмасляной откачки в широком диапазоне давлений, начиная от атмосферного;
- отсутствие источников питания и механически движущихся элементов;
- простота, надежность, дешевизна.

Недостатки:

- ограниченная сорбционная емкость, в результате чего скорость откачки зависит от предыстории;
- необходимость периодически прогревать насос для восстановления его работоспособности;
- избирательность откачки, низкая эффективность откачки по неону, водороду и гелию, то есть по тем же газам, что и у обычно работающих в паре с ним криогенных и электрофизических насосах;
- постоянная потребность в жидком азоте;
- возможность запыления вакуумной системы продуктами разрушения адсорбента.

Резюме: адсорбционные насосы — это очень полезные и широко используемые насосы. В лабораторной практике они создают реальную альтернативу ТМН, имеют перед ними ряд преимуществ (дешевизна, простота, надежность), особенно при коротких циклах откачки.

1.5.4.2. Криогенные насосы

В этом типе насосов откачка происходит в результате конденсации газов на рабочей поверхности (криопанели). Криопанель охлаждают обычно до температуры кипения гелия 4,2 К, что позволяет конденсировать на ней почти все газы, кроме самого гелия и водорода (табл. 1.6). Поскольку в данном случае используется явление конденсации, а не адсорбции, то при осаждении на криопанели монослоя газа насыщения не происходит и поглощающая способность (емкость) насоса очень велика. Ограничение на толщину слоя конденсата обусловлено лишь уменьшением его теплопроводности и, как следствие, повышением температуры рабочей поверхности. В вакууме этот процесс происходит достаточно медленно: даже при давлении 10^{-4} Торр (и потоке газа 10^{-3} л·Торр/с на см²) за 300 часов откачки накапливается слой конденсата в 1,5 мм, что при тепловой нагрузке 50 Вт/м² повышает температуру поверхности приблизительно лишь на градус. В то же время, если насос начинает работу при атмосферном давлении, то уже за несколько секунд на поверхности криопанели образуется настолько толстый слой конденсата, что ее откачивающее действие прекращается. Поэтому для наиболее эффективного использования криогенных насосов необходимо обеспечить достаточно высокий предварительный вакуум с помощью насосов другого типа.

При создании крионасосов одной из основных задач является снижение потока тепла на криопанель. Приведенный пример показывает, что это необходимо не только для снижения расхода гелия, но и для увеличения времени непрерывной работы насоса. Основное достоинство крионасоса, выгодно отличающее его, например, от диффузионного или ТМН — очень большая скорость откачки, близкая к предельной величине 11,6 л/с на квадратный сантиметр площади криопанели (рабочая поверхность связывает практически весь падающий на нее газ). Другое достоинство — полное отсутствие привносимых насосом загрязнений.

Крионасосы могут быть как встроены в откачиваемую систему для обеспечения максимальной скорости откачки, так и присоединяться к ней через фланцы и вакуумпровод. Типичная конструкция крионасоса наливного типа показана на рис. 1.52. Криопанель 1 здесь образована нижней стенкой гелиевой емкости, посеребренной для снижения поглощаемой из

окружающей среды тепловой мощности. Со всех остальных сторон гелиевая емкость окружена (через вакуумный промежуток) резервуаром с жидким азотом. Охлаждаемый азотом шевронный отражатель 2 не только снижает поток тепла на криопанель, но и перехватывает молекулы легко конденсирующихся паров.

Изображенный насос диаметром 800 мм (уменьшенный вариант — 320 мм) имеет емкость гелиевого резервуара 75 (10) л, обеспечивает скорость откачки по водороду 30 (4,5) м³/с (по азоту — в 3–4 раза меньше), предельное давление порядка 10^{-13} Торр. Рас-

ход жидкого гелия, определяющий стоимость эксплуатации системы — 5–10 (1–2) л на первичную заливку и 1 (0,25) л/сутки в установившемся режиме. При этом необходимый расход жидкого азота, как показывает практика, примерно в 20 раз превышает расход гелия. Примеры внешнего вида криогенных насосов показаны на рис. 1.53.

Крионасосы могут оснащаться автономным ожижителем гелия, тогда гелий в них циркулирует по замкнутому циклу. Для небольших насосов такие системы могут иметь мощность всего несколько Ватт. Именно для небольших систем замкнутый цикл наиболее важен из-за относительно больших потерь гелия в результате худшей теплозащиты. Другая крайность — системы откачки больших физических машин, создаваемые под конкретную установку, например, для токамака *JET*. Каждая инжекторная камера этого токамака откачивалась двумя блоками по 10 модулей с характерными размерами $6 \times 0,35$ м². Быстрота откачки каждого блока (по водороду) 5000 м³/с, при этом потребляемая мощность на охлаждение гелие-

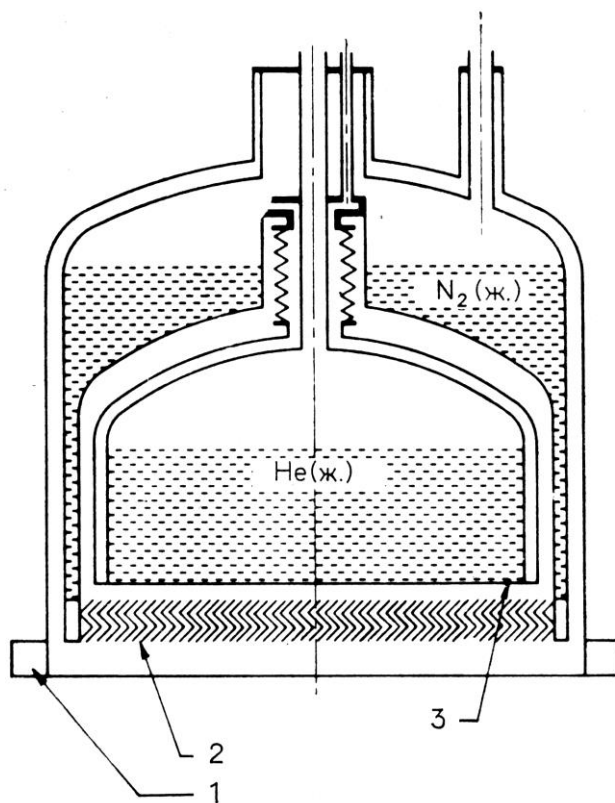


Рис. 1.52. Фланцевый наливной крионасос: 1 — соединительный фланец; 2 — шевронный отражатель тепла; 3 — криопанель

вых панелей блока составляла ~40 Вт, а на охлаждение азотных теплозащитных экранов — 10 кВт.



Рис. 1.53. Криогенные насосы модели CoolStar компании Ricor (а); CoolStar 3000 (б); скорость откачки, л/с: по H_2O — 9500, N_2 — 4500, H_2 — 3500, Ar — 2800; гелиевый компрессор (в)

Одна из проблем при работе с крионасосами — удаление из системы гелия и водорода. Частично она решается привлечением адсорбционного механизма откачки: криопанель или ее часть покрывают пористым оксидным слоем, который работает как адсорбент. Отчасти адсорбирующими свойствами обладают и толстые рыхлые слои конденсированных газов. Тем не менее, для удаления гелия часто приходится использовать альтернативные механизмы откачки (обычно ионную).

Достоинства криогенных насосов:

- предельно высокая скорость откачки, отсутствие привносимых насосом загрязнений и рекордно низкое предельно достижимое давление;

- простота и надежность работы, отсутствие износа и потребности в электропитании;
- высокая «сорбционная» емкость при достаточно низком начальном давлении;
- компактность и возможность установки криопанели в любом рабочем положении непосредственно в откачиваемую камеру.

Недостатки:

- высокая стоимость хладагентов (при построении замкнутых схем это, впрочем, менее существенно);
- емкость насоса хотя и велика, но ограничена, что не позволяет использовать его «с атмосферы» и требует периодического удаления конденсата другими средствами откачки;
- гелий и отчасти водород не откачиваются крионасосами и должны удаляться из системы другим способом;
- критичность к тепловым перегрузкам;
- сравнительно высокая стоимость изготовления самого насоса;
- критичность к аварийному прорыву атмосферы (взрывообразное вскипание гелия).

1.5.4.3. Геттерные насосы

Следующий тип насосов поверхностного действия — геттерные (*сублимационные*) насосы. Принцип их работы основан на поглощении неинертных газов пленками распыляемых активных металлов (*геттеров*) в результате хемосорбции или создания твердых растворов. В качестве геттеров могут быть использованы различные металлы: барий, титан, молибден, хром, цирконий и другие элементы, образующие устойчивые соединения с низкой упругостью паров со всеми компонентами воздуха, кроме инертных газов. Для распыления геттера используют методы прямого омического нагрева испаряемых проволок, косвенного лучевого нагрева специальным подогревателем, электронной бомбардировки или распыления вакуумной дугой. Пример построения геттерного насоса представлен на рис. 1.54.

Активная пленка образуется на охлаждаемом водой (реже жидким азотом) корпусе 2. Испаритель может представлять из себя, например, два слоя титановой проволоки, намотанной на танталовый или вольфрамовый

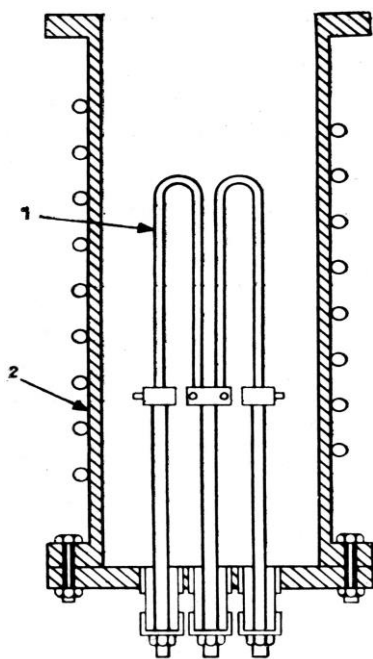


Рис. 1.54. Титановый сублимационный насос:
1 — титановый испаритель; 2 — охлаждаемый водой корпус

стержень. Характерная скорость испарения достигает нескольких мг/с. В идеале, одному монослою напыленного металла должен соответствовать один монослой поглощенного газа, то есть скорость испарения должна регулироваться в соответствии с текущим давлением остаточных газов. Технически проще всего это сделать периодическим включением и выключением накала, увеличивая длительность пауз при снижении давления газа.

Отметим, что поглощение газа пленкой при этом происходит непрерывно. Откачку производят от давления не выше 10^{-4} Торр, это ограничение обусловлено образованием плотных оксидных слоев на поверхности испаряемого вещества при больших давлениях, что приводит к уменьшению скорости испарения.

По аналогичной причине геттерные насосы плохо откачивают углеводороды. Промышленно выпускаются насосы со скоростью откачки до $200 \text{ м}^3/\text{с}$ (по водороду). Предельный вакуум — до 10^{-9} Торр; при применении охлаждения активной пленки жидким азотом возможно снижение предельного давления до 10^{-12} Торр.

Особая область применения насосов с испаряемым геттером — отпаянные электровакуумные приборы, например, электронно-лучевые трубки или мощные генераторные лампы. Распыление геттера, обычно *бария*, производят высокочастотным нагревом после первичной откачки и отпайки прибора. Пример геттерного насоса показан на рис. 1.55.

Один из основных недостатков геттерного принципа откачки — ограниченность ресурса работы. Поэтому геттерные насосы используют как бустерные — для резкого увеличения скорости откачки на ограниченное время. Другой недостаток — неспособность откачивать инертные газы. Его можно частично исправить, если использовать комбинированные геттерно-ионные насосы.



Рис.1.55. Сублимационный титановый вакуумный насос
компании Vacom. Максимальная скорость откачки (л/с на см²)
пленки титана при температуре 300/77 К: H₂ — 2,6/17;
D₂ — 3,1/6,2; H₂O — 7,3/14,6; CO — 8,2/11; N₂ — 3,5/8,2;
O₂ — 8,7/11; CO₂ — 4,4/9,3

1.5.5. Ионные насосы

Принцип ионной откачки состоит в ионизации газа, ускорении ионов электрическим полем и их внедрении в материал бомбардируемых электродов. Однако попавшие в объем металла атомы газа могут диффундировать к поверхности и возвращаться обратно в вакуум, что снижает эффективную скорость откачки. Кроме того, способность металла растворять газ конечна. При превышении предела растворимости газ начинает собираться в пузырьки, разрывающие металл — так называемый блистер-эффект (похожий эффект наблюдали все, кто когда-нибудь варил манную кашу). Порог блистер-эффекта, например, для водорода в нержавеющей стали — доли Торр л/см², что соответствует количеству газа в нескольких тысячах монослоев.

Специальных насосов, где реализовалась бы только ионная откачка, не изготавливают из-за их невысокой эффективности, малой скорости дей-

ствия и избирательности. Однако есть несколько практически важных ситуаций, где эффект ионной откачки проявляется и весьма существенен.

В частности, негативное действие ионной откачки определяет снижение ресурса электронных приборов с газовым наполнением, таких, как титратрон. Для газоразрядных приборов поддержание параметров газовой смеси при работе — одна из основных проблем.

Напротив, для отпаянных вакуумных электронных приборов откачка за счет ионизации остаточного газа электронным пучком является положительным обстоятельством. За счет натекания газа при длительном хранении их характеристики ухудшаются, но после первого же включения и нескольких часов работы они могут восстановиться, в том числе, и в результате улучшения вакуумных условий.

Ионная откачка является также побочным эффектом работы некоторых видов вакуумметров, и эта их способность активно используется при создании экспериментальных сверхвысоковакуумных систем небольшого объема: последняя стадия откачки происходит вообще без насоса, за счет работы вакуумметра, который так или иначе необходим в системе для контроля вакуумных условий.

И, наконец, ионный механизм откачки используется в ряде широко используемых на практике гетеро-ионных и магниторазрядных насосов (их часто относят к отдельному классу электрофизических насосов). Эти устройства удачно сочетают преимущества и во многом лишены недостатков насосов, использующих геттерный и ионный механизмы откачки по отдельности.

1.5.5.1. Геттеро-ионные насосы

В *геттеро-ионных насосах* используется эффект распыления поверхности при ее бомбардировке электронами или ионами, причем распыленное вещество работает как геттер, образуя активную пленку на окружающих элементах конструкции. Хемосорбция является основным механизмом удаления активных газов, обеспечивая высокую скорость их откачки. Инертные газы тоже удаляются, хотя и с меньшей эффективностью — за счет внедрения ионов в материал бомбардируемых электродов, а также «замуровывания» их под все время утолщающимся слоем наносимого геттерного покрытия.

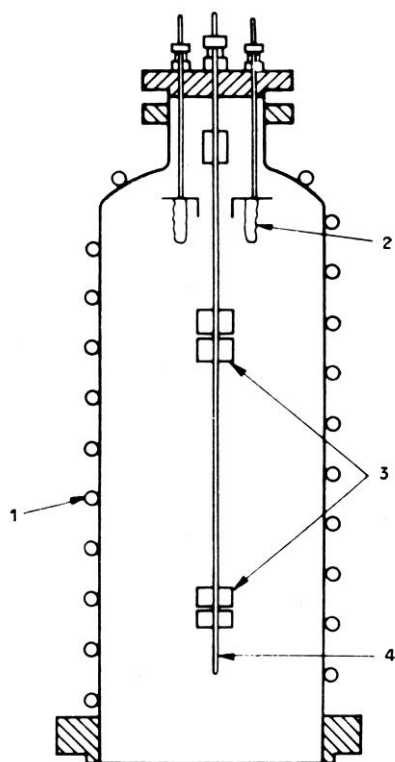


Рис. 1.56. Орбитронный насос:
1 — охлаждаемый водой корпус; 2 — катод с отражателем; 3 — геттер; 4 — вольфрамовый анод

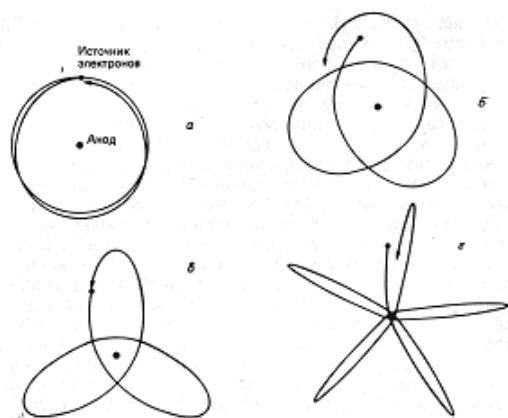


Рис. 1.57. Орбиты электронов в орбитронном насосе при различной величине тангенциальной составляющей скорости

Основное различие между геттеро-ионными и магниторазрядными насосами состоит в способе ионизации газа.

В геттеро-ионных насосах ионизация производится электронами, источником которых является накаливаемый эмиттер. Типичная конструкция, называемая *орбитронной*, показана на рис. 1.56. С термокатода 2 электроны попадают в электростатическое поле между поддерживаемым под высоким положительным потенциалом (~ 5 кВ) тонким вольфрамовым стержнем (анодом) 4 и заземленным охлаждаемым корпусом 1. Прямому попаданию электронов на анод препятствуют отражающие экраны (стержни под потенциалом катода, располагаемые между ним и анодом). В результате ускоренные электроны получают не только радиальную, но и тангенциальную составляющую скорости и переходят на траектории движения (рис. 1.57), не проходящие через ось системы — анод. Длины таких траекторий оказываются очень большими по сравнению с геометрическими размерами системы (теоретически — бесконечными), поэтому электрон просто не может попасть на анод иначе, как в результате столкновения с молекулами газа. Эффективность ионизации газа (отношение тока образующихся ионов к току эмиссии электронов) оказывается большой и почти не зависит от давления. Образующиеся в объеме системы положительные

зующихся ионов к току эмиссии электронов) оказывается большой и почти не зависит от давления. Образующиеся в объеме системы положительные

ионы бомбардируют внешний электрод и внедряются в него — так реализуется ионный механизм откачки.

Геттерный механизм реализуется в результате нагрева и испарения размещенных на аноде цилиндрических навесок титана (3 на рис. 1.56) при бомбардировке их электронами, траектории которых проходят вблизи анода. Так как диаметр навесок геттера больше диаметра стержня, основная часть электронов перехватывается именно ими и выделяет там свою энергию. Напыляемая на охлаждаемую стенку пленка титана не только связывает активные газы, но и, как уже отмечалось, «захоранивает» внедренные в материал стенки молекулы инертных газов. Показанный на рис. 1.56 орбитронный геттеро-ионный насос при диаметре 10 см и длине 25 см имеет скорость откачки около 50 л/с. Потребляемая мощность составляет около 125 Вт при токе порядка 25 мА. Насос мощностью 1,5 кВт может иметь скорость откачки 1700 л/с по азоту и 25 л/с по аргону. Предельное давление составляет 10^{-11} Торр. Для запуска насосу требуется предварительное разрежение, чтобы обеспечить молекулярный режим для газа. В принципе, насос может работать начиная с вакуума 10^{-3} Торр, хотя при таком высоком давлении скорость откачки еще низка.

Достоинства геттеро-ионных насосов:

- высокая скорость откачки, низкое значение предельного давления;
- небольшое количество создаваемых насосом загрязнений (металл не считают загрязнением, так как он не летуч и при первом же соударении со стенкой сосуда его атомы остаются на ней);
- компактность;
- отсутствие магнитных полей.

Недостатки:

- низкая надежность из-за использования накаливаемого катода;
- медленное восстановление свойств после случайного ухудшения вакуума;
- высокая потребляемая мощность;
- чрезмерно высокий расход геттера при низких давлениях из-за отсутствия механизма регулирования скорости его распыления.

1.5.5.2. Магниторазрядные насосы

Указанные недостатки гетеро-ионных систем отсутствуют у *магниторазрядных насосов*, использующих для ионизации газа так называемый пеннинговский разряд. *Ячейка Пеннинга* (рис. 1.58) представляет собой электронную ловушку, образованную, например, цилиндрическим электродом 2 под положительным потенциалом (несколько кВ) и двумя заземленными пластинами 1, перекрывающими торцы цилиндра. Вдоль оси цилиндра приложено магнитное поле с индукцией порядка 0,1 Тл.

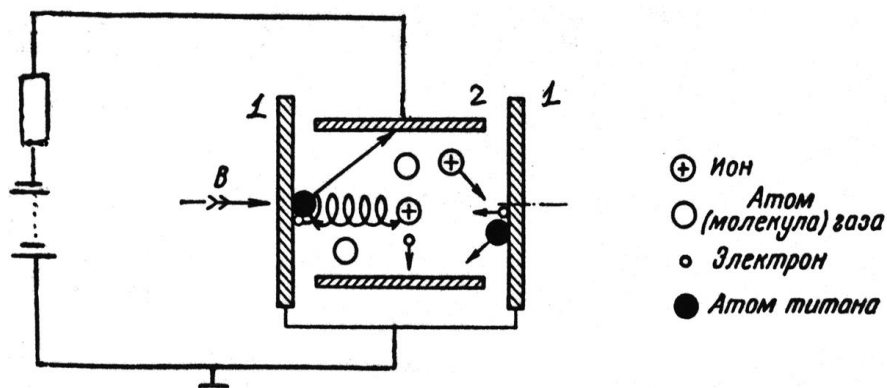


Рис. 1.58. Схема ячейки Пеннинга:

1 — торцевые катоды из титана; 2 — цилиндрический анод;
В — индукция магнитного поля

Образовавшийся внутри ячейки электрон в условиях хорошего вакуума вообще не может ее покинуть: его движение в продольном направлении ограничено электрическим полем, а в поперечном — магнитным. Магнитная система насосов по соображениям экономичности и надежности обычно выполняется на постоянных магнитах. Напряженность магнитного поля подбирается таким образом, чтобы радиус спиральной 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. Образующиеся положительные ионы слабо отклоняются магнитным полем и бомбардируют катоды, внедряясь в них (ионная откачка), а выбитые из этих ионов электроны обеспечивают непрерывное пополнение количества электронов в ловушке. Дополнительным источником электронов, необходимых для самоподдерживающегося разряда, является приход их с катодов ячейки, где они рождаются в результате вторичной ионно-электронной эмиссии. Пен-

нинговский разряд стабильно зажигается и поддерживается в широком диапазоне давлений вплоть до 10^{-11} Торр. Для его возникновения достаточно случайного присутствия в разрядном промежутке нескольких электронов. Распыление титанового катода бомбардирующими его ионами приводит к формированию постоянно обновляемой титановой пленки на окружающих катод электродах. Поскольку основная часть распыляемых частиц титана представляет собой электрически нейтральные атомы и молекулы, они осаждаются на все поверхности электродов, но в основном на анод. Активные газы, попадая на непрерывно возобновляемую пленку титана, хемосорбируются ею (геттерный механизм откачки). Катоды также поглощают газы, но из-за постоянного распыления большей части их поверхности вклад катодов в процесс откачки активных газов незначителен. Количество распыляемого металла приблизительно пропорционально току разряда (и, следовательно, давлению газа); это означает, что распыление металла саморегулируется в зависимости от текущего состояния вакуума. Величина разрядного тока является в некоторой степени мерой давления в откачиваемой системе.

Увеличения скорости откачки обычно достигают параллельным соединением большого числа описанных ячеек. Обычно анод имеет ячейковую конструкцию (наподобие восковых пчелинных сот), а катод состоит из двух титановых пластинок, расположенных по обе стороны анода. Например, диодный магниторазрядный насос *НМДО-0,25* включает в себя 6 пар катодных пластин размером 10×40 см, на каждой из которых находится по 152 пеннинговских ячейки (соты). Полная скорость откачки системы этим насосом достигает 250 л/с при давлении 10^{-5} Торр, а предельное давление — не хуже $5 \cdot 10^{-9}$ Торр. Давление запуска составляет $5 \cdot 10^{-2}$ Торр, так как при больших давлениях мощность разряда слишком велика, что приводит к перегреву насоса. Ресурс работы насоса хотя и ограничен (определяется выработкой титановых катодных пластин вплоть до образования дыр), но все же достаточно велик и составляет около 40000 часов при давлении 10^{-6} Торр.

Рабочие параметры насоса существенно зависят от его предыстории: суммарной наработки, режимов работы и рода откачиваемого газа. В процессе откачки рабочие поверхности со временем покрываются порошком и чешуйками соединений титана, способными к автоэмиссии, что увеличи-

вает ток разряда насоса и негативно сказывается на предельном вакууме. Это же обстоятельство определяет чувствительность насоса к расположению в пространстве — желательна вертикальная ориентация пластин, чтобы образующиеся на них порошок и хлопья не накапливались на поверхности, а осыпались на дно. Свойства насыщенных примесями поверхностей могут быть частично восстановлены прогревом насоса до 300–500° С при внешней откачке.

Отдельную, весьма серьезную проблему для магниторазрядных насосов представляет откачка инертных газов. То, что ионы инертных газов внедряются в катод, не решает проблему, поскольку сама поверхность катода при работе постепенно распыляется, и поглощенные ею газы высвобождаются. Особенно резко этот эффект проявляется в виде так называемой аргоновой неустойчивости. Ее механизм состоит в следующем. Если по каким-то причинам часть замурованного ранее аргона поступила в объем, давление в системе возрастет. В результате возрастают ток разряда и выделяемая на электродах мощность. Рабочие поверхности разогреваются, что еще более усиливает выход аргона в объем и т. д. Этот процесс носит лавинообразный характер и сопровождается периодическими всплесками давления, в паузах между которыми аргон снова откачивается. Подобный эффект наблюдается и с другими инертными газами, не откачиваемыми по геттерному механизму. В целом же скорость откачки инертных газов в таком диодном магниторазрядном насосе не превышает нескольких процентов от скорости откачки активных газов. Параметры диодных магниторазрядных насосов приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

**Относительная быстрота действия диодных
магниторазрядных насосов по разным газам**

Газ	Быстрота действия, %	Газ	Быстрота действия, %
Водород (H ₂)	250–350	Азот (N ₂)	100
Метан (CH ₄)	300	Двуокись углерода (CO ₂)	85
Аммиак (NH ₃)	170	Кислород (O ₂)	55
Этиловый спирт (C ₂ H ₅ OH)	135	Гелий (He)	10–20
Пары воды (H ₂ O)	130	Аргон, криптон, неон (Ar, Kr, Ne)	1–4

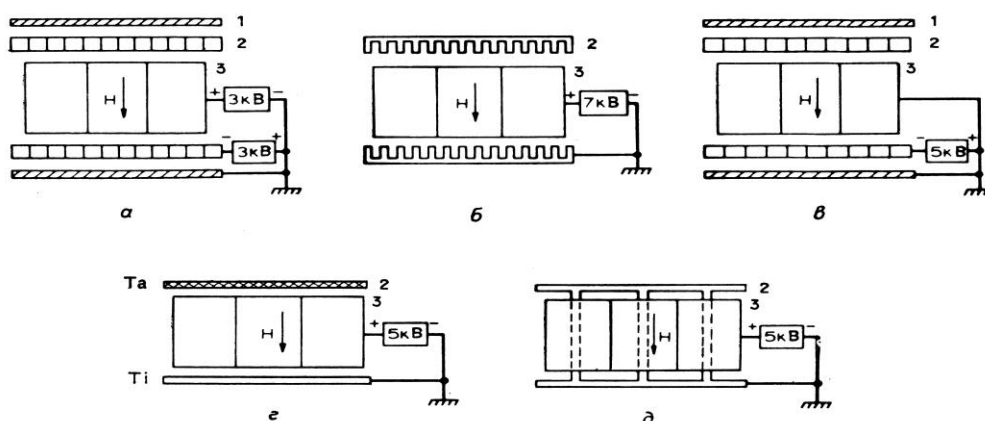


Рис. 1.59. Усовершенствованные виды и схемы подключения магниторазрядных ячеек: (а, б) — триодный насос; (в) — диодный насос с ребристым катодом; (г) — магнетронный насос: 1 — коллектор; 2 — катод; 3 — анод

Для увеличения скорости откачки была предложена триодная конструкция (рис. 1.59, а). Катодные пластины в такой системе имеют отверстия по оси ячеек Пеннинга, за которыми располагается дополнительный электрод (обычно это корпус насоса). Потенциал дополнительного электрода устанавливают промежуточным между потенциалами катода и анода, чтобы приходящие на этот электрод ионы могли внедряться в него, но не могли ее распылять. Та часть ионов, которая все же бомбардирует катод, приходит на поверхность его отверстий под скользящими углами и эффективно распыляет титан, который наносится на нераспыляемую поверхность дополнительного электрода и окончательно замуровывает захваченные там атомы. Для такой системы скорость откачки по инертным газам оказалась сравнимой со скоростью откачки по азоту. Впоследствии оказалось, что от потенциала дополнительного электрода почти ничего не зависит — даже если соединить его с анодом (рис. 1.59, б), скорость откачки практически не изменяется. Это объясняют высокой эффективностью перезарядки (нейтрализации) ионов инертных газов при почти упругом отражении под скользящими углами от металлической поверхности катода. Образующаяся быстрая нейтраль способна внедряться в дополнительный электрод вне зависимости от его потенциала (рис. 1.60).

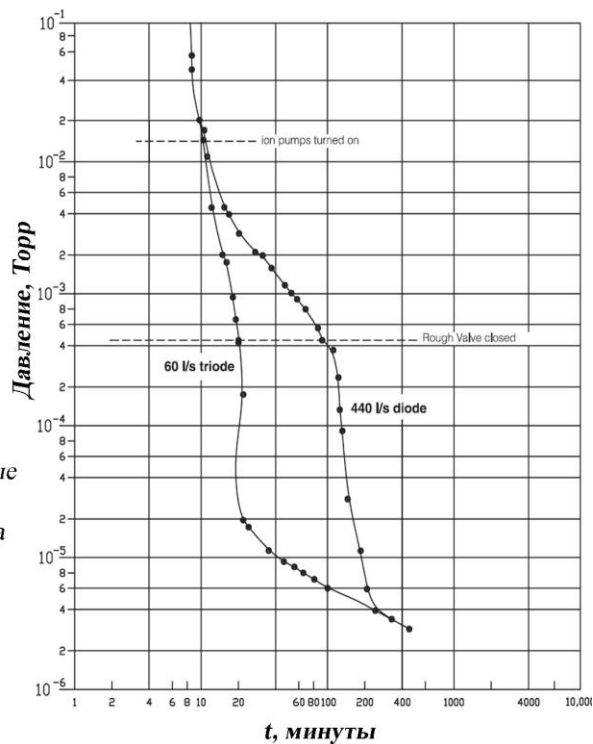
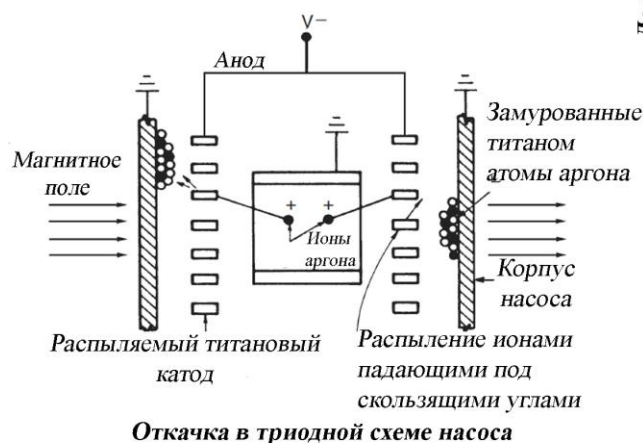
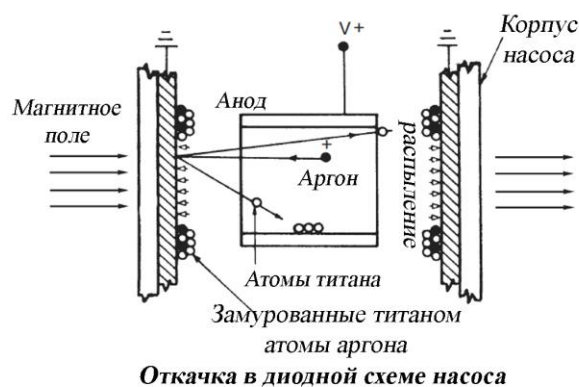


Рис. 1.60. Механизм откачки аргона в диодной и триодной схеме магниторядного насоса (а), времена откачки большого вакуумного объема насосами диодной и триодной схемы (б)

Некоторым эрзац-вариантом триодной схемы можно считать диодную систему с ребристым катодом (рис. 1.59, в), для которой скорость откачки инертных газов составляет 5–10 % от скорости откачки азота.

Еще одно возможное усовершенствование системы — так называемый *магнетронный* насос. Представим себе, что в диодной ячейке Пеннинга катоды соединены осевым титановым стержнем (рис. 1.59, з). Получающаяся магнетронная ячейка способна поддерживать стабильный ток разряда без использования накаливаемых элементов при еще более низких давлениях — до 10^{-12} Торр. Более 90 % ионного тока в системе приходит на центральный стержень, и он эффективно распыляется (тем более что большинство ионов приходят под скользящими углами). На катодные пластины ионы приходят с небольшими энергиями, недостаточными для их распыления, и эффективно замуровываются распыляемым с центрального

стержня титаном. Скорость откачки по инертным газам составляет порядка 15 % от скорости по азоту. На самом деле, это неплохой результат, поскольку обычно в исходной откачиваемой среде инертных газов бывает немного.

Основное преимущество магниторазрядных насосов перед гетеро-ионными состоит в более эффективном использовании энергии и запаса геттера. В магниторазрядном насосе при улучшении вакуумных условий ток разряда снижается, что автоматически снижает и скорость распыления катодных пластин. Примеры внешнего вида приведены на рис. 1.61.



Рис. 1.61. Внешний вид отечественного магниторазрядного диодного насоса НМДИ-0,025 (а) (наибольшая быстрота действия, л/с ($\pm 20\%$): по азоту — 20, по аргону — 5; предельное давление — $2 \cdot 10^{-9}$ Торр), магниторазрядного диодного насоса компании Hositrad HP-020 (б) (скорость откачки — 20 л/с, предельное давление — 10^{-11} Торр)

Достоинства магниторазрядных насосов:

- высокая эффективность;
- чистый безмасляный вакуум;
- простота конструкции, относительно невысокая цена;
- простора обслуживания, надежность и бесшумность работы, что позволяет вести откачку в «фоновом режиме»;
- быстрое восстановление свойств после кратковременного напуска атмосферы даже в работающую систему.

Недостатки:

- малая скорость откачки по инертным газам для диодных насосов;

- большое время восстановления после длительного пребывания на атмосфере;
- ограниченный, хотя и большой, ресурс работы;
- необходимость в постоянных магнитах;
- использование высокого напряжения.

Магниторазрядные насосы очень широко используются в лабораторной практике, хотя и испытывают возрастающую конкуренцию со стороны ТМН. Они могут использоваться как в качестве «оконечных» насосов в системах, работающих при 10^{-5} – 10^{-10} Торр, так и для промежуточной откачки (например, перед запуском криогенного насоса) в более высоковакуумных системах.

1.6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Диапазон давлений, с которым имеют дело в современной вакуумной технике, весьма широк, поэтому задача измерения давления или концентрации газа не может быть решена для всего этого диапазона с помощью одного прибора. Приборы для измерения степени вакуума — вакуумметры — различаются по физическим принципам, используемым для измерения, которые и можно использовать для их классификации. Начнем опять с наиболее простых низковакуумных устройств.

1.6.1. Механические вакуумметры

Механические вакуумметры используют для измерения давления силу воздействия газа на ограничивающую его стенку.

Трубка Бурдона — исторически первый тип такого прибора. У скрученной в спираль длинной металлической трубки площади поверхностей внутренней и внешней стенок различаются, поэтому при увеличении давления заполняющего ее газа трубка раскручивается. Это механическое движение индицируется стрелкой (рис. 1.62, б).

Такой принцип действия у большинства манометров, например, устанавливаемых на газовых баллонах. Используется он и при давлениях ниже атмосферного. Чувствительность такого вакуумметра невелика и калибруется он обычно в десятых долях атмосферы.

Мембранные (деформационные) вакуумметры (рис. 1.62, а) — в этих приборах тем или иным способом измеряется степень деформации тонкой

металлической мембраны, являющейся частью стенки откачиваемого объема. Положение мембраны может измеряться механически передачей движения стрелке (*барометр-анероид*). Такие манометры измеряют давление в пределах 1–760 Торр с точностью ~2 %.

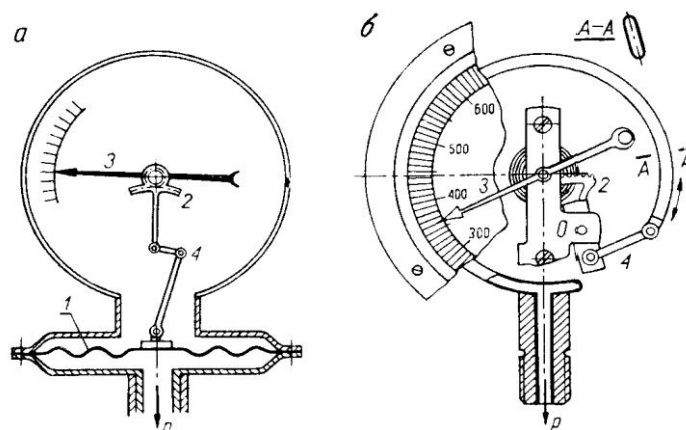


Рис. 1.62. Механические манометры: (а) — мембранный; (б) — со спиральной трубкой:
1 — мембрана; 2 — зубчатая передача;
3 — стрелочный индикатор; 4 — рычаг;
Р — измеряемое давление

Разработаны и широко используются на практике несколько схем деформационных вакуумметров, где величина деформации измерительной мембраны измеряется посредством регистрации электрических параметров. В оригинальном отечественном деформационном газоразрядном преобразователе (датчике) ПМДГ-1 выходной электрический сигнал формируется в результате сопоставления токовых характеристик двух газоразрядных ячеек. Общий электрод (катод) обеих ячеек механически связан с гибкой мембраной, отделяющей заполненный разрядным газом объем от объема вакуумной камеры измеряемого давления. Деформация мембраны приводит к неодинаковому изменению геометрии и, как следствие, токовых характеристик ячеек. Выходной электрический сигнал появляется при разбалансировке мостовой схемы, включающей в себя газоразрядные ячейки. Рабочий диапазон прибора составляет 10^{-1} – 10^2 Торр, то есть примерно соответствует возможностям механических устройств при большей надежности устройства и технологичности процесса измерений.

Однако в большинстве современных мембранных деформационных вакуумметров высокой чувствительности в качестве меры деформации используется величина электрической емкости между мембраной и неподвижным электродом. Емкость этого промежутка определяет частоту колебаний радиотехнического генератора, которая сравнивается с образцовой частотой, задаваемой высокочастотным кварцевым резонатором. Сигнал ошибки преобразуется в постоянное электрическое напряжение, вновь подаваемое на зазор между мембраной и противолежащим электродом для того чтобы воздействием электростатической силы вернуть мембрану в недеформированное положение, скомпенсировав измеряемую силу давления газа. Это постоянное напряжение и представляет собой выходной сигнал измерителя. Связь этого напряжения с давлением может быть рассчитана по универсальным формулам. Наиболее технически совершенными считаются преобразователи марки *Baratron*, производимые американской фирмой *MKS Instruments*. Диапазон индикации этих приборов составляет 10^{-5} – 10^3 Торр. Производившиеся в СССР и ныне производимые в России мембранные вакуумметры серии *ВД* (от *ВД-1* до *ВД-5*) по техническим характеристикам сопоставимы с зарубежными приборами и способны работать в диапазоне от 10^{-4} до 10^2 Торр.

Пьезоэлектрические преобразователи также считаются одним из подвидов деформационных датчиков. Электрическое напряжение здесь вырабатывается в результате деформации (сжатия) слоя кристаллического пьезоэлектрика под действием измеряемой силы давления газа. Преимуществами таких датчиков являются простота, надежность и высокая механическая прочность. Вместе с тем, численные значения пьезоэлектрических напряжений при малых давлениях, характерных для вакуумных измерений, весьма невелики. Возможности радиотехнического усиления сигнала также ограничены из-за высокого выходного сопротивления пьезодатчиков. В результате, область применения пьезоэлектрических приборов ограничена давлениями выше 1 Торр.

Гидростатические (жидкостные) манометры — в приборах этого типа давление оценивают по разнице высот столбов жидкости в двух коленях *U*-образной трубки. Измерение может вестись относительно атмосферы (в манометре «с открытым коленом») или относительно «нуля» («с закрытым коленом»).

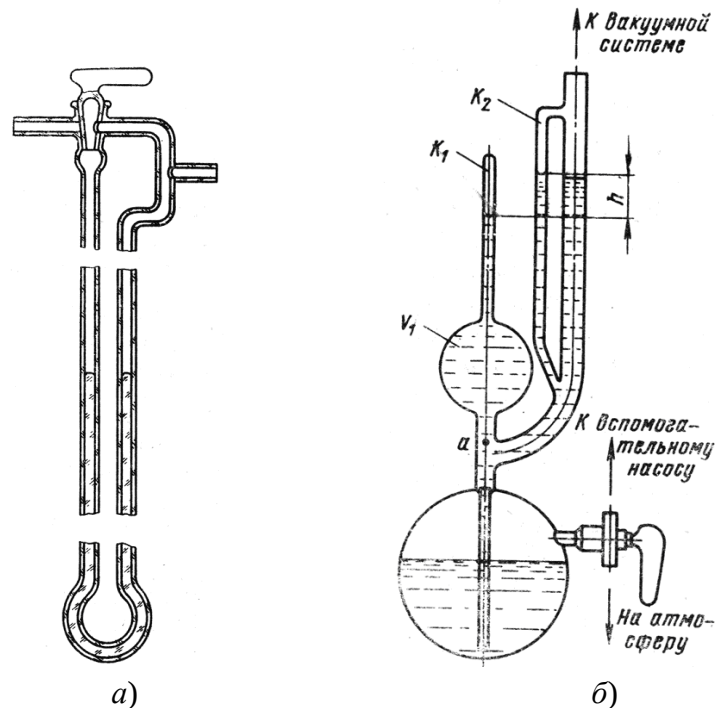


Рис. 1.63. Гидростатические манометры:
 (а) — U-образный манометр;
 (б) — компрессионный манометр

Гидростатический U-образный вакуумметр, внешний вид которого показан на рис. 1.63, а, представляет собой стеклянную U-образную трубку, заполненную ртутью или какой-либо другой жидкостью с низкой упругостью пара, например, вакуумным маслом. Оба колена трубки соединены между собой трёхходовым стеклянным краном. В положении крана, изображённом на рис. 1.63, а, оба колена сообщаются между собой. Правое колено соединяется со вспомогательным насосом, создающим разрежение $10\text{--}10^2$ Торр. В процессе измерения это давление принимается равным нулю. При повороте рукоятки крана на 180° оба колена разобщаются между собой, а левое колено сообщается с сосудом, в котором необходимо измерить давление. Давление рассчитывается по формуле:

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (1.65)$$

где ρ — плотность рабочей жидкости; g — ускорение свободного падения для данной местности; h — разность уровней рабочей жидкости в обоих коленах вакуумметра.

Диапазон давлений, измеряемых ртутным вакуумметром — от 1 Торр до атмосферного. Для водяных или масляных систем чувствительность

может составлять порядка 0,1 Торр (1 мм вод. ст.). Недостаток воды — высокая упругость паров, а масла — высокая растворимость газов. Ртуть лишена этих недостатков, но ее плотность в 15 раз выше, что негативно сказывается на чувствительности манометра.

Для повышения чувствительности используют *компрессионные схемы*. Компрессионный вакуумметр *Мак-Леода* схематично представлен на рис. 1.63, б. Компрессионным он назван потому, что в нем осуществляется сжатие (компрессия) газа в запаянном капилляре. Основными элементами вакуумметра являются запаянный капилляр K_1 с сосудом V_1 , суммарный объём которых до точки «а» в процессе градуировки определяется с большой точностью, и сравнительный капилляр K_2 , диаметр которого, так же как и запаянного капилляра, должен быть постоянен по всей длине и равен диаметру запаянного капилляра. Чтобы произвести измерение, с помощью вспомогательного насоса понижают уровень ртути в вакуумметре ниже точки «а». При этом измерительный капилляр K_1 сообщается с системой, в которой необходимо измерить давление.

При последующем повышении уровня ртути в вакуумметре порция газа, равная суммарному объёму измерительного капилляра K_1 и сосуда V_1 , при давлении, равном давлению газа в системе, будет отсечена и сжата в запаянном капилляре. По закону Бойля–Мариотта произведение давления определенной порции газа на объём, им занимаемый, есть величина постоянная:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (1.66)$$

Начальный объём V_1 известен, конечный объём V_2 нетрудно рассчитать по известному диаметру капилляра K_1 , а давление p_2 определяется разностью уровней ртути h в измерительном K_1 и сравнительном K_2 капиллярах. Тогда по формуле (1.66) легко рассчитывается искомое давление в вакуумной системе p_1 .

Таким образом, удастся обеспечить значения компрессии до 10^5 и диапазона измеряемых давлений $0,1\text{--}10^{-5}$ Торр.

Эти значения ограничены:

- сложной геометрической формой отпаянного конца (это ограничивает снизу высоту столба газа в капилляре);

- непостоянством коэффициента поверхностного натяжения ртути (зависит от давления);

- неудобством работы с капиллярами тоньше 1 мм и невозможностью создать стеклянный измерительный баллон более 1 л (ограничено прочностью).

Все описанные выше системы были основаны на измерении механической силы давления на стенку содержащегося в системе газа. Достоинством таких систем является абсолютный характер измерений: давление в системе можно вычислить, пользуясь только результатами измерений, без предположений о свойствах газа, и т. п. Такого рода измерительные системы, в принципе, не требуют предварительной калибровки. Отметим, однако, что само это преимущество весьма относительно: представьте себе, что Вас попросили нарисовать шкалу на манометре с трубкой Бурдона на основании теоретических соображений.

Недостаток механических систем — невысокая чувствительность. Она связана с ничтожно малыми величинами силы давления при высокой степени вакуума в сравнении с флуктуациями условий, в которых функционирует прибор (атмосферное давление, комнатная температура и т. д.).

1.6.2. Вакуумметры, использующие явления переноса

Следующий класс приборов характеризует вакуум на основании его свойств по отношению к явлениям переноса: переноса тепла, механического движения и т. д.

Кинетомолекулярные и **вязкостные** манометры основаны на принципе переноса количества движения либо непосредственно — молекулами газа (кинетомолекулярные), либо косвенно — от молекулы к молекуле (вязкостные). В первом случае молекулы приводят в движение измерительный элемент, а во втором — тормозят его. Несмотря на то, что такие манометры имеют очень ограниченное применение, целесообразно рассмотреть для примера их устройство.

Над вращающимся с определенной скоростью диском 1 (рис. 1.64) подвешен на нити 2 другой диск 3. В идеальном вакууме приведение в движение или остановка диска 1 не влияет на положение диска 3. Однако когда в пространстве между дисками появляются молекулы газа, они ударяются о поверхность вращающегося диска 1 и, отражаясь от нее с некото-

рой составляющей скорости в направлении вращения, ударяются о диск 3. Молекулы газа, сталкивающиеся с диском 3, передают ему количество движения в направлении вращения диска 1 и поворачивают его, в результате чего происходит закручивание нити. Ввиду того, что количество молекул, принимающих участие в передаче импульса от диска 1 к диску 3, пропорционально концентрации газа, а концентрация — давлению, угол поворота диска 3 (отсчитываемый при помощи зеркальца 4) пропорционален давлению.

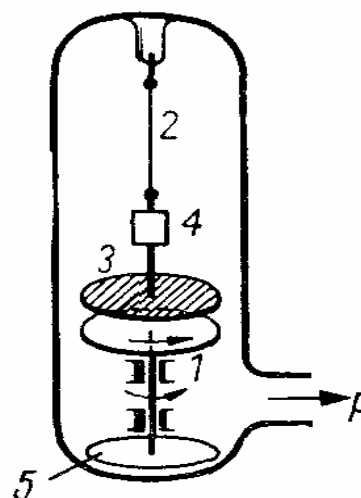


Рис. 1.64. Кинетомолекулярный манометр: 1 — вращающийся диск; 2 — нить; 3 — диск, подвешенный над нитью; 4 — зеркальце; 5 — диск магнитного привода

Имеются также вязкостные вакуумные манометры, в которых ротор, подвешенный в высокочастотном вращающемся магнитном поле, вращается с большой угловой скоростью (~ 100000 об./мин). При постоянной частоте поля скорость вращения ротора является функцией трения и, в том числе, составляющей трения, обусловленной вязкостью газа; эта составляющая зависит от давления газа и может служить его мерой.

Действие других вязкостных манометров основано на принципе затухания колебаний стержня (как правило, кварцевого) (рис. 1.65, а) или диска, подвешенного на упругой (кварцевой) нити (рис. 1.65, б, в). Время τ затухания амплитуды колебаний (например, до половины первоначальной ее величины) может служить мерой давления.

Например, для стержня, подвешенного на кварцевой нити, связь между давлением газа p и временем τ выражается формулой:

$$\tau = \frac{a}{p\sqrt{M_0 + b}}, \quad (1.67)$$

где a и b — постоянные величины, определяемые характеристиками стержня и свойствами газа, M_0 — молекулярная масса газа.

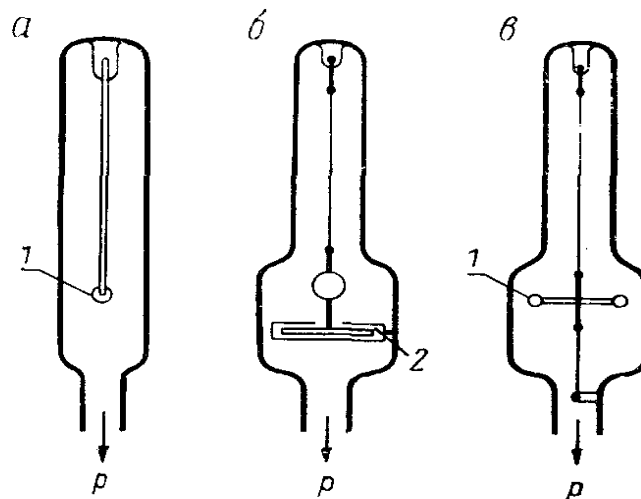


Рис. 1.65. Вязкостные манометры: (а) с качающимся стержнем; (б) с диском, совершающим крутильные колебания; (в) со стержнем, совершающим крутильные колебания: 1 — стальной шарик, служащий для приведения в колебательное движение подвижного элемента при помощи постоянного магнита; 2 — диск, тормозящийся под действием вязкости газа

Возбуждение колебаний подвижной системы производится импульсом, вызванным перемещением магнита; амплитуду колебаний определяют, например, по ширине пятнышка, образованного световым лучом, который отражается от зеркальца, прикрепленного к колебательной системе.

Диапазон измерения давлений вязкостными вакуумметрами заключается между 10^5 и 10^{-2} Торр.

Термомолекулярные или **радиометрические** вакуумметры используют зависимость скорости молекул газа от температуры поверхностей, с которыми они взаимодействуют. Этот тезис проще всего пояснить на примере *манометра Кнудсена*, схема которого приведена на рис. 1.66.

Манометр состоит из системы неподвижных S и подвижных R пластинок, подвешенных на тонкой упругой нити 1. Зеркальце 2 служит для измерения (при помощи светового луча) угла закручивания системы подвижных пластинок.

Температура подвижных пластинок и баллона 3 приблизительно равна температуре окружающей среды T , неподвижные же пластинки нагревают до более высокой температуры T' . В результате молекулы газа, при-

ходящие на поверхность подвижных пластинок с разных сторон, имеют неодинаковые средние скорости и переносят различный импульс. Разница импульсов заставляет пластинки поворачиваться. Соответствующую силу можно измерить по величине угла закручивания нити и по ней на основании приведенных ранее формул рассчитать давление газа.

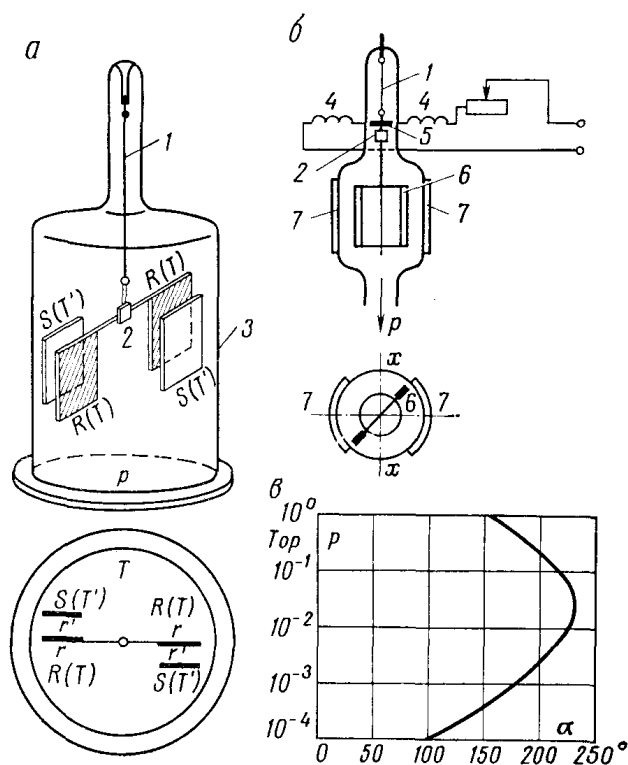


Рис. 1.66. Термомолекулярный манометр: (а) — схема конструкции; (б) — манометр с электрической схемой измерений отклонения пластинок; (в) — градуировочная характеристика манометра: S — неподвижные пластинки (с повышенной температурой); R — подвижные пластинки (с температурой окружения); 1 — нить подвеса; 2 — зеркальце; 3 — баллон; 4 — обкладки с повышенной температурой

Существуют различные конструктивные решения термомолекулярных манометров, однако ввиду сравнительно редкого их применения они здесь рассматриваться не будут.

Измерение низких давлений (менее $\sim 10^{-7}$ Торр) термомолекулярным методом затруднено в связи с тем, что на пластинки действуют также силы

давления теплового излучения. Со стороны высоких значений область измерений термомолекулярного манометра ограничена областью молекулярного течения газа (до 10^{-1} Торр), поскольку принцип его работы требует свободного пролета молекул через зазор между пластинками.

И вязкостные, и радиометрические вакуумметры — дорогие и сложные устройства, требующие квалифицированного обслуживания, не получившие поэтому широкого распространения. Их достоинство — абсолютный характер получаемых результатов (градуировочная кривая для них может быть рассчитана с приемлемой точностью). Вакуумметры этих типов используются в основном в метрологических лабораториях для калибровки более простых и удобных в повседневном использовании устройств.

К числу последних относятся, например, приборы, использующие для измерения параметров вакуума его теплопроводность, так называемые **тепловые вакуумметры** (или **вакуумметры теплопроводности**). Благодаря таким достоинствам, как простота, дешевизна, высокая надежность и практически неограниченная долговечность они являются на сегодня основным инструментом измерения давления в диапазоне среднего вакуума. Недостатками вакуумметров теплопроводности можно считать относительно небольшую ширину рабочего диапазона и зависимость (не очень сильную) их показаний от сорта газа, а также непрямой характер измерения давления, что определяет необходимость предварительной калибровки тепловых вакуумметров.

Действие тепловых вакуумметров основано на зависимости теплопроводности газа от его концентрации. Основными элементами любого теплового манометрического преобразователя являются: 1) нагреваемый элемент (например, накаливаемая нить); 2) поддерживаемый при постоянной (комнатной) температуре элемент с большой теплоемкостью (корпус прибора, подложка и т. п.); 3) разделяющий их измерительный вакуумный зазор, способность которого отводить тепло от нагреваемого элемента к корпусу и служит мерой степени вакуума.

Для элемента, нагретого до умеренной температуры, молекулярная теплопроводность окружающей его газовой среды является основным механизмом теплоотвода.

Типичный вид ее зависимости от давления газа для геометрии классического теплового датчика (т. е. при ширине измерительного зазора 2—

20 мм) приведен на рис. 1.67. В области давлений $1-10^{-3}$ Торр вид зависимости близок к прямой пропорциональности. Чем выше концентрация (давление) газа в объеме, тем больше молекул участвуют в теплопередаче, и тем сильнее охлаждается тело. Поэтому при постоянстве мощности, подводимой к помещенному в вакуум нагреваемому элементу, его температура тем ниже, чем выше давление. Если же поддерживать постоянной температурой нагреваемого элемента, с ростом давления линейно растет затрачиваемая на нагрев мощность.

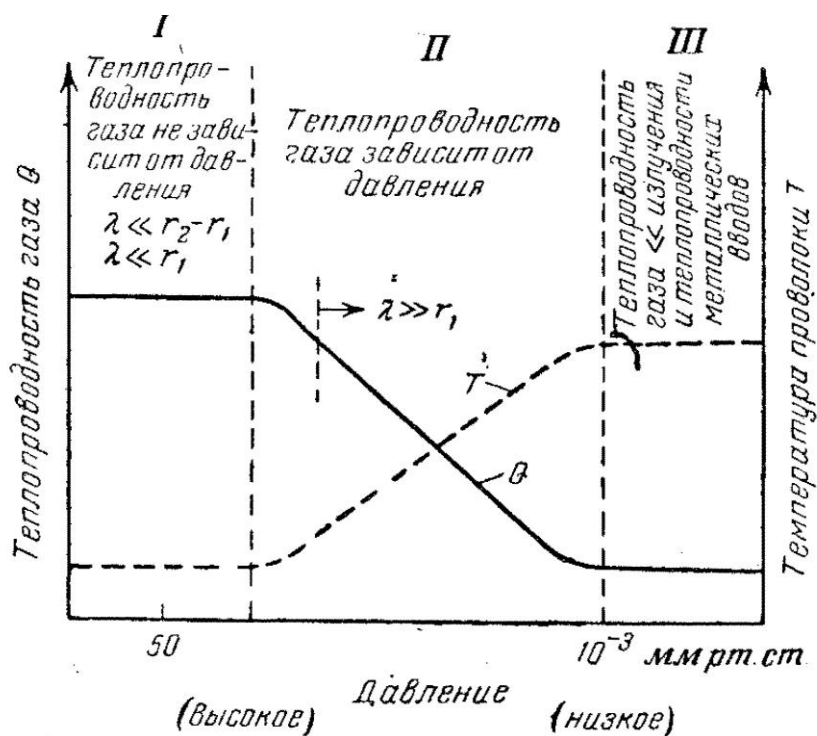


Рис. 1.67. Теплопроводность газа (сплошная линия) и температура нагреваемой постоянным током проволоки (пунктир) в зависимости от давления газа

За пределами интервала $10^{-3}-1$ Торр зависимость потока тепла с нагреваемого элемента от давления насыщается. Природа насыщения при высоких и при низких давлениях различна. При малом давлении газа молекулярная теплопроводность через газ перестает быть основным механизмом теплопереноса, уступая по величине не зависящим от давления инфракрасному излучению и теплопроводности по объему нагревателя к точкам его крепления (токовводам). Насыщение зависимости при переходе к низкому вакууму имеет фундаментальный характер и происходит, когда

длина свободного пробега молекул становится меньше, чем ширина вакуумного промежутка. Независимость теплопроводности от концентрации газа является одним из следствий молекулярно-кинетической теории газов. На качественном уровне эту закономерность можно объяснить тем, что при росте давления увеличение числа молекул, уносящих энергию с нагретой поверхности, компенсируется уменьшением расстояния, на которое эта избыточная энергия переносится до первого соударения с частицами в объеме зазора. Наличие участков насыщения ограничивает рабочий диапазон тепловых вакуумметров.

На практике используют два основных вида тепловых вакуумметров.

Термопарная схема измерений использована при создании наиболее распространенных отечественных тепловых вакуумметрических преобразователей ПМТ-2 (рис. 1.68, а, б), используемых до сих пор в составе многих тепловых и комбинированных вакуумметров.

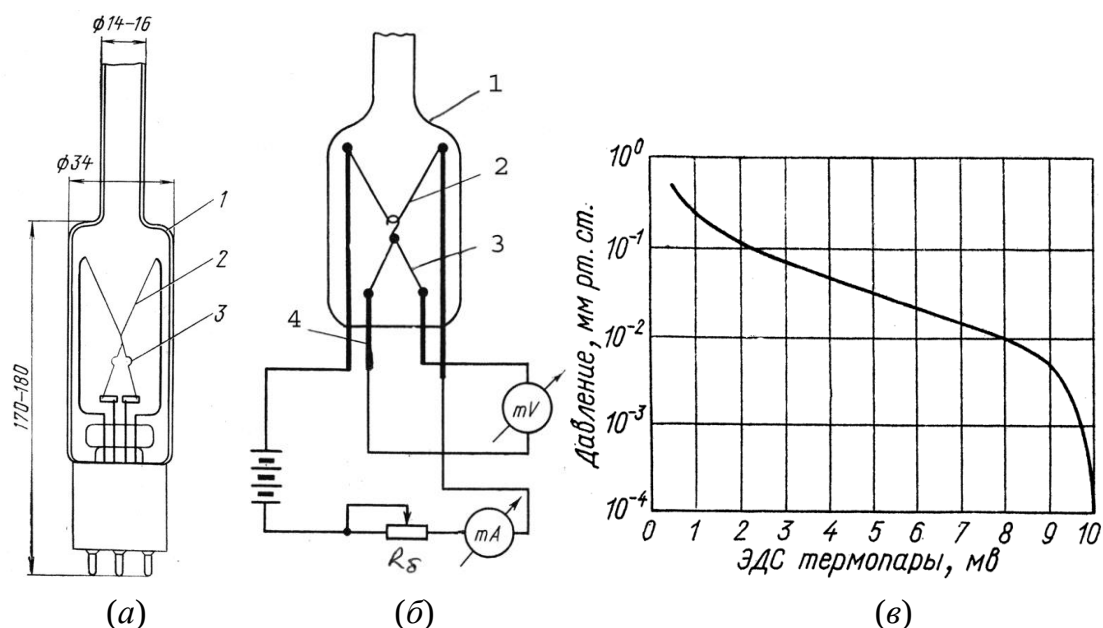


Рис. 1.68. Конструкция (а), схема включения (б) и градуировочная кривая (в) термопарного преобразователя ПМТ-2: 1 — стеклянная колба; 2 — нагреваемая нить; 3 — термопара; 4 — вакуумные вводы

Нагреваемый постоянным током 100–140 мА элемент лампы представляет собой платиновую проволоку диаметром 100 мкм и длиной около 50 мм. Температура средней части проволоки измеряется с помощью присоединенной к ней через перемычку термопары хромель-копель. Значение

давления определяется по градуировочной кривой (рис. 1.68, в). Рабочий диапазон ПМТ-2 определен как 10^{-3} –5 Торр.

Второй распространенный вид тепловых вакуумных датчиков носит название **терморезисторных** (в западной традиции — *датчиков Пирани*). Их отличие состоит в способе регистрации температуры нагреваемого электрического элемента, которую определяют по величине его собственного сопротивления. Преимуществами терморезисторных преобразователей являются более простая и надежная конструкция самого датчика (отсутствие термопары, системы ее крепления, вводов, цепи регистрации ее сигнала и т. д.) и лучшее быстродействие. Основным недостатком можно считать меньшую в сравнении с термопарными датчиками чувствительность, определяющую необходимость использования более сложных способов преобразования выходного сигнала. Эта особенность объясняет меньшую распространенность терморезисторной схемы в России (а ранее в СССР).

Практически все серийно выпускавшиеся отечественные терморезисторные приборы использовали преобразователь ПМТ-6 или его модификацию ПМТ-6-3. Нагреваемый элемент преобразователя, поддерживаемый при измерениях при температуре около 220° С, представляет собой отрезок вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм (для ПМТ-6-3 — платиновой проволоки 12 мкм) и длиной 80 мм. Диапазон измерений составляет приблизительно 10^{-2} –30 Торр.

Одним из основных направлений совершенствования тепловых вакуумных преобразователей является увеличение рабочего диапазона давлений. Его расширение в сторону меньших давлений возможно за счет снижения рабочей температуры нагреваемого элемента T . При этом мощность излучения, пропорциональная T^4 , спадает гораздо быстрее, чем мощность, переносимая теплопроводностью, что при прочих равных условиях снижает относительную долю излучения в общем тепловом балансе. Необходимо уменьшить и вклад потока тепла, уходящего с нагреваемого элемента через точки крепления. Эта цель может быть достигнута при переходе от линейных, проволоочных нагреваемых элементов к планарным. Разработки в данном направлении ведутся всеми производителями тепловых вакуумных датчиков, в том числе, и в государствах бывшего Советского Союза. Основой производимых в

Молдавии новых тепловых преобразователей ПДТ-13 (рабочий диапазон 10^{-5} – 10^{-1} Торр) и ПДТ-14 ($3 \cdot 10^{-4}$ –30 Торр) служит планарный элемент, в котором нагреватель и термопары сформированы на тонкой диэлектрической пленке методом вакуумного напыления.

Уменьшение геометрических размеров датчика позволяет сместить его рабочий диапазон в область больших давлений. Расчеты и проводимые в последние годы эксперименты показывают, что при ширине вакуумного зазора порядка нескольких микрометров (сравнимой с длиной свободного пробега атомов при нормальных условиях) верхняя граница рабочего диапазона теплового преобразователя достигает атмосферного давления (рис. 1.69).

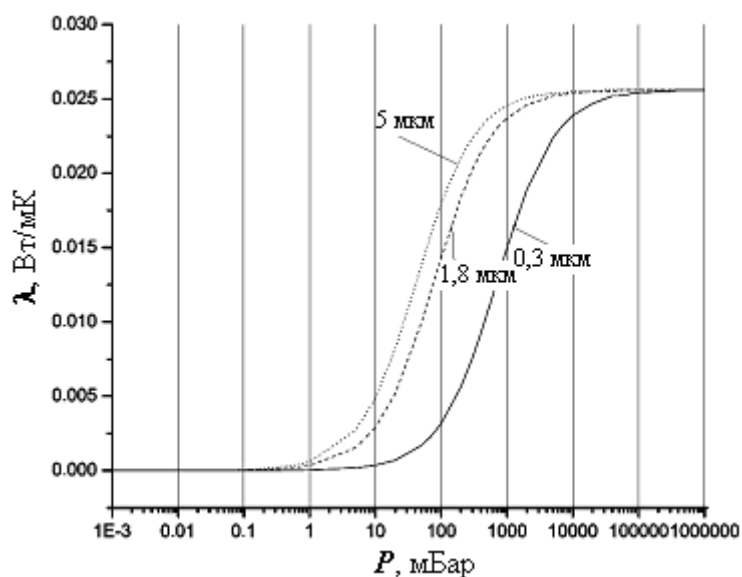


Рис. 1.69. Зависимость теплопроводности от давления для планарного терморезисторного датчика с шириной вакуумного зазора 0,3, 1,8 и 5 мкм

Практические возможности для создания работоспособных конструкций таких микротепловых датчиков открываются по мере развития микро и нано-механических технологий (рис. 1.70, 1.71).

Как правило, микротепловые датчики входят в состав микровакуумных систем — таких как современные газоанализаторы или акселерометры — и изготавливаются совместно с ними в едином технологическом процессе. Это позволяет наиболее эффективно использовать основное преимущество микродатчиков — их малые размеры. Но помимо этого, веду-

щие западные компании осваивают серийное производство микротепловых вакуумных преобразователей и в качестве отдельного изделия. Таков, например, преобразователь HPS Series 925 MicroPirani компании MKS Instruments с уникальными техническими характеристиками: рабочий диапазон 10^{-5} – 10^3 Торр при быстродействии 50 мс и устойчивости к вибрациям до 900 g.

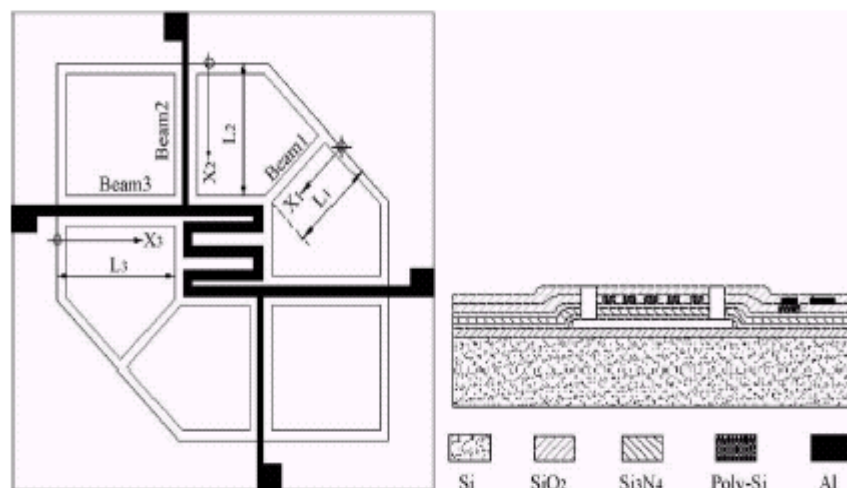


Рис. 1.70. Общая схема и поперечный разрез планарного микротеплового преобразователя:
 $L_1 = 70$ мкм, $L_2 = L_3 = 98$ мкм

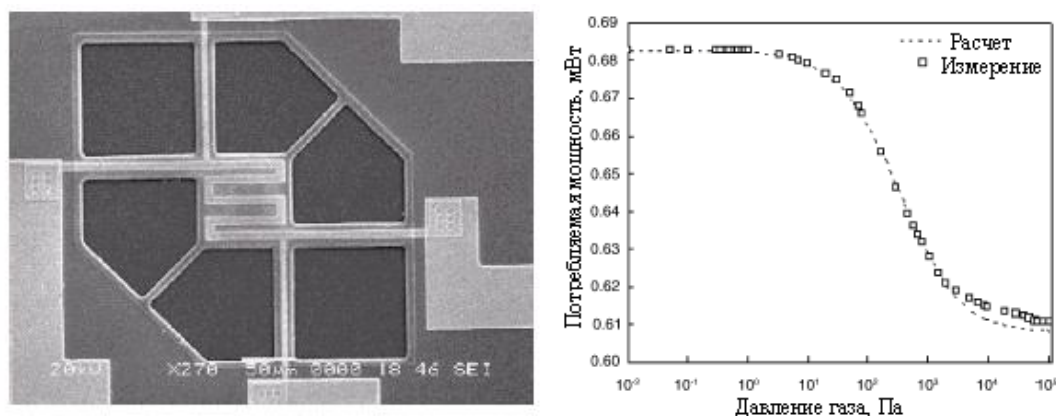


Рис. 1.71. Изображение того же преобразователя (рис. 1.70), полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, и его рабочая характеристика при стабилизированном токе накала 0,8 мА

Принципиально иной способ расширения рабочего диапазона тепловых (обычно терморезисторных) вакуумметров вплоть до атмосферного давления состоит в использовании явления конвекции в газовой среде.

Это явление подразумевает установление в объеме преобразователя направленных макроскопических потоков газа, возникающих в поле тяготения за счет зависимости массовой плотности газа от температуры. Для развития конвекции необходимо, чтобы длина свободного пробега молекул была меньше размеров вакуумного зазора. Таким образом, область роста теплопереноса с давлением за счет конвекции примыкает со стороны высоких давлений к области изменения с давлением обычной (молекулярной) теплопроводности (рис. 1.72).

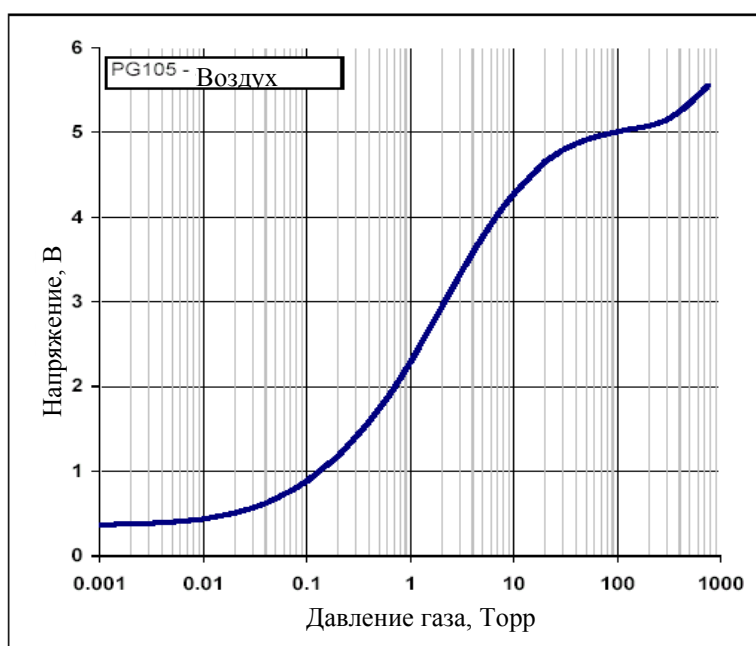


Рис. 1.72. Градуировочная кривая терморезисторного преобразователя, использующего явление конвекции; конвекция определяет отсутствие насыщения при давлении выше 100 Торр

В последнее время тепловые конвекционные вакуумметры вошли в число стандартных приборов, серийно выпускаемых ведущими производителями вакуумной техники.

1.6.3. Ионизационные вакуумметры

Следующую большую группу составляют ионизационные вакуумметры. В них исследуемая газовая среда подвергается частичной ионизации, и ток получаемых при этом заряженных частиц служит мерой давления. При всем разнообразии видов таких вакуумметров для ионизации среды в них

всегда используют поток электронов. Электроны могут создаваться внешним источником (обычно накаливаемым катодом) либо получаться непосредственно в процессе ионизации среды. В первом случае принято говорить об использовании несамостоятельного, а во втором — самостоятельного газового разряда. Каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки и может быть оптимальной при определенных условиях.

1.6.3.1. Ионизационные вакуумметры с накаливаемым катодом

Классическая конструкция ионизационной манометрической лампы с накаливаемым катодом изображена на рис. 1.73. Расположенный на оси прибора тонкий накаливаемый катод 3 окружен проволочной спиралью 2, играющей роль анода. Анод, в свою очередь, окружен цилиндрическим коллектором. При работе к аноду прикладывают положительный потенциал относительно катода, а к коллектору — небольшой отрицательный потенциал. Эмитированные катодом электроны разгоняются полем анода и в большинстве своем пролетают сквозь промежутки между витками спирали, попадая в зазор анод–коллектор. Достигнуть коллектора электроны не могут из-за его отрицательного потенциала, и потому возвращаются, продолжая колебательное движение в пространстве между катодом и коллектором, заканчиваясь столкновением с проволокой анода. Полная длина их траектории оказывается достаточно большой (обычно в несколько раз превышает геометрические размеры лампы), что увеличивает вероятность соударения с молекулами имеющегося в приборе газа и их ионизации. Образовавшиеся в промежутке между анодом и коллектором ионы идут к коллектору. При постоянном токе электронной эмиссии (обычно порядка нескольких мА) в молекулярном режиме (диапазон давлений — 10^{-4} – 10^{-7} Торр) ионный ток коллектора оказывается пропорциональным концентрации молекул, т. е. давлению. В течение многих

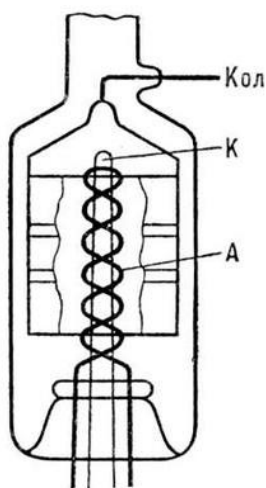


Рис. 1.73. Ионизационная манометрическая лампа с внешним коллектором (ПМИ-2; ЛМ-2; ПМИ-3-2):

К — прямонакальный катод; А — анод; Кол — коллектор ионов

долгая колебательное движение в пространстве между катодом и коллектором, заканчиваясь столкновением с проволокой анода. Полная длина их траектории оказывается достаточно большой (обычно в несколько раз превышает геометрические размеры лампы), что увеличивает вероятность соударения с молекулами имеющегося в приборе газа и их ионизации. Образовавшиеся в промежутке между анодом и коллектором ионы идут к коллектору. При постоянном токе электронной эмиссии (обычно порядка нескольких мА) в молекулярном режиме (диапазон давлений — 10^{-4} – 10^{-7} Торр) ионный ток коллектора оказывается пропорциональным концентрации молекул, т. е. давлению. В течение многих

лет вакуумные условия большинства технологических вакуумных установок соответствовали этому диапазону, и построенная по описанной схеме лампа *ПМИ-2* оставалась наиболее распространенной из отечественных манометрических высоковакуумных ламп.

Факторами, препятствующими работе ионизационной лампы при высоких давлениях, являются: 1) быстрое разрушение накаливаемого вольфрамового катода и 2) нарушение линейной зависимости тока от давления при уменьшении длины свободного пробега электрона до значений менее расстояния между электродами (при этом уменьшается число электронов, попадающих в пространство между анодом и коллектором). Верхний предел рабочих давлений может быть увеличен приблизительно до 10^{-2} Торр за счёт применения специальных воздухостойких иридиевых катодов и уменьшения расстояний между электродами. Однако, поскольку диапазон давлений 10^{-2} – 10^{-4} Торр перекрывается более надежными и удобными в использовании тепловыми и механическими вакуумметрами, модифицированные таким образом ионизационные лампы не получили широкого распространения.

Ограничение рабочего диапазона *ПМИ-2* со стороны низких давлений связано с присутствием «фоновой» (не зависящей от давления) составляющей тока коллектора, которая уже при $5 \cdot 10^{-8}$ Торр становится равной току ионов на этот электрод. Переносчиками фонового тока являются электроны, эмитируемые с коллектора под действием тормозного рентгеновского излучения, источником которого, в свою очередь, является бомбардируемый электронами анод.

Проблема снижения фонового тока была в значительной степени решена в усовершенствованной конструкции ионизационной лампы, получившей название *манометра Байарда–Альперта* (рис. 1.74) и выпускавшейся отечественной промышленностью под обозначениями *ИМ-12* и *МИ-12*. Как и в рассмотренной ранее конструкции,

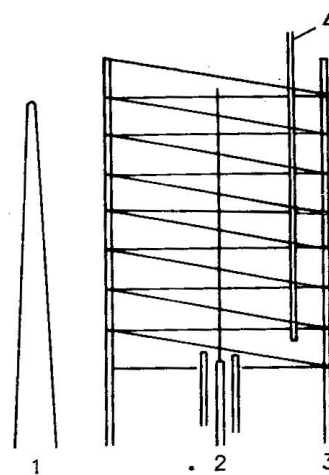


Рис. 1.74. Схема расположения электродов модуляционного вакуумметра Байарда–Альперта:
1 — катод; 2 — коллектор;
3 — анод; 4 — модулятор

накаливаемый катод 1 и коллектор ионов 2 разделены анодом, имеющим форму проволочной спирали.

Отличие состоит в том, что катод теперь располагается снаружи, а коллектор внутри анода. Эта, несущественная на первый взгляд, особенность позволяет использовать для сбора ионов из всего пространства «за анодом» коллектор малой площади, изготовленный из тонкой проволоки. Такой коллектор перехватывает лишь малую часть рентгеновского излучения с анода, а потому и паразитный ток электронов с него оказывается существенно (на 2–3 порядка) меньшим, чем в лампе ПМИ-2, где анод окружен коллектором практически со всех сторон. Это позволило понизить минимальное измеряемое давление приблизительно до 10^{-10} Торр.

Другое важное усовершенствование конструкции ионизационной лампы, показанной на рис. 1.73 — введение дополнительного электрода-модулятора, использование которого позволяет разделять фоновый и ионный токи при давлениях до 10^{-12} Торр. Это еще один (помимо коллектора) проволочный электрод, располагаемый внутри анода. При проведении измерений его потенциал варьировать, делая равным то потенциалу анода, то потенциалу коллектора. В первом случае присутствие модулятора не влияет существенно на ионный ток коллектора, поскольку ионы не могут попасть на электрод, имеющий положительный (анодный) потенциал. При равенстве потенциалов модулятора и коллектора часть образующихся из остаточного газа ионов собирается модулятором, и ток коллектора падает.

Модулятор калибруют, измеряя долю перехватываемого им ионного тока в условиях высокого давления, когда влияние фоновых токов пренебрежимо мало. Полученное значение калибровочного коэффициента используют при измерении низких давлений, когда паразитная электронная компонента существенна или даже превалирует в токе коллектора. Ионный ток вычисляют путем деления амплитуды изменений тока коллектора при варьировании потенциала модулятора на этот калибровочный коэффициент.

Основная идея, использованная при разработке так называемых *экстракторных вакуумметров*, состоит в дальнейшем снижении величины паразитного электронного фототока с коллектора ионов за счет его выноса за пределы области ионизации. Одна из конкретных конструкций представлена на рис. 1.75. Как и в лампе Байярда–Альперта, накаливаемый ка-

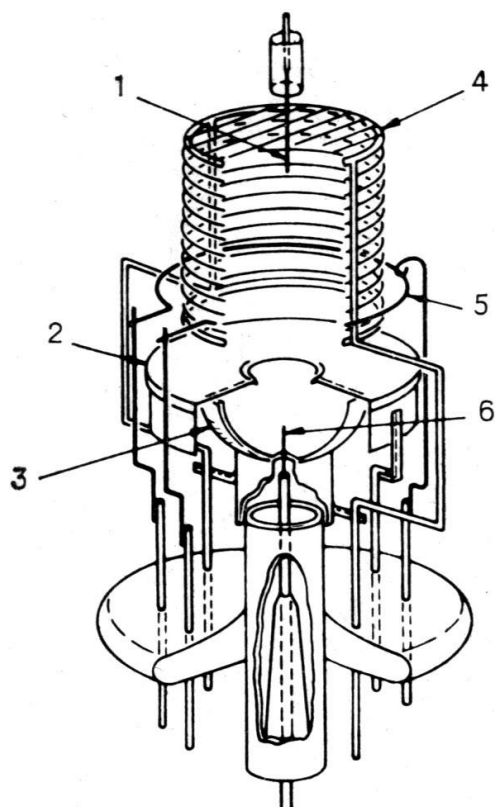


Рис. 1.75. Экстракторный вакуумметр: 1 — модулятор; 2 — экран; 3 — отражатель ионов; 4 — анод; 5 — накаливаемый катод; 6 — коллектор

тод 5 расположен снаружи от цилиндрического проволочного анода 4. Образовавшиеся внутри анода ионы вытягиваются электрическим полем через отверстие в экране 2. Использование дополнительного полусферического отражателя 3 позволяет сфокусировать ионный поток на малоразмерном коллекторе 6. Экран полностью защищает коллекторный электрод от прямого воздействия рентгеновских лучей с бомбардируемых электронами участков анода, что позволяет более чем на 2 порядка снизить фототок с коллектора по сравнению со случаем вакуумметра Байарда–Альперта. С помощью экстракторных ламп могут измеряться давления вплоть до 10^{-13} – 10^{-14} Торр.

Снижения рентгеновского облучения коллектора ионизационной вакуумметрической лампы можно добиться не только уменьшением размера этого электрода и его удаления от источника излучения, но и другими способами. Один из них состоит в снижении мощности самого рентгеновского излучения за счет уменьшения электронного тока, используемого для ионизации газа. При этом, чтобы не произошло снижения чувствительности прибора (тока собираемых ионов при данной величине давления), необходимо компенсировать уменьшение числа используемых электронов увеличением времени их пролета в лампе. В лампе Байарда–Альперта и ПМИ-2 от момента эмиссии с катода и до выхода на анод электроны успевают совершить 2–4 колебания в пространстве между катодом и коллектором. В эффективных системах удержания электронного потока полная длина электронной траектории может превышать геометрические размеры в тысячи раз. Одна из таких систем — магнетронная. Она используется в

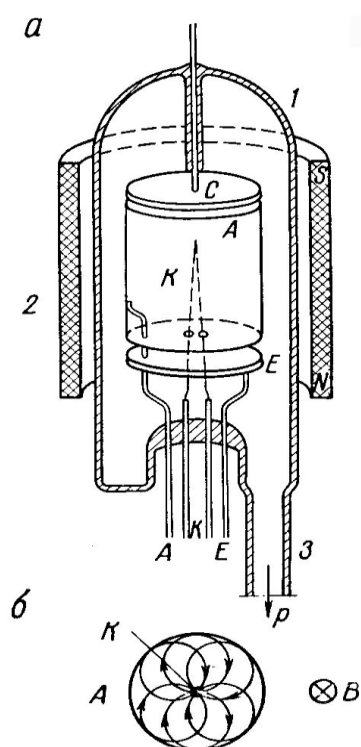


Рис. 1.76. Магнетронный вакуумметр с накаливаемым катодом:

a — конструктивная схема; *б* — траектории электронов в критическом магнитном поле; А — анод; К — катод; С и Е — торцевые пластины; 1 — стеклянный баллон; 2 — постоянный магнит; 3 — трубка, соединенная с объемом, где измеряется давление p

составе *магнетронного вакуумметра* с накаливаемым катодом, схема которого приведена на рис. 1.76.

Электроны эмитируются нагретым проволочным катодом K , расположенным внутри цилиндрического анодного электрода A , и движутся в скрещенных (перпендикулярных друг другу) электрическом и магнитном полях. Электрическое поле создается применением к аноду положительного потенциала величиной несколько сотен вольт. Источником магнитного поля с индукцией $0,03\text{--}0,05$ Тл является расположенный вне лампы цилиндрический магнит 2. Торцевые пластины C и E поддерживаются под потенциалом катода, и одна из них используется в качестве коллектора ионов.

Электроны в такой полевой конфигурации движутся по циклоидальной траектории, в теории — бесконечной. Их уходу в радиальном направлении препятствует магнитное поле, а в аксиальном — электрическое поле торцевых электродов. В результате, достаточная для практических целей эффективность ионизации газа в магнетронном вакуумметре достигается при токе эмиссии с катода менее 10^{-7} А, то есть на 4–5 порядков меньшем, чем

в ПМИ-2. Это позволяет эксплуатировать термокатод при низкой температуре, что продлевает срок его службы, а также радикально снижает поток рентгена с анода (куда электроны все-таки, в конце концов, попадают). По расчетам, фоновый ток, вызываемый рентгеновским излучением, эквивалентен давлению $\sim 10^{-14}$ Торр. Схема магнетронного вакуумметра с накаливаемым катодом удовлетворяет многим требованиям, предъявляемым к вакуумметрам сверхвысокого вакуума. К сожалению, ей присущи и недостатки, ограничившие ее практическое распространение. Один из них со-

стоит в неудобствах, связанных с наличием магнитного поля и самого постоянного магнита. Однако основной практический недостаток связан со сложностью регулирования потока ионизующих газ электронов в такой системе. Из-за отличного качества магнетронной полевой ловушки электроны, родившиеся при ионизации газа, не уходят сразу на анод и могут вносить существенный вклад в дальнейшую ионизацию молекул. При определенных условиях ток таких вторичных электронов начинает превосходить ток электронов, эмитируемых катодом, что нарушает стабильность работы вакуумметра и приводит к нелинейности его характеристики.

При всем разнообразии модификаций, ионизационные вакуумметры с накаливаемым катодом имеют ряд общих недостатков. Основным из них является недостаточная надежность, связанная с быстрым и необратимым разрушением катода при ухудшении давления выше 10^{-2} – 10^{-3} Торр во время его работы. Это, а также ограниченность временного ресурса эмиттеров, является противопоказанием к использованию таких ламп в «дежурном» режиме. Еще одно свойство, создающее неудобства в практическом использовании ионизационных ламп с накаливаемыми катодами, состоит в относительно большой длительности подготовительных операций, которые требуется произвести перед началом измерений. После включения накала и напряжений питания эмиссионные свойства устанавливаются не мгновенно. Кроме того, нагреваемые и бомбардируемые электронами и ионами поверхности десорбируют накопившийся на них газ, изменяя давление в лампе и тем самым искажая ее показания. Поэтому получение надежной информации о давлении в приборе при первом включении ионизационного вакуумметра с накаливаемым эмиттером после перерыва в использовании возможно не ранее, чем через 20–40 минут.

Ионизационные манометры обладают заметным откачивающим действием. Например, для ПМИ-2 быстрота ионной откачки составляет примерно 0,01 л/с. Это означает, что для обеспечения точности измерений лампа должна соединяться с характеризуемым вакуумным объемом достаточно толстым и коротким патрубком, перепад давления на котором не будет слишком большим.

Принципиальным недостатком всех ионизационных манометров является также неабсолютный характер их показаний, что создает необходимость в калибровке. Более того, чувствительность одного и того же манометра

метра по отношению к различным газам оказывается неодинаковой (из-за различия величин сечений ионизации молекул). Если вакуумметр был градуирован по азоту, а применяется для измерения давления других газов, то необходимо учитывать относительную чувствительность R , которая представлена в табл. 1.8. При этом давление газа определяется как

$$P_{\text{газа}} = P_{\text{воздуха}} / R. \quad (1.68)$$

Таблица 1.8

Чувствительность лампы ПМИ-2 по отношению к различным газам

Газ	N ₂	H ₂	He	Ar	CO ₂	O ₂	Hg	CH ₄	Ne	CO
R	1	0,43	0,16	1,30	1,6	0,85	2,5	1,5	0,27	1,04

Однако недостатки ионизационных вакуумметров с накаливаемыми катодами в большой степени компенсируются их достоинствами, определяющими их большую популярность. Главным из достоинств является сама способность измерять параметры сверхвысокого вакуума, обеспечивающая широкое распространение приборов данного типа.

1.6.3.2. Ионизационные вакуумметры с холодным катодом

Использование в качестве ионизирующего фактора одного из видов самостоятельного газового разряда позволяет избавиться от одного из главных недостатков вакуумметра с накаливаемым катодом — низкой надежности.

Вообще говоря, даже обычная *газоразрядная трубка* (рис. 1.77), дает возможность получать некоторую информацию о давлении и составе газа в ее объеме по величине тока разряда, распределению и цвету свечения разряда. Однако большие потери заряженных частиц, способных свободно уходить на электроды в такой системе, приводят к низкой эффективности ионизации. Токи разряда невелики и сильно зависят от состояния электродов, а свечение перестает быть заметным при давлениях ниже 10 Торр.

Поэтому в используемых на практике системах для стабилизации разряда и увеличения эффективности ионизации среды, как и во многих рассмотренных ранее случаях, используют ловушечные конфигурации статических полей.

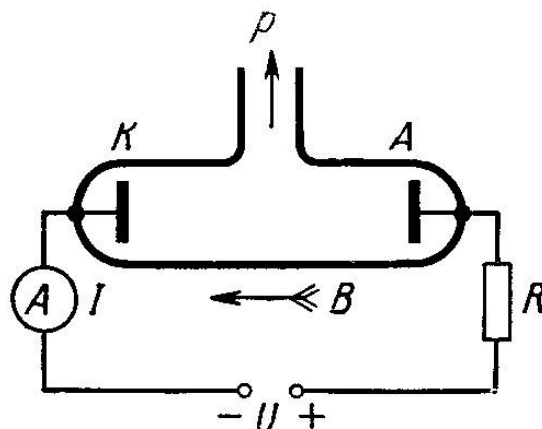


Рис. 1.77. Схема простейшего электроразрядного манометра (с тлеющим разрядом); помещение трубки в магнитное поле индукции B повышает степень ионизации: A — анод; K — катод; R — ограничивающее сопротивление

Наиболее часто используют ловушку магнетронного типа. Изображенный на рис. 1.78 магнетронный вакуумметр с холодным катодом по форме и расположению электродов сходен с манометром, представленным на рис. 1.76.

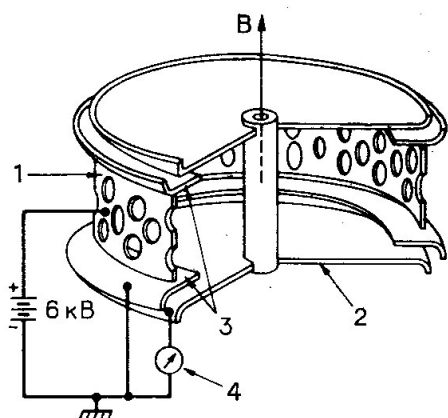


Рис. 1.78. Магнетронный вакуумметр с «холодным» катодом: 1 — анод; 2 — катод; 3 — вспомогательный катод; 4 — усилитель ионного тока

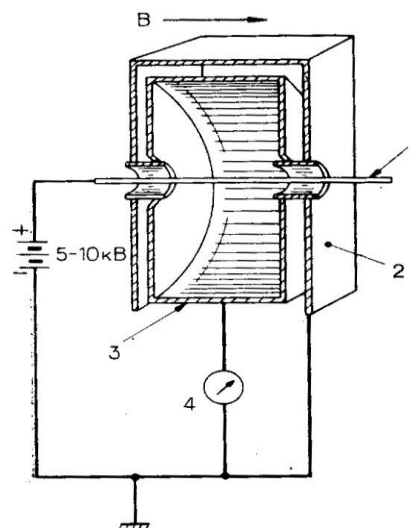


Рис. 1.79. Инверсно-магнетронный вакуумметр: 1 — анод; 2 — вспомогательный катод; 3 — коллектор ионов; 4 — усилитель

Инверсно-магнетронный вакуумметр (рис. 1.79) отличается от них тем, что его электродная схема «вывернута наизнанку»: тонкий анод расположен на оси цилиндрического катода. При приложении между катодом и анодом каждой из таких систем высокого напряжения (типичное значение — 6 кВ) и создании осевого магнитного поля (обычно 0,1–0,2 Тл) в пространстве между катодом и анодом зажигается разряд, ток которого зависит от давления газа в этом пространстве. Остаточный газ ионизируется электронами, образующимися как на бомбардируемой поверхности катода, так и в объеме, в ходе самой ионизации газовых молекул. Измерение тока ионов производят в цепи катода. Вспомогательные катоды, размещаемые в зазоре между катодом и анодом, служат для перехвата и исключения из измерительной цепи токов автоэлектронной эмиссии, становящихся существенными из-за большой величины прикладываемого к аноду напряжения.

Стабильное самопроизвольное зажигание магнетронного разряда происходит в описанных устройствах при давлениях 10^{-2} – 10^{-10} Торр, а нижний предел измерений составляет 10^{-12} Торр. Зависимость тока катода i_k от давления p имеет вид:

$$i_k = cp^n, \quad (1.69)$$

где n изменяется от 1,1 до 1,4 в зависимости от природы газа.

К недостаткам магнетронных вакуумметров с холодным катодом следует отнести нестабильность разряда, проявляющуюся в колебаниях разрядного тока (из-за изменения эмиссионных свойств катода), и нелинейность градуировочной характеристики, а также очень высокую скорость откачки газа (около 1 л/с). Тем не менее, высокая надежность и практически неограниченная долговечность этих приборов определяют их достаточно высокую популярность. В частности, достаточно широкое распространение получил выпускавшийся отечественной промышленностью манометрический преобразователь *ММ-14*, построенный по инверсно-магнетронной схеме.

Заслуживает отдельного упоминания возможность использования для измерения давления информации о рабочем токе *магниторазрядных насосов*. Используемое в таких насосах явление газового разряда в пеннинговской ячейке (рис. 1.80) может служить основой для создания самостоя-

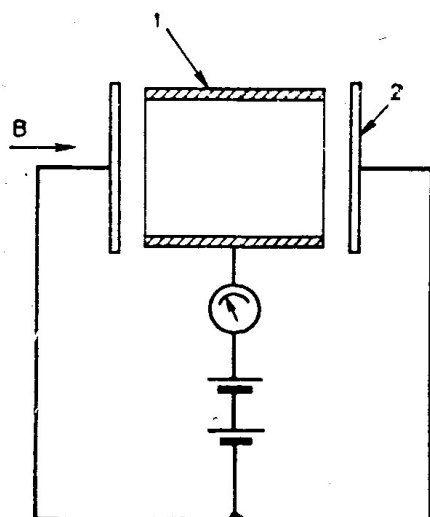


Рис. 1.80. Магнитный электроразрядный вакуумметр, построенный на основе пеннинговской ячейки:
1 — цилиндрический анод;
2 — катоды

тельного типа ионизационного манометра с ненакаливаемыми катодами, и попытки создания такого манометра действительно предпринимались. Из-за ряда существенных недостатков (нелинейность градуировочной кривой, труднорешаемая проблема автоэмиссии электронов с катода, сильная зависимость тока от состояния электродов) такой манометр не нашел самостоятельного применения. Тем не менее, при использовании магниторазрядного насоса для откачки величина его тока может быть использована и часто используется на практике для контроля степени разрежения в вакуумной камере.

Таблица 1.9

Рабочие диапазоны давлений, измеряемые вакуумметрами

Торр	10^{-11}	10^{-9}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-1}	10	10^3
						<u>гидростатические</u>		
					<u>деформационные</u>			
					<u>тепловые</u>			
				<u>компрессионные</u>				
				<u>радиоизотопные</u>				
	<u>электронные ионизационные</u>							
<u>магнитные электроразрядные</u>								

Недостатки этого способа — зависимость тока от состояния насоса, а также от проводимости откачного тракта, перепад давления на котором может быть весьма велик из-за транспортируемого по нему потока откачки-

ваемого газа. Степень влияния этих факторов, впрочем, можно учесть, если время от времени сверять ток насоса с показаниями отдельного, поверенного вакуумметра, например, на базе лампы Байарда–Альперта. При таком способе работы экономится ресурс высоковакуумного вакуумметра и существенно снижается вероятность его выхода из строя при случайном напуске атмосферы в прибор.

В заключение приведем сводную таблицу типов вакуумметров и перекрываемых ими диапазонов давлений (см. табл. 1.9).

1.6.4. Измерение парциальных давлений

Состав газовой среды, остающейся в откачиваемом вакуумными насосами объеме, может существенно отличаться от состава земной атмосферы. При достижении низких давлений обычно оказывается, что состав остаточного газа определяется в основном не исходным содержимым вакуумной камеры, а потоком газов с ее стенок и скоростью откачки этих газов выбранным насосом. Состав газовой выделения со стенок определяется как предысторией (тем, в какой среде находились детали до начала откачки), так и способностью разных сортов газовых молекул адсорбироваться на стенках и диффундировать в объем используемых при создании камеры материалов. Важна и технология обезгаживания — при прогреве камеры быстрее всего удаляются наиболее слабо связанные со стенкам молекулы, и после прогрева относительное содержание таких молекул в остаточном газе снижается. С другой стороны, ранее уже отмечалось характерное для многих типов высоковакуумных насосов свойство селективности, приводящее к тому, что некоторые газы (прежде всего, инертные) остаются практически не откачанными, в результате чего их относительная доля в составе остаточного газа резко возрастает.

Знание состава остаточного газа часто необходимо для определения его полного давления, поскольку чувствительность многих вакуумметров также различна по отношению к различным газам. Более того, во многих конкретных случаях информация о составе вакуумной среды оказывается важнее, чем о величине полного давления. Например, при работе с тонкими поверхностными слоями различных материалов наличие даже небольшого количества химически активных газов и паров в вакуумной среде гораздо более вредно, чем присутствие не «прилипающих» к поверхности

инертных газов. В ускорителях элементарных частиц более важны не химические свойства, а массы — присутствие тяжелых молекул оказывается особенно недопустимым.

Приборы для определения состава вакуумной (и вообще газовой) среды называют *газоанализаторами*, и обычно они измеряют *парциальные* давления каждого из обнаруженных газов, что позволяет оценить относительную концентрацию молекул газов различных сортов. В большинстве случаев в качестве газоанализаторов используют упрощенные, компактные версии *масс-спектрометров* — устройств, определяющих относительное число молекул и атомов различных масс. При этом многие масс-спектрометры могут быть использованы и для оценки полного давления, для чего парциальные давления различных массовых компонент просто суммируются.

1.6.4.1. Статические масс-спектрометры

В газоанализаторах этого типа остаточный газ ионизируется специально создаваемым электронным потоком, а образующиеся ионы разделяются по массам под действием постоянного или медленно изменяющегося (по сравнению со временем движения ионов) электрического или/и магнитного поля.

Ионы создаются с помощью устройств (называемых ионными источниками), во многом сходных по назначению и конструкции с ионизационными вакуумметрическими преобразователями. Отличие состоит в том, что образующиеся ионы выводятся за пределы источника для дальнейшего анализа. Это определяет особые требования к таким параметрам ионного потока, как энергетический и угловой разброс, совершенно неважным для преобразователей полного давления, измеряющих только полный ток ионов. Меры, предпринимаемые для выполнения этих требований, приводят обычно к некоторому снижению эффективности ионизации (величины ионного тока при тех же значениях тока электронного пучка и давления) ионных источников масс-спектрометров по сравнению с вакуумметрическими преобразователями того же типа.

Образовавшийся в источнике поток ионов инжектируется в область анализатора, где сепарируется по величине отношения массы к электрическому заряду. Природа и конфигурация полей, используемых для масс-

анализа, определяет тип газоанализатора. Схематическое изображение электронно-оптической схемы одной из наиболее распространенной разновидностей — 180-градусного магнитного масс-спектрометра — представлено на рис. 1.81.

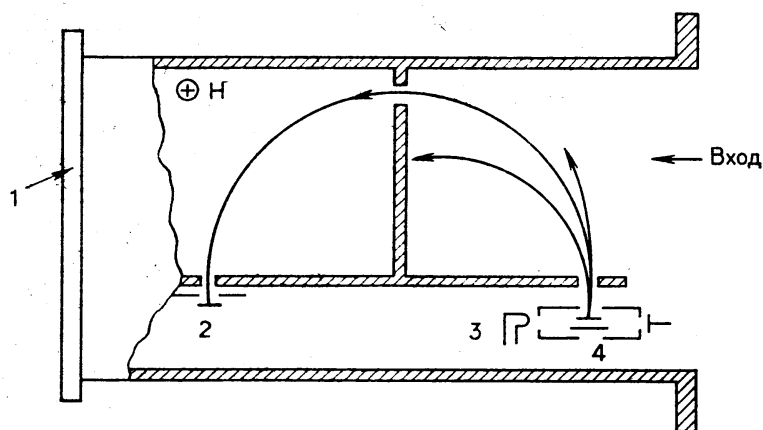


Рис. 1.81. 180-градусный магнитный масс-спектрометр: 1 — фланец с электрическими вводами, 2 — коллектор ионов, 3 — катод, 4 — ионный источник

Ионы здесь встраиваются в область однородного магнитного поля с начальной скоростью, перпендикулярной направлению вектора индукции, и движутся по круговым траекториям с радиусами

$$r = (2mU/e)^{1/2}/B, \quad (1.70)$$

где m и e — масса и заряд иона, B — индукция магнитного поля, U — величина напряжения, ускоряющего ионы в ионном источнике.

Коллектор ионов небольшого размера располагают на расстоянии $2R$ от точки встраивания таким образом, чтобы ионы попадали на него, пройдя половину окружности (что и определяет наименование «180-градусный») радиуса $r = R$. Уравнение (1.70) однозначно определяет значение отношения массы к заряду (в случае однозарядных ионов — просто массу) для частиц, попадающих на коллектор и определяющих его ток при заданных значениях U и B . Монотонно изменяя во времени одну из этих величин и фиксируя осциллограмму коллекторного тока, получают масс-спектр газовой среды в ионном источнике, отражающий количество ионов различных масс (рис. 1.82).

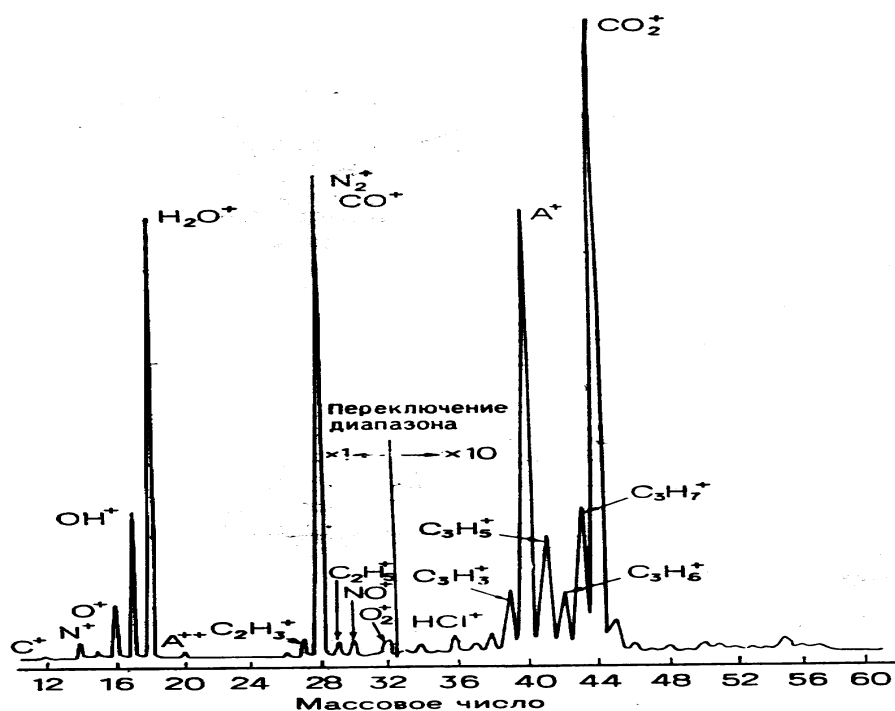


Рис. 1.82. Типичный масс-спектр остаточных газов, полученный с помощью магнитного масс-спектрометра

1.6.4.2. Динамические масс-спектрометры

К классу динамических масс-спектрометров относят такие устройства, где для разделения ионов по массам используют изменяющееся во времени (обычно радиочастотное) электромагнитное поле.

Одним из широко используемых видов динамических газоанализаторов является циклотронный газоанализатор или омегатрон (рис. 1.83). Ионизация газовой среды производится электронным потоком малого поперечного сечения, создаваемым накаливаемым катодом и распространяющимся вдоль оси камеры. Образующиеся ионы накапливаются в полевой

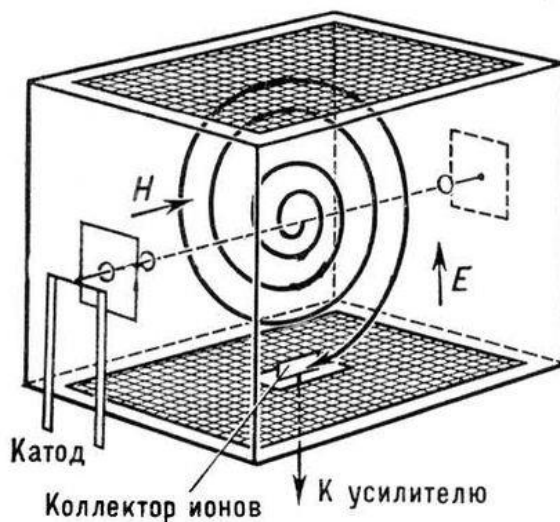


Рис. 1.83. Конструктивная схема омегатрона и принцип его действия

ловушке: их уходу в продольном направлении препятствует электрическое поле, создаваемое торцевыми диафрагмами, а поперечное движение ограничено приложенным вдоль оси системы однородным магнитным полем H .

Движение ионов в магнитном поле вдоль каждой из двух поперечных координат описывается уравнением гармонического осциллятора без затухания с собственной циклотронной частотой $f_c = eB/2\pi m$ (e и m — заряд и масса иона соответственно). Для накачки энергии циклотронных колебаний используется переменное электрическое поле E частоты f , создаваемое с помощью пары пластин (на рис. 1.83 — сверху и снизу, заштрихованы). Напряженность этого поля выбирают такой, что амплитуда поперечных колебаний мала для всех ионов, для которых не выполняется условие резонанса $f_c \approx f$. Резонансные ионы, масса которых соответствует этому условию, получают энергию от поля в течение многих его периодов, двигаются по разворачивающейся спирали и, в конце концов, выходят на коллектор ионов. Изменяя частоту электрического поля, можно выводить на коллектор ионы различных масс, поэтому зависимость тока коллектора от f определяет масс-спектр газовой среды в области ионизации.

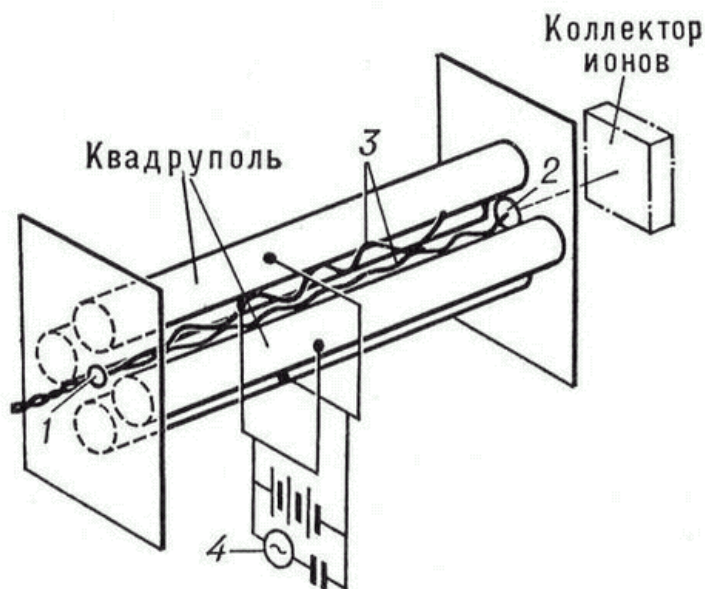


Рис. 1.84. Схема квадрупольного анализатора:
1,2 — входная и выходная апертуры;
3 — типичные траектории ионов;
4 — высокочастотный генератор

Другим видом динамических газоанализаторов, получившим в последнее время широкое распространение, является квадрупольный масс-спектрометр. Схема такого анализатора приведена на рис. 1.84. Пучок ионов из ионного источника через апертуру 1 направляется вдоль оси системы, состоящей из четырех параллельных стержней. Эти стержни используются для создания статического поперечного электрического поля квадрупольной конфигурации, для чего на одну из пар противоположных стержней (например, левый и правый) подают положительный потенциал $+U$, а на другую пару (верхний и нижний) — отрицательный потенциал U .

Понятно, что движение заряженных частиц в таком поле является неустойчивым — ион, хотя бы немного сместившийся от оси в направлении одного из «отрицательных» стержней, будет притягиваться к нему сильнее, чем к противоположному стержню, в результате чего смещение будет монотонно возрастать. Как ни странно, ситуация изменяется, если к статическому квадрупольному полю добавить переменную компоненту (потенциалы стержней становятся равными $+(U + V \cdot \cos \omega t)$ и $-(U + V \cdot \cos \omega t)$). Движение ионов одной из масс становится устойчивым, и такие ионы могут достигнуть коллектора. Значение «резонансной» массы определяется величиной поля, и для получения масс-спектра медленно варьируют во времени U и V , сохраняя постоянным их отношение и наблюдая за изменением тока коллектора.

1.6.4.3. Термодесорбционный газоанализатор

По принципу действия этот тип газоанализаторов коренным образом отличается от рассмотренных ранее. В качестве параметра, позволяющего различать различные компоненты газовой смеси, в данном случае используется не масса молекулы, а энергия (теплота) ее адсорбции на поверхности вольфрама. Конструкция газоанализатора очень проста. В вакуумную камеру, оснащенную откачной системой и вакуумметром полного давления, помещают вольфрамовую нить. Нить прогревают до высокой температуры (более 2000°C) для полной очистки ее поверхности. Затем температуру поверхности снижают до комнатной на время, достаточное для ее покрытия слоем адсорбата. Число молекул каждого сорта в этом слое определяется парциальным давлением данного газа в камере. Далее нить начинают нагревать с постоянной скоростью, одновременно регистрируя

величину полного давления. При приближении температуры к значению, соответствующему теплоте адсорбции одного из компонентов остаточного газа, молекулы этого газа начинают покидать нить, и давление в камере растет.

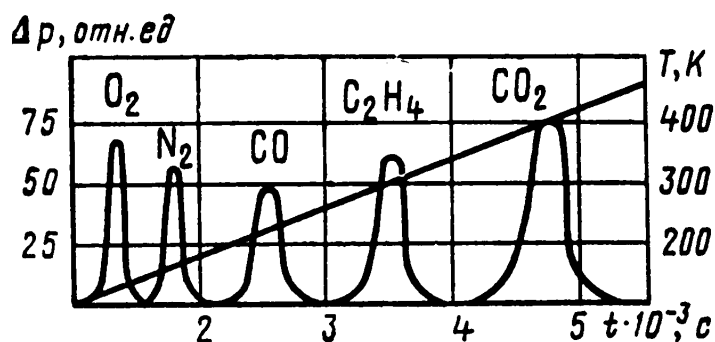


Рис. 1.85. Типичный спектр, полученный с помощью термодесорбционного газоанализатора

Таким образом, при монотонном увеличении температуры регистрируются всплески давления, каждый из которых можно отождествить с одним из сортов газа. Амплитуда всплеска соответствует парциальному давлению. Типичный термодесорбционный спектр приведен на рис. 1.85.

Из спектра видно, что описанный метод позволяет различать даже вещества, молекулы которых имеют одинаковое массовое число, такие как N_2 и CO . При необходимости получения информации о концентрациях газов, имеющих низкие значения теплоты десорбции (например, инертных), очищенную вольфрамовую нить перед началом измерений охлаждают до температуры жидкого азота или еще более низкой температуры.

1.7. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

1.7.1. Уплотнительные прокладки

Помимо описанных в предыдущих разделах вакуумных насосов и вакуумметров, при создании вакуумных систем используется большое количество более простых элементов, служащих для коммутации вакуумных объемов, ввода в вакуум электрических напряжений, токов, излучений, механического движения и т. д. Как правило, эти элементы не используют при функционировании каких-либо нетривиальных физических принци-

пов. Многолетний мировой опыт работы с вакуумом позволил накопить некоторое количество стандартных способов решения типичных задач вакуумной техники.

Вакуумно-плотные *разъемные соединения* используются для быстрого и легкого соединения отдельных устройств и узлов и обеспечивают доступ к тем или иным элементам системы. В условиях сверхвысокого вакуума применяют главным образом фланцевые соединения, элементы которых изготавливают из нержавеющей стали. Стягиваемые болтами фланцы снабжены канавками, куда закладываются эластичные прокладки различной формы. Требования к фланцевым соединениям вакуумной системы достаточно разнообразны: малое натекание, возможность прогрева, удобство пользования. В различных условиях оптимальными оказываются различные конструкции. Используемые в этих конструкциях прокладки должны легко деформироваться под действием относительно невысокой нагрузки и заполнять все неровности на уплотнительной поверхности фланцев. С другой стороны, прокладка должна быть достаточно упругой для обеспечения хорошего контакта между соединяемыми фланцами при возможном их неравномерном сжатии. Материал, из которого изготовлены прокладки, можно использовать для классификации конструкций фланцевых соединений.

Резиновые и эластомерные прокладки используются широко в основном на форвакууме — при рабочем давлении примерно до 10^{-4} Торр, что обусловлено высокими значениями газопроницаемости и упругости паров этих материалов, а также недопустимостью их нагрева. Достоинства таких прокладок связаны с их высокой эластичностью, то есть способностью к упругой деформации даже при небольшой механической нагрузке. Образуемое с их использованием соединение получается надежным, неприхотливым к чистоте обработки фланцев, их загрязнению.

Стягивающее фланцы усилие может быть небольшим. Срок службы прокладок велик (ограничен накоплением неупругих деформаций, наблюдаемым к тому же не для всех сортов резины). В связи с тем, что надежное уплотнение обеспечить несложно, используются весьма разнообразные конструкции фланцев, плоских или с выступами или канавками достаточно произвольной формы. Одна из возможных конструкций фланцевого соединения с эластичной (резиновой) прокладкой показана на рис. 1.86, а.

Сами прокладки могут быть круглыми или прямоугольными в сечении (рис. 1.86, б).

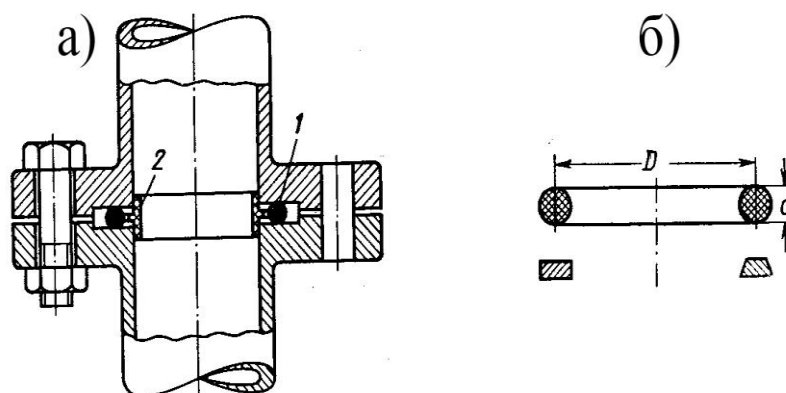


Рис. 1.86. Фланцевое соединение с эластичной прокладкой:
(а) — фланцевое соединение: 1 — прокладка; 2 —
центрирующее кольцо; (б) — эластичная кольцевая
прокладка с круглым (прямоугольным
или трапециевидным) поперечным сечением

Фторопластовые прокладки можно применять при несколько лучшем вакууме (по крайней мере, до 10^{-7} Торр), благодаря меньшему газовыделению этого материала, а также возможности его прогрева до 250°C . Особенностью фторопласта по сравнению с резинами и эластомерами является его невысокая эластичность в сочетании с высокой пластичностью. Под механической нагрузкой (особенно, при повышенной температуре) фторопласт «течет», заполняя мелкие неровности воздействующих на него поверхностей. Поэтому фторопластовые прокладки помещают в канавку, закрываемую выступом противоположного фланца таким образом, что заполняемый фторопластом объем ограничен со всех сторон (рис. 1.87).

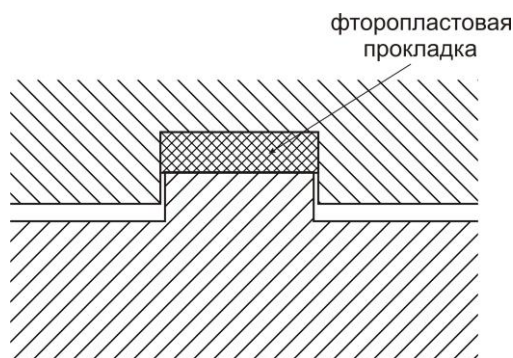


Рис. 1.87. Вариант уплотнения
фторопластовой прокладки

Достоинства получаемого соединения — возможность многократного использования и невысокое значение требуемого усилия затяжки стягивающих фланцы болтов. Недостатки: необходимость время от времени подтягивать болты, компенсируя «утекание» фторопласта.

В системах сверхвысокого вакуума, не допускающих применения органических материалов, используют **металлические уплотнительные прокладки**. Металлические прокладки различных форм и размеров изготавливаются как из мягких металлов (индий, алюминий, золото), так и из более твердых (серебро, отожженная медь, медно-никелевый сплав монель и даже сталь). По сравнению с эластомерными, такие прокладки требуют гораздо больших нагрузок для обеспечения затекания уплотняющего металла в неровности поверхности фланца. Кроме того, они недостаточно эластичны и поэтому могут использоваться только однократно. Установлено, что вакуумно-плотное соединение с использованием металлических прокладок может быть обеспечено только в том случае, когда металл в области контакта подвергается пластической деформации.

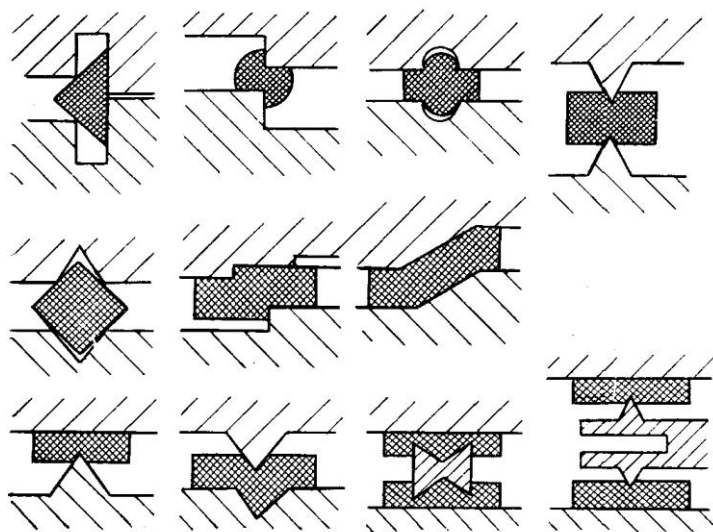


Рис. 1.88. Варианты соединения с использованием медных прокладок

На практике чаще всего встречаются уплотнения с медными прокладками. Конструкции таких соединений в настоящее время в достаточной степени стандартизованы. Медь, будучи достаточно твердым металлом, соответственно требует значительных усилий для деформации. В этом случае применяют фланцевые соединения с канавочно-клиновидным про-

филем уплотняющих элементов. Было предложено множество таких соединений; наиболее широко применяемые из них показаны на рис. 1.88. Общим в этих конструкциях является наличие острого выступа, вдавливаемого в медную прокладку, что позволяет создать достаточное для деформации меди давление при минимальном усилии на стягивающих болтах.

Наиболее удобной в условиях небогатой лаборатории считалась старая советская конструкция, использующая тонкую (0,5 мм) медную прокладку, раздавливаемую между расположенными на фланцах треугольными выступом («зубом») с углом при вершине 90° и канавкой с углом 60° .

Сейчас наиболее широко распространена разработанная фирмой *Varian* система *ConFlat* (рис. 1.89), где медная прокладка большой толщины ~ 2 мм раздавливается между одинаковыми фланцами с треугольными в профиле выступами.

Достоинства соединений типа ConFlat:

- сближение фланцев ограничено, поэтому прокладка не может быть прорезана «зубьями» насквозь, что нередко случается с «советской» системой;

- фланцы одинаковы, что иногда дает дополнительную свободу маневра при использовании элементов.

В целом основное достоинство фланцевых соединений с металлическими прокладками — низкие газовыделение и газопроницаемость, возможность прогрева системы до высоких температур. Недостатки: для достижения пластической деформации требуется сильное сжатие фланцев. Кроме того, прокладка может быть использована ограниченное число раз (при строгом подходе — только один). Обычно в лаборатории при работе со «средним» вакуумом те фланцевые соединения, которые не подвергаются частой разборке, выполняют «на металле», а на нескольких наиболее

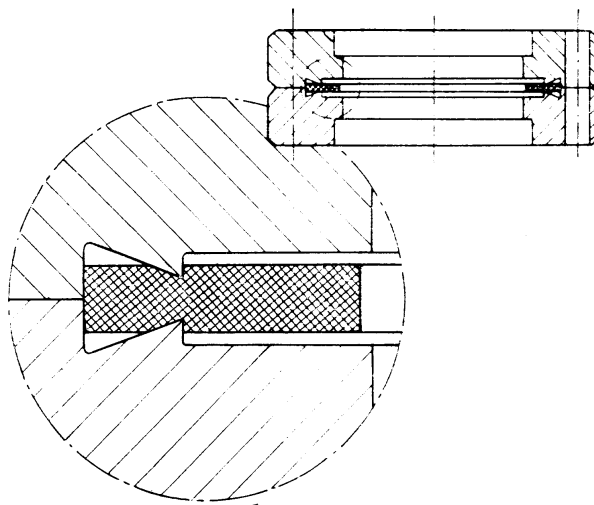


Рис. 1.89. Вакуумное фланцевое соединение типа *ConFlat*

часто используемых фланцевых парах используют фторопластовые прокладки.

1.7.2. Электрические вводы

Следующий класс элементов вакуумных систем — электрические вводы. При их изготовлении в качестве диэлектрика используются стекла или керамики.

Основным преимуществом стекла является дешевизна, а основными недостаткам — относительно низкая температура размягчения и малая механическая прочность, которые ограничивают возможность прогрева изделия (прочность важна из-за появления механических нагрузок при рассогласовании коэффициентов термического расширения).

Ввод проводов для слабых токов (рис. 1.90) осуществляется путем вплавления проволок небольшого диаметра непосредственно в стеклянную стенку вакуумного прибора (которой в этом месте придается соответствующая форма) или в стеклянную бусинку, вплавленную в отверстие металлической стенки прибора (рис. 1.90, *а* и *б* соответственно). Металлы и стекло должны обладать хорошей когезией (взаимным смачиванием) и примерно одинаковыми коэффициентами теплового расширения.

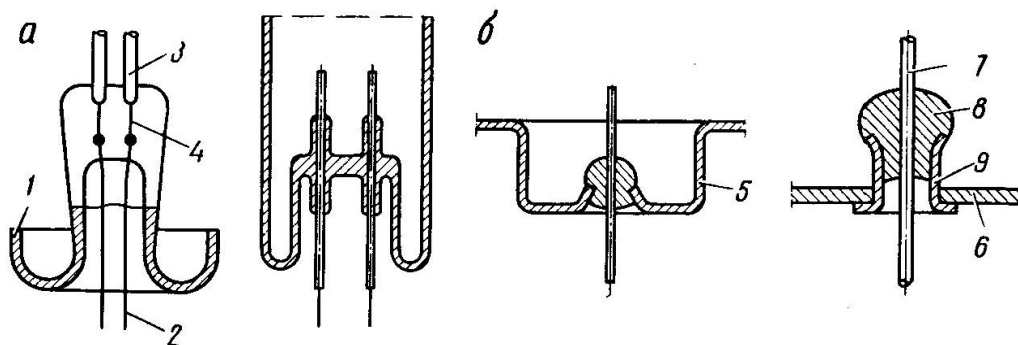


Рис. 1.90. Вводы проводов для слабых токов: (*а*) — медная луженая или платинитовая проволока в стеклянной стенке; (*б*) — провод со стеклянной бусинкой в металлической стенке; 1 — стекло; 2 — медь; 3 — никель; 4 — медная луженая (или платинитовая) проволока; 5 — хромистое железо или иной сплав; 6 — сталь; 7 — молибден; 8 — твердое стекло (молибденовое); 9 — ковар

Вводы для пропускания сильных токов изготавливают с помощью спаев металл-стекло (рис. 1.91) или металл-керамика.

На рис. 1.92 показан ввод проводника с керамической изоляцией на ток до 150 А и напряжение до 3 кВ (допускающий нагрев 700 К). Натекание в таком соединении не превышает 10^{-10} Торр л с⁻¹. Для соединения керамических деталей с металлом их поверхность металлизуют, что дает возможность осуществлять их пайку. Таким образом изготавливают так называемую металлокерамику, т. е. готовые изоляторы с необходимыми металлическими деталями, пригодные для установки в металлический прибор. Структура таких сборок, создаваемых обычно для изготовления заранее известного устройства, может быть достаточно сложной и определяется набором токов и напряжений, которые необходимо вводить в вакуум (например, нужно ввести в вакуум: высокое напряжение, подаваемое на катод, накальный ток на подогреватель, потенциал модулирующего электрода, близкий к катодному и почти бестоковый, и еще какой-нибудь промежуточный анодный потенциал. Все эти напряжения и токи можно ввести через одну специальную металло-керамическую сборку).

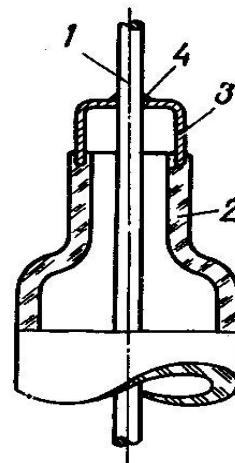


Рис. 1.91. Ввод провода для сильных токов через стеклянную трубу: 1 — провод; 2 — стекло; 3 — чашка из ковара; 4 — припой

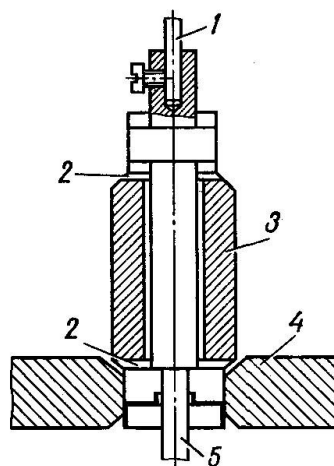


Рис. 1.92. Керамический ввод в металлической стенке для сильных токов: 1 — провод; 2 — спай металл-керамика; 3 — керамическая втулка; 4 — стенка вакуумного прибора; 5 — электрод

1.7.3. Ввод механического движения

Следующая часто возникающая задача — введение в вакуум механического движения. Для низкого и среднего вакуума применяют уплотнения сальникового типа с резиновым или фторопластовыми промежуточными

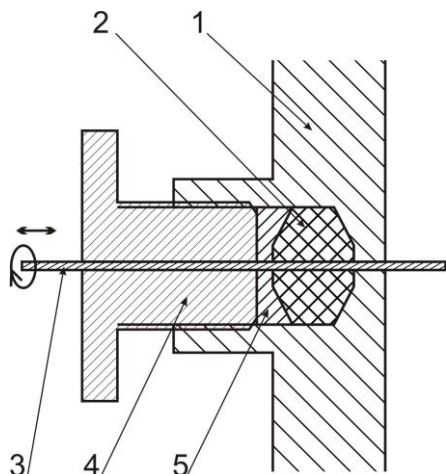


Рис. 1.93. Система передачи вращательного и поступательного движения в вакуум при помощи фторопластового уплотнения:
1 — корпус вакуумного прибора;
2 — фторопластовая втулка; 3 — металлический стержень; 4 — прижимной болт; 5 — металлический плунжер

элементами. Например, система с фторопластовой втулкой (рис. 1.93) позволяет передавать как поступательное, так и вращательное движение стержня без нарушения вакуумирования при давлениях по крайней мере до 10^{-7} Торр (отметим, однако, что при введении в вакуум участка стержня «с атмосферы» вакуум временно портится — до обезгаживания поверхности этого участка).

Для высоковакуумных условий применяют *сильфоны*, представляющие собой отрезки гофрированного тонкостенного (100–200 мкм) шланга из нержавеющей стали или медных сплавов (рис. 1.94). Соединения с использованием сильфонов применяются также для передачи поступательного и вращательного движения извне внутрь вакуумной системы, в вакуумных вентилях, клапанах и т. п.

В вакуумной технике применяются сильфоны диаметром от 10 до 200 мм. Они допускают большие линейные перемещения (по паспорту — до 10 % длины сильфона, на практике даже больше), сдвиговые и изгибные деформации. Максимальный угол изгиба зависит от диаметра сильфона. Например, при диаметре сильфона $D = 30$ мм угловое отклонение может достигать 120° при радиусе изгиба 50 мм. Использующие сильфоны системы передачи вращения в вакуум показаны на рис. 1.95, 1.96.

Латунные сильфоны припаиваются к трубопроводам твердыми припоями, а остальные — посредством электронно-лучевой или дуговой сварки в атмосфере аргона или гелия. Сильфоны допускают прогрев до высоких температур, использующие их узлы достаточно надежны из-за отсут-

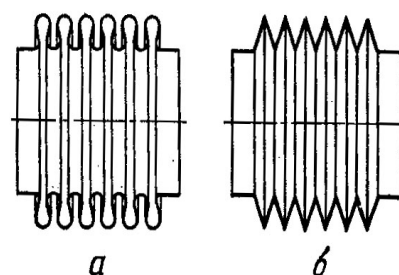


Рис. 1.94. Сильфоны:
(а) — катанный;
(б) — сварной

ствия трущихся деталей. Недостатками сифонных конструкций могут являться небольшое передаваемое усилие и отсутствие достаточной кинематической жесткости.

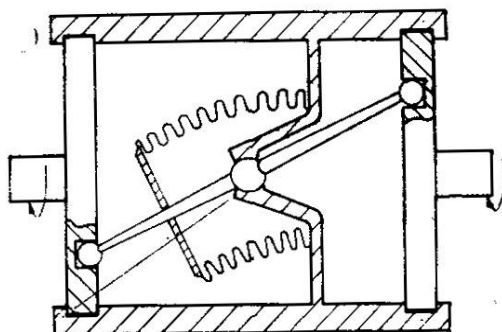


Рис. 1.95. Схема передачи вращательного движения в вакуум при помощи шарниров и сифонного уплотнения

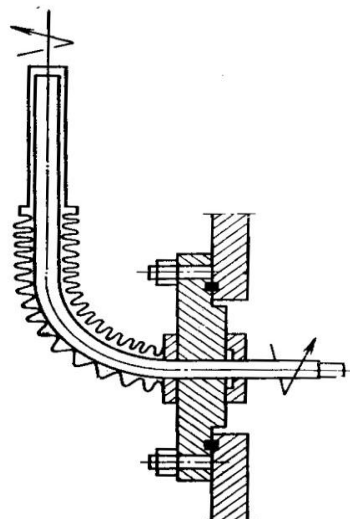


Рис. 1.96. Простое устройство для передачи вращательного движения в вакуум с использованием сифонного уплотнения

1.7.4. Вентили и накататели

Одно из главных применений систем передачи движения — создание коммутационных устройств, позволяющих открывать или закрывать от-

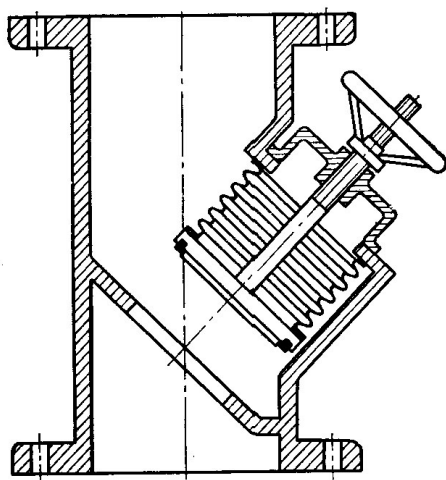


Рис. 1.97. Вакуумный вентиль с сифонным уплотнением

верстия, соединяющие части вакуумной системы (например, насос с откачиваемым объемом). Чаще всего используют так называемые *вакуумные затворы (вентили)* (рис. 1.97), включающие сифон в качестве одного из элементов.

В зависимости от расчетного давления в системе применяют уплотнительные элементы из резины, фторопласта или мягких металлов, чаще всего меди (особенно для

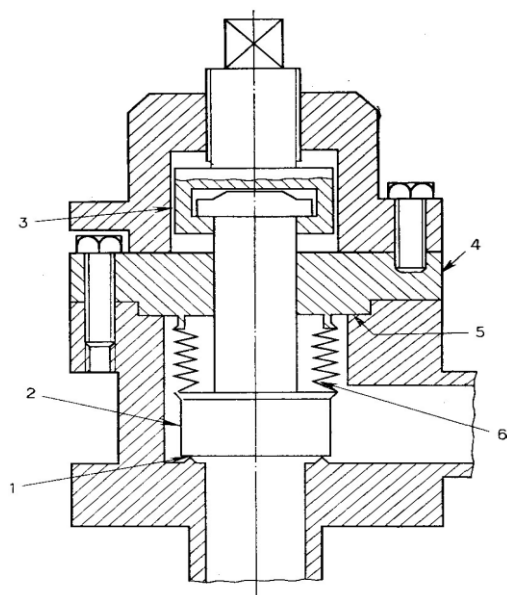


Рис. 1.98. Высоковакуумный угловой затвор: 1 — заостренный кольцевой выступ седла; 2 — медная тарель; 3 — головка штока; 4 — отсоединяемый фланец; 5 — вакуумное уплотнение; 6 — сильфон

проводимость вентиль специальной конструкции (*шибер*) монтируется внутри вакуумной камеры.

Вентили с малой вакуумной проводимостью, предназначенные для дозированного напуска газов, называются *натекателями*. *Игольчатый натекатель* (рис. 1.99) отличается от углового затвора только геометрической формой элементов. Нитевидный натекатель (рис. 1.100) применяется в стеклянных системах, для ввода движения в нем используется магнит.

Для создания регулируемых потоков чистых веществ используют и свойства отдельных газов к селективной диффузии через сплошные перегородки: водород достаточно эффективно диффундирует через накалинные фольги палладия, кислород — через серебро, азот и углекислый газ — через железо, гелий — через тонкое кварцевое стекло.

высоковакуумных систем). Еще одна распространенная конструкция вентиля показана на рис. 1.98. Вакуумный вентиль обычно несимметричен — при его правильном подключении сильфон расположен в низковакуумной части и при закрытом положении затвора не сообщается с вакуумной камерой. Вентили стандартизованы, выпускаются различных размеров, которые характеризуют так называемым условным отверстием D , характеризующим вакуумную проводимость. Проводимость открытого вентиля определяется в основном подводщими патрубками. Поэтому если требуется высокая вакуумная

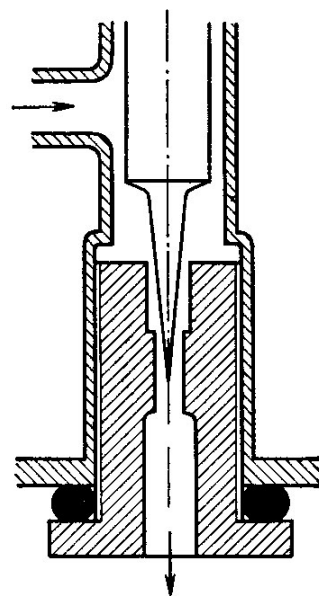


Рис. 1.99. Принцип устройства игольчатого накателя



Рис. 1.100. Регулируемая течь (нитевидный натекатель): пропускная способность капилляра регулируется путем перемещения проволоки с помощью магнита

1.8. АРХИТЕКТУРА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

1.8.1. Вакуумные системы на основе диффузионного и ротационного насосов

Типичный пример сверхвысоковакуумной системы, откачиваемой диффузионным и ротационным насосами, представлен на рис. 1.101.

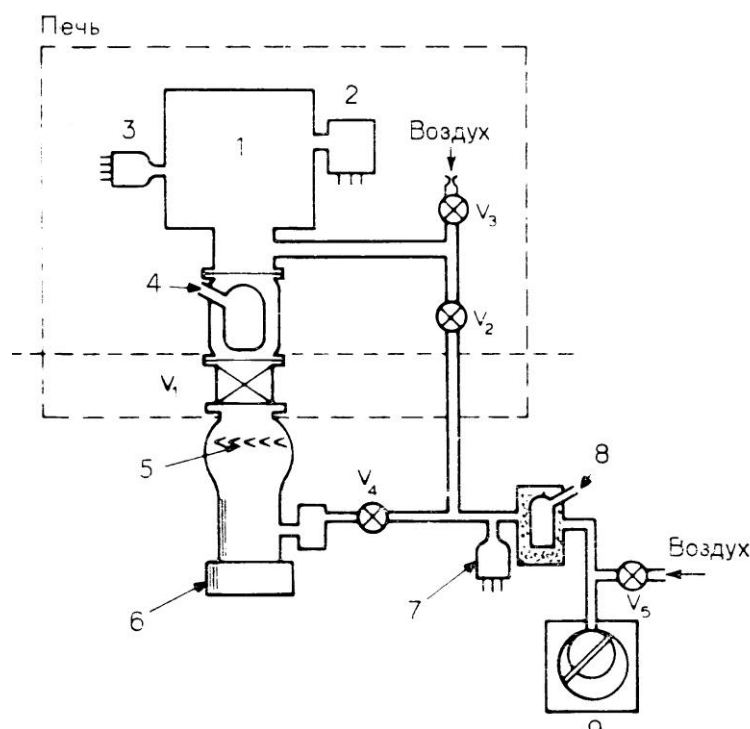


Рис. 1.101. Сверхвысоковакуумная система, откачиваемая диффузионным и ротационным насосами: 1 — рабочая камера; 2 — газоанализатор; 3 — ионизационный вакуумметр; 4 — ловушка, охлаждаемая жидким азотом; 5 — отражатель масляных паров; 6 — диффузионный насос; 7 — вакуумметр Пирани; 8 — цеолитовая ловушка, охлаждаемая жидким азотом; 9 — ротационный насос; V_1 – V_5 — клапаны

Штриховой линией обозначена та часть системы, которая допускает прогрев; к этой части системы относятся клапаны V_1 , V_2 и V_3 . Клапаны V_2 и V_3 обычно делаются цельнометаллическими. Что касается клапана V_1 , то его проводимость должна быть достаточной для обеспечения максимальной производительности диффузионного насоса, следовательно, его проходной диаметр должен быть большим. Цельнометаллическая конструкция такого клапана оказывается довольно дорогой и сложной, поэтому обычно в качестве клапана V_1 используются различного типа затворы с уплотнением из *витона А*, которые способны выдерживать нагрев в открытом положении до 250°C . Если же систему необходимо прогревать до более высокой температуры, то в этом случае печь устанавливают над клапаном V_1 (по уровню средней штриховой линии). В некоторых конструкциях использование клапана V_1 не предусмотрено; в такие системы нельзя напускать атмосферный воздух до полного охлаждения диффузионного насоса.

Диффузионные насосы, работающие на таких жидкостях, как полифениловый эфир или масло на основе нафталина, нуждаются в отражателях паров, охлаждаемых водой, для уменьшения обратного переноса рабочей жидкости. Кроме того, в сверхвысоковакуумных системах между диффузионным насосом и рабочей камерой помещается заливная ловушка, охлаждаемая жидким азотом, которая одновременно является крионасосом для паров воды и двуокиси углерода. В некоторых системах вместо такой ловушки используется криопанель, помещаемая перед охлаждаемым водой отражателем. Охлаждение такой криопанели осуществляется с помощью медного теплопровода, свободный конец которого помещается в сосуд Дьюара с жидким азотом. Для предотвращения попадания масла из форвакуумного насоса в диффузионный следует устанавливать охлаждаемую жидким азотом цеолитовую ловушку.

Откачка проводится по следующей схеме:

- сначала система откачивается до давления $\sim 10^{-1}$ Торр форвакуумным насосом при открытом клапане V_2 (все остальные клапаны закрыты). Это делается для предотвращения откачки больших количеств газа через диффузионный насос, с тем, чтобы не происходил возможный вынос рабочей жидкости из диффузионного насоса вместе с откачиваемым газом;
- затем клапан V_2 закрывается, открывается клапан V_4 , и включается нагрев диффузионного насоса;

- после установления рабочего режима диффузионного насоса открывается затвор V_1 , и система откачивается до давления 10^{-7} Торр;

- затем включается печь, и вся система в течение нескольких часов выдерживается при максимально допустимой температуре;

- затем печь выключается, система охлаждается, а ловушка диффузионного насоса заполняется жидким азотом. На этой стадии для улучшения вакуума возможен дальнейший отжиг той части системы, в которую не входит ловушка, причем желательно, чтобы нагрев осуществлялся до более высоких температур.

Для систем, откачиваемых диффузионным и ротационным насосами, весьма важным является наличие противоаварийных устройств на случай обесточивания системы, прорыва атмосферного воздуха, прекращения подачи воды и др. Для этих целей обычно используют быстродействующие электромагнитные клапаны V_1 , V_2 , V_4 и V_5 . При аварийном отключении электропитания клапаны V_1 , V_2 и V_4 закрываются, а V_5 открывается. Все насосы, клапаны, печи и другие агрегаты системы должны снабжаться аварийными выключателями, которые предотвращают их автоматическое включение при возобновлении подачи электроэнергии. Противоаварийное устройство на случай прекращения подачи воды или сжатого воздуха (если он используется для охлаждения) представляет собой термореле, установленное на корпусе насоса, которое отключает нагреватель насоса и закрывает затвор V_1 при превышении предельной рабочей температуры насоса.

Нити накала ионизационных вакуумметров и газоанализаторов независимо от типа вакуумной системы должны быть защищены от возможного прорыва в систему атмосферного воздуха. Поэтому серийные вакуумметры и газоанализаторы обычно снабжены предохранительными устройствами, отключающими питание нити накала при повышении давления выше предельно допустимого. На случай прорыва в систему атмосферного воздуха необходимо предусмотреть аварийное перекрытие затвора V_1 для предотвращения попадания воздуха в горячий диффузионный насос. В форвакуумную линию системы, представленной на рис. 1.101, включен вакуумметр Пирани, который используется не только для измерения форвакуума, но и для аварийного управления затвором V_1 при резком повышении давления. Кроме того, этот вакуумметр полезен для определения давления, при котором можно включать ионизационный вакуумметр. Иониза-

ционный вакуумметр и газоанализатор перед их включением должны быть также обезгажены согласно инструкции.

В заключение необходимо сказать несколько слов о ловушке, охлаждаемой жидким азотом. Попадание воздуха в систему приводит к конденсации на холодной поверхности ловушки паров воды и двуокиси углерода. Если же в систему прорвется атмосферный воздух, то в ловушке может образоваться жидкий кислород, который при попадании в насос может привести к взрыву. Поэтому в ловушке не должно быть жидкого азота при напуске в систему атмосферного воздуха (запланированном или аварийном). Затвор V_1 может устанавливаться до этой ловушки, если он вместе с механизмом привода допускает нагрев до необходимых температур. Такое расположение затвора позволяет решить проблему аварийного попадания в ловушку атмосферного воздуха.

Поскольку откачивающая система, состоящая из диффузионного и ротационного насосов, обладает высокой производительностью, она наиболее часто используется в различных вакуумных установках по напылению металлов, где обычно имеют место повышенные газовые нагрузки.

1.8.2. Вакуумные системы на основе турбомолекулярных насосов

Такие вакуумные системы во многих отношениях аналогичны системам, в которых откачка осуществляется с помощью диффузионного и ротационного насосов. Существуют компактные вертикальные турбомолекулярные насосы, которые обладают аналогичными диффузионному насосу характеристиками и могут быть использованы вместо него. Турбомолекулярный насос, как правило, откачивается ротационным насосом, так что вакуумная система в этом случае аналогична системе, представленной на рис. 1.101.

Главным отличием системы с турбомолекулярным насосом является отсутствие маслоотражателя и ловушки, что объясняется очень высокой степенью сжатия в турбомолекулярном насосе по отношению к тяжелым молекулам и, следовательно, отсутствием их обратного потока в систему. Однако в большинстве конструкций турбомолекулярных насосов используются смазываемые потоком масла подшипники, которые находятся в зоне высокого вакуума, и при остановке насоса независимо от причин, вызывающих эту остановку, пары масла из подшипников будут попадать в

вакуумную систему. Поэтому на случай аварийного прекращения подачи энергии должна быть предусмотрена защита турбомолекулярного насоса путем быстрого перекрывания электромагнитного затвора V_1 и напуска в насос атмосферного воздуха. Поскольку при быстром напуске атмосферного воздуха поток газа может вынести вместе с собой масло из подшипников, не рекомендуется устанавливать напускной клапан со стороны форвакуума. Для решения этой проблемы в некоторых конструкциях напускной клапан устанавливают между ступенями насоса, что обеспечивает равномерное распределение газового потока между всасывающей и нагнетающей полостями.

Основным недостатком турбомолекулярного насоса является относительно низкая степень сжатия по легким газам, прежде всего по водороду, что приводит к относительно высокому парциальному содержанию водорода в остаточном газе. Парциальное давление водорода может быть снижено, во-первых, уменьшением содержания водорода в форвакуумной линии и, во-вторых, использованием дополнительных высоковакуумных откачивающих устройств. Низкое давление водорода в форвакуумной линии может быть достигнуто, в основном, путем использования правильно выбранного ротационного насоса, а также соответствующего масла. Турбомолекулярный насос можно откачивать также диффузионным насосом, который, в свою очередь, откачивается ротационным. Но наилучшим, по-видимому, решением этой проблемы является использование турбомолекулярного насоса совместно с титановым сублимационным насосом, устанавливаемым на входе турбомолекулярного насоса. Сублимационный насос характеризуется высокой скоростью откачки активных газов, особенно водорода, и не требует непрерывной работы.

Большинство конструкций турбомолекулярных насосов позволяет проводить их прогрев приблизительно до 100°C , что делается с помощью ленточных нагревательных элементов или встроенного в корпус специального нагревателя. Методика проведения откачки и прогрева вакуумной системы в основном такая же, как и в случае системы, откачиваемой диффузионным насосом.

1.8.3. Вакуумные системы на основе ионных насосов

В случае ионного насоса откачиваемый газ поглощается непосредственно в насосе и не выбрасывается в атмосферу, так что нет необходимости в использовании непрерывно работающего форвакуумного насоса. Однако начальное давление, при котором ионный насос может быть включен, составляет около 10^{-2} Торр.

Поскольку одним из основных достоинств ионного насоса является полное отсутствие любых загрязняющих органических примесей, использование масляного ротационного насоса для получения форвакуума в этом случае нецелесообразно. Хотя и существуют механические безмасляные насосы для получения «чистого» форвакуума, достигаемое с их помощью разрежение недостаточно для работы ионного насоса. Поэтому обычно ионный насос используется совместно с сорбционным. На рис. 1.102 представлена типичная схема подключения этих насосов.

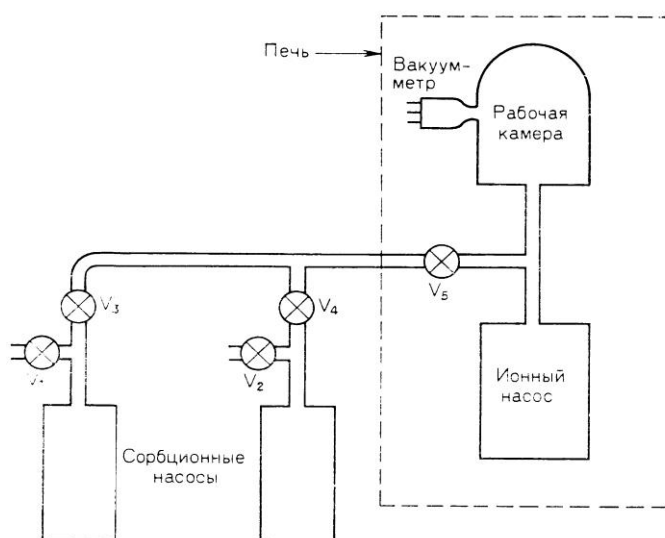


Рис. 1.102. Простейшая сверхвысоковакуумная система, откачиваемая с помощью ионного насоса

Ионный насос не нуждается в использовании ловушки и отражателя, а также в противоаварийных устройствах при внезапном прекращении подачи энергии. Однако при повышении давления может произойти перегрев насоса. Обычно между ионным насосом и вакуумной системой не требуется затвор. Отсутствие ловушки и затвора позволяет максимально использовать эффективность действия ионного насоса; в некоторых вакуумных

системах с этой целью насос устанавливают непосредственно в рабочей камере.

Откачка осуществляется следующим образом:

- при включении системы на откачку вначале необходимо активировать сорбционные насосы путем их нагревания до 250°C ; при этом клапаны V_1 и V_2 должны быть открыты, а V_3 и V_4 закрыты. В результате происходит удаление паров воды из цеолита, адсорбированных в нем при контакте с атмосферным воздухом;

- после этого клапаны V_1 и V_2 закрываются, а насосы охлаждаются до температуры жидкого азота. Газ, находящийся в насосах, эффективно охлаждает цеолитовые гранулы, обладающие плохой собственной теплопроводностью;

- затем первый сорбционный насос с помощью клапана V_3 подключается к системе, давление в которой постепенно снижается примерно до 10^{-2} Торр. На этой стадии (при открытом V_5) систему целесообразно подвергнуть предварительному прогреву (до $\sim 120^{\circ}\text{C}$) для повышения эффективности удаления паров воды с внутренней поверхности стенок камеры;

- потом, перекрывая клапан V_3 и открывая V_4 , продолжают откачку системы вторым, «незаполненным» сорбционным насосом. При этом температура прогрева системы может быть повышена до 250°C , а ионный насос приведен в действие. Такой прогрев не только улучшает обезгаживание системы, но и обеспечивает «регенеративный» нагрев ионного насоса, благодаря которому достигается максимальная его производительность. Считается, что повышение температуры увеличивает эффективность распыления металла катода и повышает скорость диффузии поверхностно связанного газа. В результате такого отжига давление в системе должно снизиться, по крайней мере, до 10^{-5} Торр;

- затем отключают сорбционные насосы, перекрывая клапаны V_4 , V_5 , и повышают температуру рабочей камеры до 450°C , оставляя неизменной температуру ионного насоса ($\sim 250^{\circ}\text{C}$). В результате, после остывания рабочей камеры в системе достигается предельное давление $<10^{-10}$ Торр.

Для удаления значительных количеств активных газов, которые могут выделяться в систему, целесообразно использовать титановый сублимационный насос. Адсорбционный и ионный насосы имеют ограниченную газопоглощающую емкость, особенно в отношении инертных газов, поэтому

могут возникнуть проблемы при откачивании систем с большими потоками инертных газов. Емкость адсорбционных насосов может быть увеличена путем предварительного их откачки с помощью дополнительного безмасляного механического насоса. В этом случае адсорбционные насосы активируются путем их прогрева при более низких давлениях (обычно не выше 10^{-6} Торр), и в системе достигается более низкое парциальное давление неона. Предварительная продувка системы сухим азотом также позволяет создать адсорбционными насосами более высокий вакуум. Для увеличения газопоглощающей емкости ионного насоса целесообразно использовать небольшой дополнительный ионный насос, которым откачивается основной ионный насос в процессе его регенеративного нагрева. Рассмотренная выше система представлена на рис. 1.103.

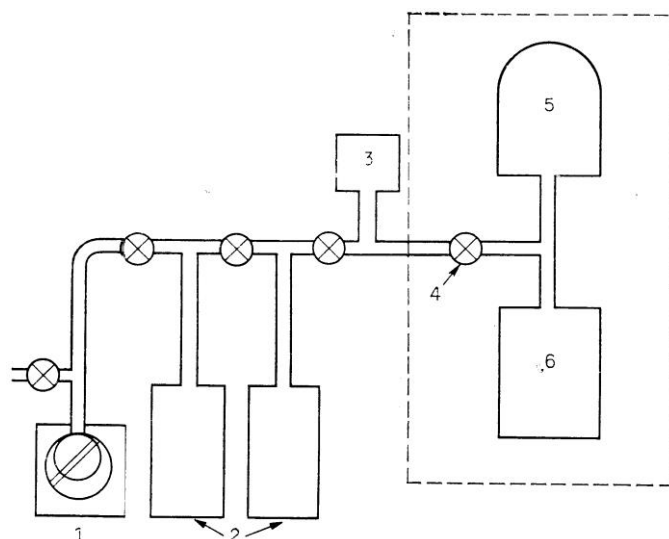


Рис. 1.103. Усовершенствованная сверхвысоковакуумная система: 1 — безмасляный ротационный насос; 2 — сорбционные насосы; 3 — малогабаритный вспомогательный ионный насос; 4 — прогреваемый цельнометаллический клапан; 5 — рабочая камера; 6 — основной ионный насос

Альтернативным решением проблемы удаления больших потоков газа является использование гибридной системы откачки, особенно ионного насоса в паре с турбомолекулярным.

Такая установка, представленная на рис. 1.104, удобна для длительных по времени экспериментов, когда возможно возникновение больших газовых нагрузок. Турбомолекулярный насос удаляет из системы в атмо-

сферу основную часть газа, обеспечивая необходимые начальные значения газового потока и давления для ионного насоса, который, в свою очередь, создает сверхвысокий вакуум. В системах этого типа затвор V_1 и клапан V_2 должны допускать прогрев.

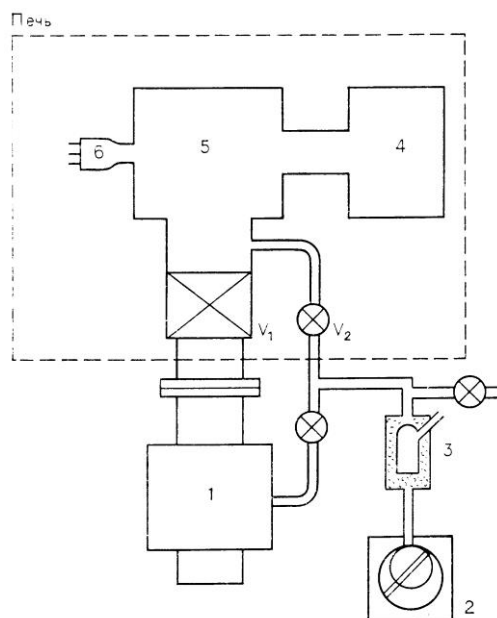


Рис. 1.104. Гибридная схема откачки, рассчитанная на большие газовые нагрузки: 1 — турбомолекулярный насос; 2 — ротационный насос; 3 — цеолитовая ловушка, охлаждаемая жидким азотом; 4 — ионный насос; 5 — рабочая камера; 6 — ионизационный вакуумметр; V_1 — прогреваемый затвор; V_2 — прогреваемый клапан

1.8.4. Вакуумные системы на основе крионасосов

Вакуумные системы с крионасосами в основном аналогичны системам с ионными насосами. Криооткачка, как и ионная, характеризуется отсутствием загрязняющих примесей и возможностью размещения насоса непосредственно в рабочей камере; в дополнение к этому крионасосы обладают более высокой скоростью откачки.

В больших вакуумных системах, например, имитаторах условий космического пространства, используются специально сконструированные

наливные крионасосы. В небольших же системах используются серийно изготавливаемые криогенераторы, подсоединяемые к криопанели, установленной непосредственно в вакуумной системе. Вследствие ограниченной газовой емкости таких насосов вакуумная система должна быть предварительно откачана с помощью другого насоса. Очевидно, что лучше всего для этого подходит не создающий загрязнений адсорбционный насос. Однако при необходимости откачивать большие количества инертного газа, например, аргона, использование адсорбционного насоса не всегда приводит к удовлетворительным результатам.

Хотя криопанель эффективно откачивает аргон, она имеет ограниченную газовую емкость и требует регенерации; в этом случае возникает также проблема откачки аргона сорбционными насосами. Поэтому для этих целей обычно рекомендуют использовать ротационные насосы с хорошей защитой от попадания в систему паров масла.

Кроме того, поскольку ротационный насос используется только на начальной стадии откачки, возможное загрязнение системы минимально. Количество загрязняющих примесей может быть дополнительно уменьшено путем использования ротационного насоса в режиме вязкого течения, т. е. при давлениях не ниже 1 Торр. Однако при таких давлениях, кроме повышенной газовой нагрузки на криопанель, в процессе захолаживания насоса происходит конденсация CO_2 и паров H_2O не только на теплозащитном экране, но и на самой криопанели, что приводит к заметному уменьшению поглощающей способности активированного покрытия криопанели, и, как следствие, к ухудшению откачки водорода и гелия на последующих стадиях откачки. Эта проблема может быть частично решена установкой затвора между камерой и насосом. На рис. 1.105 показана схема такой вакуумной системы.

Благодаря своей высокой скорости откачки крионасосы часто применяются в системах, нагрев которых до высоких температур по каким-либо причинам затруднен. Для уменьшения газовыделения с поверхности стенок рабочую камеру можно охлаждать жидким азотом. В этом случае интерпретировать показания ионизационного вакуумметра следует с особой осторожностью. Даже если стенки камеры не охлаждаются, расположение вакуумметра в системе относительно рабочей камеры, откачиваемой крионасосом, является существенным, поскольку его показания зависят от по-

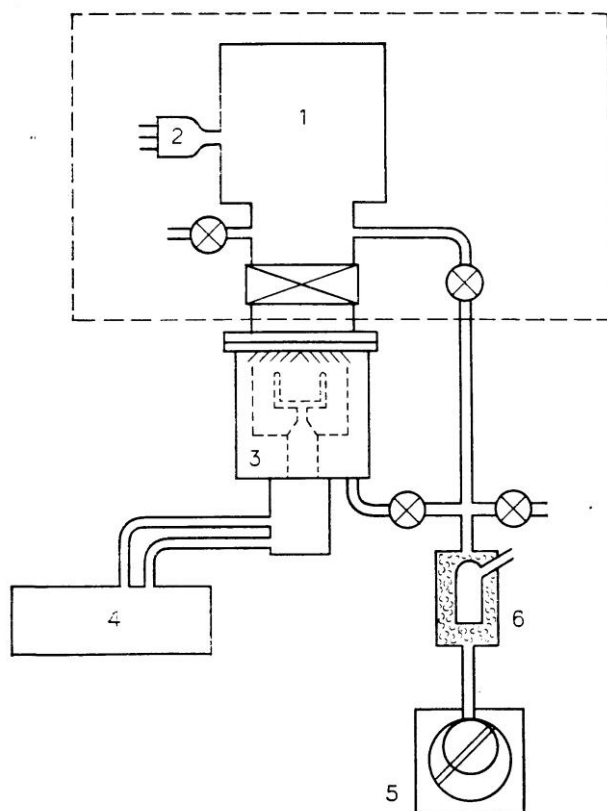


Рис. 1.105. Сверхвысоковакуумная система, откачиваемая с помощью крионасоса и ротационного форвакуумного насоса: 1 — рабочая камера; 2 — ионизационный вакуумметр; 3 — крионасос; 4 — гелиевый компрессор; 5 — ротационный насос; 6 — ловушка

го водой отражателя, помещенного между насосом и рабочей камерой, приводит к значительному снижению скорости откачки системы.

Поскольку скорость откачки крионасоса по водороду относительно мала, включение в систему дополнительного сублимационного насоса становится весьма целесообразным. Кроме того, крионасос может быть использован совместно с другими высоковакуумными насосами, например, ионным или турбомолекулярным. Однако следует отметить, что стоимость крионасоса (а главное, расходного материала — жидкого гелия) высока, и, следовательно, использование его в гибридной системе откачки оправдано только в том случае, когда он существенно улучшает характеристики системы.

ложения вакуумметра относительно криопанели. Ионизационный вакуумметр измеряет концентрацию газа, а не давление, и, следовательно, если газ в вакуумметре находится при температуре T_1 , а во всей остальной системе — при T_2 , то показания ионизационного вакуумметра, в соответствии с (1.24), будут соответствовать давлению $p_i = p(T_2/T_1)^{1/2}$, где p — истинное давление в системе.

Прогрев системы, откачиваемой крионасосом, может быть связан с некоторыми трудностями. Поскольку крионасосы обычно выдерживают лишь ограниченную тепловую нагрузку, то при нагреве системы, например, до 450°C , температура криопанели может превысить ее рабочую температуру. Использование для защиты от теплового излучения охлаждаемо-

1.9. СРЕДСТВА ТЕЧЕИСКАНИЯ

Наличие в вакуумных системах течей не позволяет достичь предельного вакуума. Обнаружение, локализация и ликвидация течи представляют собой, как правило, весьма сложную задачу и часто требуют значительных усилий и времени. Что касается сверхвысоковакуумных систем, то в этом случае даже предельно малые течи крайне нежелательны. К счастью, ввиду высокой степени разрежения, а также использования в этих системах высокочувствительных вакуумметров, обнаружение и локализация малых течей по сравнению с системами более грубого вакуума во многих случаях значительно упрощается.

Для выяснения причины плохого вакуума следует изолировать систему от насоса и следить за нарастанием давления в ней. Если сначала давление газа растет быстро, а затем выходит на насыщение, то причиной плохого вакуума является, вероятнее всего, выделение газа со стенок системы или присутствие загрязняющих веществ с высоким давлением паров. Если же давление продолжает непрерывно расти, то в этом случае следует искать в системе течь. Наличие в системе клапанов позволяет последовательно (посекционно) проверять на течь различные ее участки, тем самым сужая зону поиска. Время, необходимое для выявления малых течей, может быть весьма значительным, так что при невозможности достичь требуемого разрежения следует в первую очередь воспользоваться указанным методом определения течи, а не искать какие-либо иные причины натекания газа в систему.

1.9.1. Вакуумметрический метод

Этот метод наиболее часто применяется в сверхвысоковакуумных системах, поскольку в этих системах обычно имеется по крайней мере один чувствительный ионизационный вакуумметр. Вакуумметрический метод представляет собой простой и сравнительно быстрый способ отыскания течей; его чувствительность ограничена только чувствительностью контрольно-измерительной аппаратуры. Другими словами, если требуемое предельное давление в непрерывно откачиваемой вакуумной системе соответствует рабочему диапазону вакуумметра, то с помощью этого прибора, в принципе, может быть обнаружена любая течь, способная вызывать увеличение предельного давления. Таким образом, в большинстве случаев ис-

пользование этого метода вполне достаточно для проверки системы на герметичность.

Для определения малых течей через стенки вакуумных элементов наиболее часто применяют пластиковый чехол (полиэтиленовый пакет) с пробным газом, которым охватывают отдельные участки оболочки. Прошедший сквозь течь пробный газ регистрируется помещенным внутри системы датчиком. Чувствительность датчика зависит от рода газа, а его показания по мере проникновения пробного газа сквозь течь изменяются. Чувствительность ионизационных вакуумметров различна для разных газов; так, для вакуумметра Байярда–Альперта (ВБА) чувствительность по *гелию* в 5 раз хуже, чем по *азоту*. ВБА наиболее широко используется в системах сверхвысокого вакуума и представляет собой достаточно подходящий датчик для обнаружения течей при использовании гелия в качестве пробного газа.

После обнаружения течи для ее локализации стенки вакуумной системы обдувают пробным газом с помощью наконечника с соплом. Однако при перемещении наконечника по поверхности течь можно пропустить вследствие слишком кратковременного обдува места течи. Поэтому на поиск места течи иногда затрачивается слишком много времени. Предварительная проверка на герметичность элементов конструкции вакуумной установки, а также прогнозирование возможных мест течи, основанное на практическом опыте, могут значительно ускорить поиск.

При значительной течи, когда давление остаточного газа довольно высокое, влияние пробного газа, проходящего через течь, на общий ток в датчике может быть незначительным, особенно если пробный газ разбавлен воздухом. В этом случае лучше использовать ацетон (спирт). Быстрое испарение ацетона или даже возможная закупорка им относительно небольших течей приводит к существенному изменению давления.

Для обеспечения повышенной чувствительности в качестве пробного необходимо использовать такой газ, который при замещении воздуха обеспечивает максимальное изменение сигнала, регистрируемого вакуумметром. Этот эффект зависит не только от относительных чувствительностей вакуумметра по отношению к воздуху и пробному газу, но также и от быстроты их удаления из системы. Это, в свою очередь, зависит от типа используемого в системе насоса.

Диффузионный насос. В типичном случае малых течей, когда выполняются условия молекулярного течения, давление в системе, откачиваемой диффузионным насосом, при замещении воздуха пробным газом изменяться не будет. Этот эффект объясняется тем, что и скорость натекания газа, и быстрота его откачки в первом приближении связаны между собой как корни квадратные из молекулярной массы газа, поэтому:

$$p_v = \frac{Q_a}{S_a} = \frac{Q_b}{S_b}, \quad (1.71)$$

где S — скорость откачки, Q — скорость натекания.

Поскольку при замещении воздуха пробным газом изменения давления не происходит, в системах, откачиваемых диффузионным насосом (для обеспечения максимального кажущегося изменения давления), в качестве пробного используется такой газ, чувствительность вакуумметра по которому максимально отличается от чувствительности по воздуху. Обычно для вакуумметра Байярда–Альперта использование *гелия* в качестве пробного газа вполне удовлетворяет указанному требованию. Для этих целей могут быть использованы и другие, более дешевые газы, например, *бутан*, чувствительность вакуумметра по которому относительно *азота* составляет 4,46. Эмпирически использование бутана в качестве пробного газа приводило к наилучшим результатам по сравнению с большинством других пробных газов.

Ионный насос. При откачке с помощью ионного насоса существенным фактором является более низкая скорость откачки инертных газов по сравнению с активными газами. Например, при использовании *гелия* в качестве пробного газа в процессе откачки будет происходить увеличение его парциального давления, но чувствительность по нему хуже, поэтому при замещении остаточного газа гелием показания вакуумметра изменятся мало, и течь будет трудно обнаружить. Поэтому гелий не рекомендуется применять в качестве пробного газа для таких систем. С другой стороны, для более тяжелого инертного газа *аргона*, чувствительность манометра по которому в 1,5 раза выше, чем по азоту, увеличение давления за счет того, что он плохо откачивается ионными насосами, будет приводить к еще большему увеличению показаний вакуумметра.

Турбомолекулярные насосы. Быстрота откачки вакуумных систем турбомолекулярными насосами не зависит от рода газа. Однако от этого параметра существенно зависит степень сжатия откачиваемого газа, которая экспоненциально зависит от $\sqrt{m}$. Например, степень сжатия для *азота* составляет $8 \cdot 10^8$, тогда как для *гелия* — только $2,5 \cdot 10^4$. Это означает, что если в системе находится азот, предварительно откачанный до 10^{-2} Торр, то таким насосом его давление может быть уменьшено до 10^{-11} Торр, тогда как в случае гелия в аналогичных условиях — до 10^{-7} Торр. Если же давление в системе значительно ниже 10^{-7} Торр, то *гелий*, просачивающийся через канал течи, будет приводить к существенному повышению давления, и в результате, несмотря на более низкую чувствительность вакуумметра по гелию, будет наблюдаться существенное изменение показаний прибора.

Крионасосы. В системах с криооткачкой использование гелия в качестве пробного газа также дает удовлетворительные результаты, поскольку он плохо откачивается криопанелью (как и в случае ионного насоса). Правда, при этом могут возникнуть проблемы с удалением гелия из системы после обнаружения течи. Поэтому в таких системах, наряду с другими инертными газами, целесообразно использовать в качестве пробных такие активные газы, как CO_2 и O_2 .

1.9.2. Метод обнаружения течей при помощи ионного насоса

Установившийся разрядный ток в ионном насосе пропорционален давлению, но поскольку это ионизационный ток, его величина зависит также от состава откачиваемого газа. Поэтому изменение состава газа при просачивании пробного газа сквозь канал течи будет приводить к изменению разрядного тока, так что, как и в случае ионизационного вакуумметра, ионный насос может быть использован в качестве течеискателя. Изменение состава газа приводит не только к изменению тока за счет различных коэффициентов ионизации, но также к изменению скорости откачки ионного насоса, что, в свою очередь, вызывает изменение давления в самом насосе. В результате будет происходить еще большее изменение тока. *Аргон* в качестве пробного газа вызывает увеличение тока, а *кислород* — его уменьшение. Этот эффект подобен тому, который обсуждался выше при рассмотрении в качестве течеискателя ионизационного вакуумметра совместно с ионным насосом.

1.9.3. Галогенный метод

Галогенный течеискатель представляет собой устройство, датчик которого специально сконструирован для обнаружения течей в системах. Хотя он и не настолько чувствителен, как ионизационный вакуумметр, его пороговая чувствительность в оптимальном режиме работы составляет около 10^{-8} Торр л с⁻¹. Этот метод обнаружения течей довольно практичен и особенно эффективен в отношении систем, работающих вблизи верхней границы области сверхвысокого вакуума (порядка 10^{-8} Торр).

Это устройство основано на явлении поверхностной ионизации. Если молекулы газа налетают на накалившуюся металлическую пластину, то при последующей десорбции некоторая их часть превращается в положительные ионы. Отношение числа ионов N_+ к числу нейтральных молекул N_0 , покидающих поверхность за 1 секунду (*степень поверхностной ионизации*), выражается формулой Ленгмюра–Саха:

$$\frac{N_+}{N_0} = \beta \cdot e^{\frac{-eV_i + \phi}{kT}}, \quad (1.72)$$

где β — константа, зависящая от рода газа и металла, ϕ — работа выхода электрона из металла, e — заряд электрона, V_i — потенциал ионизации молекул газа. Очевидно, что число ионов будет тем больше, чем сильнее работа выхода превышает потенциал ионизации.

Датчик галогенного течеискателя, как правило, представляет собой диод с цилиндрическими электродами. Так как он может работать и при атмосферном давлении, все электроды, включая подогреватель, делают из платины. Внутренний цилиндр диода делают либо в виде спирали из платиновой проволоки, намотанной на керамическую трубку, либо в виде подогревного платинового цилиндра. Этот электрод при нагревании до температуры 1100–1200 К эмитирует положительные ионы, количество которых резко возрастает в присутствии газов, содержащих галогены, например, *фреона-12* (CCl_2F_2). Несмотря на то, что течеискатели успешно работают и выпускаются промышленностью, механизм их работы до сих пор еще не вполне выяснен. Сейчас установлено, что Pt, как правило, содержит примеси щелочных металлов и при накале эмитирует ионы K^+ и Na^+ , выход которых в присутствии даже малых количеств галогенов существенно уве-

личивается (*галогенный эффект* поверхностной ионизации). Наиболее вероятными представляются две возможные причины этого эффекта: повышение работы выхода поверхности накаливаемой платины в присутствии галогенов и травление этой поверхности активными газами, в результате которого облегчается выход из объема примесных атомов по дислокациям и другим дефектам.

Корпус датчика снабжен соответствующими фланцами, с помощью которых он может подсоединяться к вакуумной системе. Течь в системе обнаруживается методом обдува конструкции струей *фреона* и прокачиванием пробного газа через течеискатель с помощью насосов самой вакуумной системы. Кроме того, выпускаются галогенные течеискатели, способные работать при атмосферном давлении. В этом случае в течеискателе установлен вентилятор для засасывания воздуха через пробное сопло; вакуумная система, предварительно заполненная смесью воздуха с фреоном при давлении, превышающем атмосферное, подвергается зондированию с внешней стороны. Этот прибор обычно применяется для проверки на герметичность отдельных узлов системы до их сборки.

1.9.4. Масс-спектрометрический метод

Наиболее чувствительным и универсальным течеискателем для сверхвысоковакуумных систем является устройство на основе масс-спектрометра, настроенного на одну массу, соответствующую пробному газу. Для этих целей может быть использован масс-спектрометр практически любого типа, однако большинство серийных масс-спектрометрических течеискателей построено на основе магнитно-секторного анализатора.

Для достижения максимальной чувствительности приходится до некоторой степени жертвовать разрешающей способностью. Поэтому в качестве пробного газа необходимо использовать такой газ, который:

- имеет массовое число, характерное только для него и не встречающееся у молекул других газов;
- легко может быть идентифицирован;
- содержится в атмосферном воздухе в минимальном количестве;
- является достаточно легким, чтобы снизить требования к разрешению $\Delta M/M$ масс-спектрометра.

Гелий, массовое число которого равно 4, удовлетворяет всем этим требованиям и, с учетом его инертности, является идеальным пробным газом.

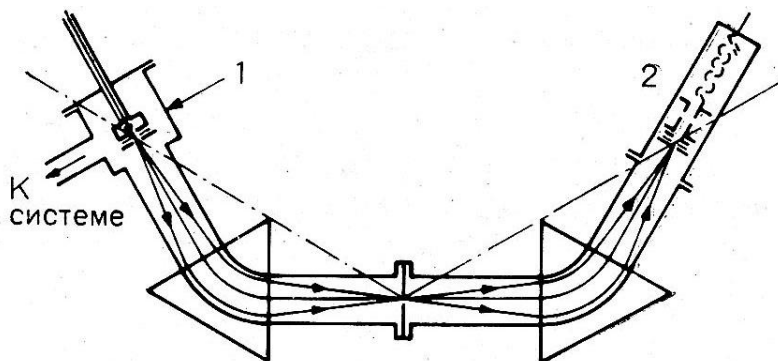


Рис. 1.106. Масс-спектрометрический анализатор магнитного секторного типа: 1 — источник ионов; 2 — умножитель

Основанные на использовании гелия масс-спектрометрические течеискатели обычно называют гелиевыми течеискателями. Течеискатель, по существу, состоит из двух 60-ти градусных магнитных анализаторов, установленных последовательно, как показано на рис. 1.106.

Вылетающие из первого анализатора ионы гелия и фоновые ионы проходят через выходную щель и попадают во второй анализатор, в котором происходит повторная их фокусировка, в результате чего фоновый ток значительно уменьшается. Первый течеискатель такого типа был сконструирован для лабораторных целей, но впоследствии стал выпускаться серийно. Вне зависимости от конструкции масс-спектрометрического анализатора важно отсутствие фонового сигнала, вызываемого загрязняющими примесями. Для достижения адекватного обезгаживания и полного устранения загрязнений анализатор должен быть прогреваемым.

Поэтому в некоторых серийных течеискателях блок анализатора постоянно поддерживается в нагретом состоянии для предотвращения поглощения газов элементами его конструкции, тогда как в других предусмотрен нагрев только ионного источника.

В отличие от остальных течеискателей, масс-спектрометрические течеискатели, выпускаемые серийно, снабжены собственной вакуумной системой, которая состоит из насосов предварительного и высокого вакуума,

клапанов, вакуумметров и электронных блоков управления. Такой прибор показан на рис. 1.107.

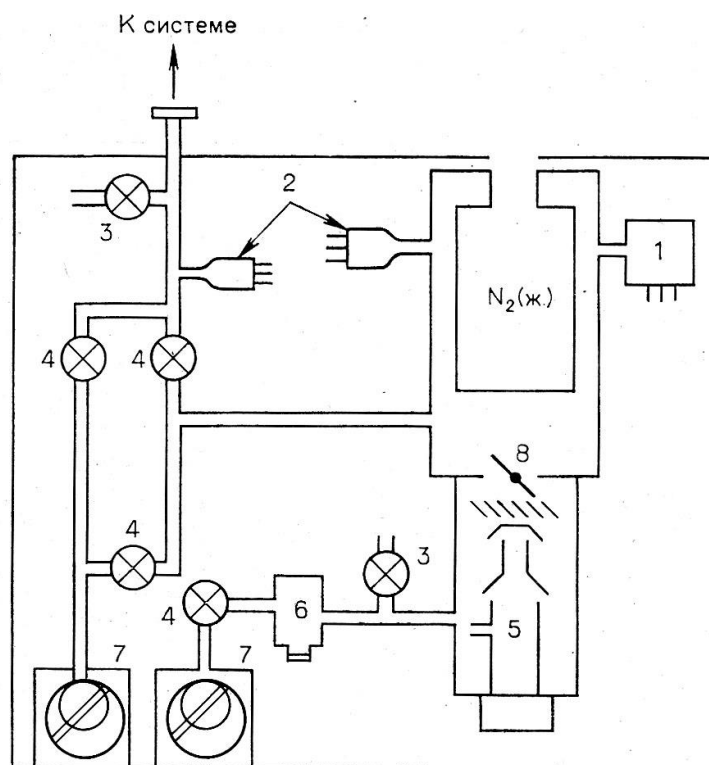


Рис. 1.107. Масс-спектрометрический течеискатель: 1 — масс-спектрометрический анализатор; 2 — вакуумметры; 3 — клапаны напуска атмосферного воздуха; 4 — клапаны; 5 — диффузионный насос; 6 — ловушка; 7 — форвакуумные ротационные масляные насосы; 8 — дроссель для регулирования быстроты откачки

В своем большинстве масс-спектрометрические течеискатели являются универсальными приборами; они используются как для оценки герметичности отдельных элементов вакуумных установок, так и для обнаружения течей в системах. В последнем случае течеискатель подсоединяется непосредственно к проверяемой системе. Поскольку течеискатель снабжен собственной системой откачки, перед началом испытаний его можно отградуировать и использовать для прямых измерений скорости натекания. Меняя быстроту откачки системы, можно регулировать такие параметры прибора, как постоянная времени и величина фонового сигнала.

Для обнаружения течей в сверхвысоковакуумной системе течеискатель обычно подсоединяется к линии предварительного разрежения при отключенном высоковакуумном насосе системы. Вначале система откачивается собственным форвакуумным насосом, а затем откачивающей системой течеискателя, которая, как правило, состоит из ротационного и диффузионного насосов.

Некоторые течеискатели снабжены дополнительным *ротационным насосом* для создания в системе предварительного разрежения. При достижении разрежения $< 10^{-5}$ Торр включается прогрев катода, и ловушка заполняется жидким азотом. Большинство вакуумных течеискателей может работать в диапазоне давлений 10^{-4} – 10^{-10} Торр. Этот диапазон также соответствует динамическому диапазону скоростей натекания, измеряемых масс-спектрометрически.

Для измерения давления в вакуумной системе течеискателя в зависимости от его значения обычно используются вакуумметр Пирани и ионизационный вакуумметр.

Известен альтернативный метод обнаружения течей, в котором используется характерная для турбомолекулярных и диффузионных насосов зависимость степени сжатия откачиваемого газа от рода газа. Для этого проверяемая на течь вакуумная система подсоединяется к форвакуумной линии (к выхлопу турбомолекулярного насоса) откачной системы течеискателя, а масс-спектрометрический анализатор — ко входу турбомолекулярного насоса (рис. 1.108).

В процессе откачки производится разделение удаляемых газов, определяемое степенью сжатия легкого пробного газа (He) и более тяжелых газов (H_2O , N_2 , O_2), которые присутствуют главным образом в системе с течью. Следовательно, через насос (против течения) *гелий* будет диффундировать интенсивнее, чем остальные газы. Поэтому относительное содержание гелия на стороне высокого вакуума будет значительно превышать его содержание на выхлопе насоса; другими словами, турбомолекулярный насос можно рассматривать как фильтр легких газов.

Хотя эксплуатационные характеристики такого устройства могут быть и не лучше характеристик обычного масс-спектрометрического течеискателя, простота конструкции, отсутствие ловушек с жидким азотом, а также

меньшая зависимость от скорости откачки явились причинами их серийного выпуска, например, фирмой *Varian*.

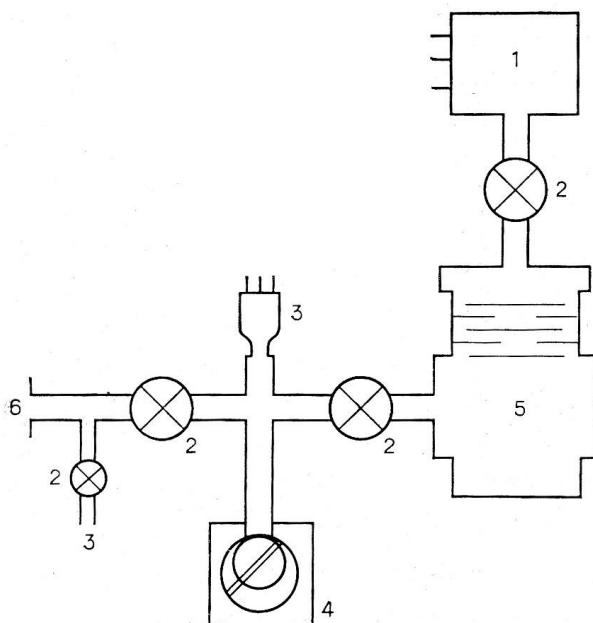


Рис. 1.108. Течеискатель на основе масс-спектрометра и турбомолекулярного насоса: 1 — масс-спектрометрический анализатор; 2 — клапаны; 3 — вакуумметр Пирани; 4 — форвакуумный ротационный масляный насос; 5 — турбомолекулярный насос; 6 — вход для подключения объекта, проверяемого на герметичность

Следует отметить, что в высоковакуумных системах, в зависимости от используемого метода обнаружения течей, присутствие масел даже в небольших количествах недопустимо. Поэтому оператор должен быть уверен в том, что масло из ротационного насоса вакуумной системы течеискателя не проникает в проверяемую систему. Если в течеискателе не предусмотрена охлаждаемая жидким азотом цеолитовая ловушка для форвакуумного насоса, то целесообразно поместить такую ловушку между течеискателем и системой.

В случае крупных вакуумных систем методы обнаружения течей с помощью чехлов с гелием или путем обдува элементов системы тонкой струей гелия нерациональны. Предложен другой метод решения этой проблемы на основе масс-спектрометрического измерения величины отноше-

ния N_2/O_2 . При наличии течи это отношение должно быть таким же, как и для окружающего систему воздуха, тогда как десорбированные газы должны давать существенно отличающееся значение этого отношения. Поскольку крупные вакуумные системы содержат значительное число клапанов и насосов, то путем последовательного секционирования системы можно достаточно быстро определить участок с течью, точное нахождение которой можно затем установить методом обдува.

2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

2.1. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ПАР

2.1.1. Силы межмолекулярного взаимодействия

Свойства не сильно разреженных газов отличаются от свойств идеальных газов, подчиняющихся уравнению Менделеева–Клапейрона:

$$PV = RT, \quad (2.1)$$

где $R = 8,31 \text{ Дж К}^{-1} \text{ моль}^{-1}$ — универсальная газовая постоянная. На самом деле, при общем числе молекул N $R = k \cdot N$ (см. формулу (1.1)).

Опыты показывают, что удельные теплоемкости, коэффициенты вязкости и другие величины у реальных газов имеют значения, отличающиеся от значений соответствующих физических величин для идеальных газов.

Реальным газом называется газ, между молекулами которого действуют силы межмолекулярного взаимодействия. Паром называется реальный газ, который находится в состояниях, близких к конденсации.

Силы межмолекулярных взаимодействий очень быстро убывают при увеличении расстояния между молекулами (короткодействующие силы). На расстояниях между молекулами, превышающих $10 \text{ \AA}$, силами межмолекулярного взаимодействия можно пренебречь. Силы взаимодействия между молекулами подразделяются на силы притяжения и силы отталкивания. Оба типа сил действуют одновременно. В противном случае были бы невозможны определенные объемы жидких и твердых тел: образующие их частицы либо разлетались бы в разные стороны, либо слипались бы до наименьшего возможного объема.

Силы взаимного притяжения и отталкивания различно зависят от расстояния r между молекулами.

На расстояниях, сравнимых с линейными размерами атомов и малых неорганических молекул ($\sim 1 \text{ \AA}$), преобладают силы отталкивания F_{1r} , тогда как на расстояниях r порядка $10 \text{ \AA}$ — силы взаимного притяжения F_{2r} .

$$F_{1r} = \frac{b}{r^{13}}, \quad F_{2r} = -\frac{a}{r^7}, \quad (2.2)$$

где a и b — положительные коэффициенты, зависящие от строения молекул и типа сил межмолекулярного взаимодействия.

На рис. 2.1, а показаны зависимости F_{1r} и F_{2r} от r . Результирующая сила $F_r = F_{1r} + F_{2r}$.

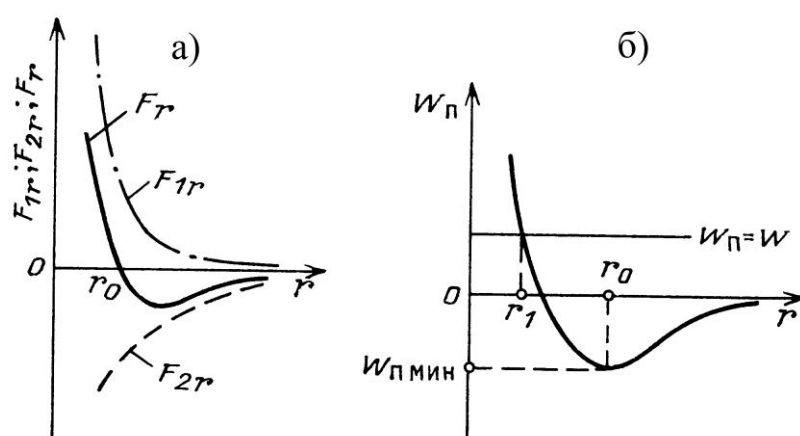


Рис. 2.1. Зависимость сил притяжения и отталкивания (а) и потенциальной энергии взаимодействия (б) от расстояния между молекулами

При $r = r_0$ силы F_{1r} и F_{2r} уравниваются, и $F_r = 0$. При $r > r_0$ $F_{2r} > F_{1r}$, а при $r < r_0$ $F_{2r} < F_{1r}$. Таким образом, r_0 есть равновесное расстояние между молекулами, на котором они находились бы, если бы не было теплового движения.

Элементарная работа δA , которая совершается результирующей силой F_r при увеличении на dr расстояния между молекулами, равна убыли взаимной потенциальной энергии W двух молекул:

$$\delta A = F_r dr = -dW_{\Pi}. \quad (2.3)$$

Интегрируя по r от r до ∞ , получим:

$$\int_{W_{\Pi}}^{W_{\Pi}(\infty)} dW_{\Pi} = -\int_r^{\infty} F_r dr \quad \text{и} \quad W_{\Pi} - W_{\Pi}(\infty) = \int_r^{\infty} F_r dr. \quad (2.4)$$

При $r = \infty$ молекулы не взаимодействуют и $W_{\Pi}(\infty) = 0$, поэтому:

$$W_{II} = \int_r^{\infty} F_r dr. \quad (2.5)$$

Интеграл может быть вычислен графически по известной зависимости F_r от r (рис. 2.1, а). Он пропорционален площади, ограниченной кривой $F_r = F_r(r)$, осью r и вертикальной прямой $r = \text{const}$, соответствующей значению r , для которого вычисляется W_{II} .

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } r > r_0 \rightarrow W_{II} < 0 \\ r = r_0 \rightarrow W_{II}(r_0) = W_{II \min} \end{array} \right\} \leftarrow \left(\frac{dW_{II}}{dr} \right)_{r=r_0} = -F_r(r_0) = 0. \quad (2.6)$$

Система, состоящая из двух взаимодействующих молекул, в состоянии устойчивого равновесия ($r = r_0$) обладает наименьшей потенциальной энергией. При $r < r_0$ энергия W_{II} начинает возрастать, становится положительной и затем резко возрастает в связи с быстрым увеличением сил отталкивания при уменьшении r (рис. 2.1, б).

Величина $W_{II \min}$ наименьшей потенциальной энергии взаимодействия молекул является критерием для различных агрегатных состояний вещества:

- если $kT > |W_{II \min}|$ — вещество находится в газообразном состоянии;
- если $kT \ll |W_{II \min}|$ — твердое состояние вещества;
- если $kT \leq |W_{II \min}|$ — вещество пребывает в жидком состоянии.

Здесь kT — удвоенная средняя энергия, приходящаяся на одну степень свободы теплового движения молекулы.

Слабые силы притяжения, действующие между молекулами на расстояниях порядка 1 нм, называются силами Ван-дер-Ваальса (ван-дер-ваальсовы силы). Эти силы являются причиной поправки на внутреннее давление в уравнении состояния реального газа Ван-дер-Ваальса. Существуют три типа ван-дер-ваальсовых сил притяжения, причем все они имеют электрическую природу.

1. *Ориентационные силы* притяжения полярных молекул. Эти силы обусловлены преимущественной ориентацией дипольного электрического момента ξ_e одной полярной молекулы в электрическом поле другой полярной молекулы. Указанной ориентации молекул препятствует их тепловое движение. Ориентационная сила притяжения двух однородных молекул:

$$F_{op} = 4 \frac{\xi_e^4}{kT} \frac{1}{r^7}, \quad (2.7)$$

где r — расстояние между молекулами, k — постоянная Больцмана, T — температура.

2. *Индукционные силы* притяжения двух полярных молекул (а в случае разнородных молекул — также полярной и неполярной молекул) связаны с изменением молекулярных дипольных моментов под влиянием электрических полей этих молекул, т. е. с деформационной поляризацией взаимодействующих молекул. Для однородных молекул

$$F_{инд} = 12\alpha \xi_e^2 \frac{1}{r^7}, \quad (2.8)$$

где α — поляризуемость молекулы.

3. *Дисперсионные силы* притяжения действуют как между полярными, так и между неполярными молекулами. Эти силы имеют квантовомеханическое происхождение. Классическое истолкование дисперсионных сил состоит в следующем. Благодаря движению электронов их конфигурация в молекулах непрерывно изменяется. Поэтому неполярная молекула имеет нулевой дипольный электрический момент лишь в среднем. В каждый момент времени такая молекула обладает мгновенным электрическим моментом и вызывает соответствующую деформационную поляризацию соседней молекулы, благодаря чему молекулы притягиваются. Дисперсионная сила притяжения равна среднему значению мгновенной силы притяжения двух молекул для всех возможных конфигураций электронов в молекулах. Согласно простейшей модели Друде, в которой молекулы представляют собой трехмерные осцилляторы,

$$F_{дисп} = \frac{9}{2} \alpha^2 h \nu_0 \frac{1}{r^7}, \quad (2.9)$$

где h — постоянная Планка, ν_0 — частота колебаний осциллятора. Достаточно часто значение $h\nu_0$ близко к энергии ионизации молекулы.

Как правило, определяющую роль во взаимном притяжении молекул играют именно дисперсионные силы. Для большинства веществ даже с полярными молекулами дисперсионные силы значительно превосходят по величине как ориентационные, так и индукционные силы притяжения.

Свое название дисперсионные силы получили в связи с аналогией возникновения этих сил и явления дисперсии при прохождении электромагнитных волн в веществе.

Сила притяжения между двумя молекулами F_{2r} , изображенная на рис. 2.1, *а*, является результирующей всех типов сил притяжения, перечисленных выше. Потенциальная энергия ван-дер-ваальсовского притяжения составляет $(0,4-4) \cdot 10^3$ Дж / моль, т. е. $(0,4-4) 10^{-2}$ эВ / частица.

На расстояниях $r < 1 \text{ \AA}$ между молекулами помимо электромагнитного взаимодействия возникает особое квантовое взаимодействие, которое приводит либо к появлению сил отталкивания между молекулами, либо к сильному притяжению соседних атомов (или их групп) и возникновению между ними химических связей — ионных и ковалентных. Результатом этих связей является образование устойчивых молекул. Потенциальная энергия химических связей превышает энергию ван-дер-ваальсового притяжения и имеет значения порядка $(0,4-4) \cdot 10^4$ Дж / моль, т. е. $(0,4-4) 10^{-1}$ эВ / частица.

В системе из двух молекул силы взаимодействия, являясь внутренними, не могут изменить полную энергию W системы, складывающуюся из кинетической энергии W_k молекул и их взаимной потенциальной энергии W_{II} . Поэтому (см. формулу (2.5))

$$dW = dW_k + dW_{II} = 0, \text{ или } dW_k = -dW_{II} = F_r dr. \quad (2.10)$$

При сближении молекул ($dr < 0$) до расстояния r_0 (рис. 2.1, *б*) W_{II} уменьшается, а W_k соответственно увеличивается. Это происходит за счет положительной работы, совершаемой результирующей силой взаимного притяжения между молекулами ($F_r < 0$ при $r > r_0$). При дальнейшем сближении молекул ими совершается работа против результирующей силы взаимного отталкивания ($F_r > 0$ при $r < r_0$). При этом кинетическая энергия молекул уменьшается. К моменту наибольшего сближения молекул ($r = r_1$ на рис. 2.1, *б*) вся кинетическая энергия молекул оказывается полностью израсходованной на совершение работы против сил отталкивания: $W_k = 0$, и полная энергия W равна потенциальной энергии W_{II} , т. е. $W = W_{II}$ (рис. 2.1, *б*).

При сохранении неизменными всех параметров состояния реальных газов, кроме температуры, расстояние r уменьшается при нагревании. Од-

нако это уменьшение очень невелико даже при высоких температурах. Это связано с очень крутым возрастанием сил отталкивания F_1 при уменьшении r (рис. 2.1, *a*). Расстояние r_1 является, таким образом, эффективным диаметром d молекулы. Конечные размеры молекул реальных газов объясняются действием между молекулами сил отталкивания.

2.1.2. Уравнение Ван-дер-Ваальса

Такая модель реального газа, в которой молекулы рассматриваются как абсолютно твердые шарики с диаметром d , между которыми действуют силы взаимного притяжения, называется газом Ван-дер-Ваальса. Конечные размеры шариков означают, что принимаются во внимание и силы отталкивания между молекулами реального газа.

Молекулы реального газа, имеющие каждая объем

$$\tilde{v} \approx \frac{4}{3} \pi r_0^3, \quad (2.11)$$

где r_0 — радиус молекулы, движутся в сосуде не так свободно, как «точечные» молекулы идеального газа. Поэтому в уравнении Менделеева–Клапейрона $pV = RT$ вместо полного объема V сосуда, занимаемого молекулами газа, следует учитывать «свободный» объем:

$$V' = V - b, \quad (2.12)$$

где b — поправка Ван-дер-Ваальса на собственный объем молекул.

Молекулы не могут придвинуться друг к другу ближе, чем на $2r_0$. В модели Ван-дер-Ваальса рассматриваются только парные взаимодействия. Следовательно, объем, который будет занимать каждая из взаимодействующих молекул:

$$V_{\text{вз}} = \left(\frac{4}{3} \pi (2r_0)^3 \right) \cdot \frac{1}{2} = 4\tilde{v}. \quad (2.13)$$

Для всех молекул содержащихся в одном моле газа:

$$V_{\text{вз}} = 4\tilde{v} \cdot N_A, \quad (2.14)$$

где N_A — постоянная Авогадро.

Таким образом, поправка b равна учетверенному объему всех молекул, содержащихся в одном моле газа.

Силы взаимного притяжения между молекулами учитываются для газа Ван-дер-Ваальса введением поправки на давление газа в уравнении Менделеева–Клапейрона. В связи с короткодействующим характером сил

притяжения каждая молекула взаимодействует лишь с теми частицами, которые находятся от нее на расстояниях $r < R_M$, где R_M — радиус молекулярного действия, имеющий величину порядка 10^{-9} м. Сфера радиуса R_M , описанная из центра молекулы, называется сферой молекулярного действия.

Для молекулы, находящейся внутри объема газа, силы притяжения ее к другим молекулам взаимно уравниваются и не оказывают влияния на движение данной молекулы. Если молекула находится в слое газа, пограничном со стенкой сосуда, то она испытывает некомпенсированную силу притяжения, направленную внутрь газа. Вследствие этого при соударении со стенкой такая молекула передает стенке меньший импульс, и давление, которое оказывает на стенки реальный газ, уменьшено по сравнению с давлением $p_{ид}$ идеального газа, имеющего ту же плотность и такую же температуру,

$$p = p_{ид} - \Delta p \quad (2.15)$$

или

$$p_{ид} = p + \Delta p, \quad (2.16)$$

где Δp — поправка Ван-дер-Ваальса, обусловленная действием сил взаимного притяжения и называемая внутренним давлением.

Внутреннее давление Δp обратно пропорционально квадрату объема V сосуда, в котором находится моль газа,

$$\Delta p = \frac{a}{V^2}, \quad (2.17)$$

где a — коэффициент Ван-дер-Ваальса, зависящий от химической природы газа. Чем больше количество молекул N , тем больше тех, кто тянет и тех, кого тянут, следовательно, $\Delta p \sim n \cdot n = n^2 = (N/V)^2 = a/V^2$, где n — концентрация.

Таким образом, уравнение, которое описывает состояние реального газа — уравнение Ван-дер-Ваальса — отличается от уравнения Менделеева–Клапейрона введением поправок b и Δp

$$pV = RT \rightarrow \left| \begin{array}{l} p(V - b) = RT \\ p = \frac{RT}{V} - \Delta p \end{array} \right| \rightarrow p + \Delta p = \frac{RT}{V - b} \Rightarrow \left(p + \frac{a}{V^2} \right) \cdot (V - b) = RT, \quad (2.18)$$

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = RT \text{ — уравнение Ван-дер-Ваальса.} \quad (2.19)$$

Для сильно разреженных газов $V \gg b$, $\Delta p \ll p$, и уравнение Ван-дер-Ваальса не отличается от уравнения Менделеева–Клапейрона.

2.1.3. Изотермы реальных газов. Фазовые переходы

Зависимость молярного объема газа от давления при неизменной температуре называется изотермой реального газа. На рис. 2.2 изображены изотермы для углекислого газа.

При температурах T , меньших $T = 340 \text{ К}$, все изотермы имеют горизонтальные участки, на которых, кроме T , постоянно давление газа, а молярные объемы изменяются. Разность $V_C - V_B$ молярных объемов горизонтальных участков изотерм уменьшается с повышением температуры. При $T = T_K$ эта разность обращается в нуль. Температура $T = T_K$ соответствующая условию $V_C - V_B = 0$, называется критической температурой.

Изотерма реального газа при $T = T_K$ называется критической изотермой. На этой изотерме точки C и B сливаются в точку K , которая называется *критической точкой*. Параметры состояния газа в критической точке (V_K, p_K, T_K) называются критическими параметрами.

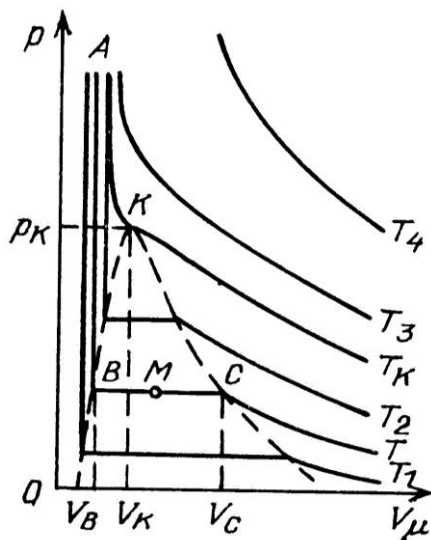


Рис. 2.2. Изотермы для углекислого газа

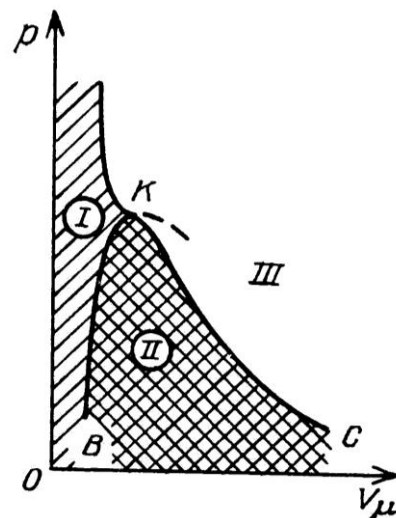


Рис. 2.3. Фазовая диаграмма состояния газа

Критическая точка K является точкой перегиба на критической изотерме, соответственно, касательная к изотерме в этой точке параллельна оси OV .

Любая докритическая изотерма ($T < T_K$) является кривой непрерывного перехода вещества из газообразного состояния в жидкое. Она содержит три участка: TC , CB и BA , каждый из которых описывает различные состояния вещества:

- на участке TC вещество находится в газообразном состоянии;
- участок CB соответствует переходу вещества из газообразного состояния в жидкое;
- в области BA изотермы вещество жидкое.

Участок BA кривой почти вертикален вследствие малой сжимаемости жидкости. Точки C и B горизонтальной части изотермы соответствуют началу и концу конденсации при изотермическом сжатии реального газа. Наоборот, при изотермическом расширении жидкости точки B и C соответствуют началу и концу кипения. Точка B соответствует состоянию кипящей жидкости, точка C — сухого насыщенного пара.

Смесь кипящей жидкости и сухого насыщенного пара, которая существует в любой точке M участка BC , называется *влажным паром*.

Фазой в термодинамике называют совокупность всех частей системы, обладающих одинаковым химическим составом и находящихся в одинаковом состоянии. Влажный пар является двухфазной системой и состоит из двух фаз — кипящей жидкости и сухого насыщенного пара.

На рис. 2.3 приведены две пограничные кривые BK и CK , представляющие собой совокупность точек B и C (рис. 2.2) при различных температурах. Кривые BK и CK сходятся в критической точке K .

Кривая BK кипения отделяет однофазную область I жидкости от двухфазной области II влажного пара. Кривая BK является кривой начала фазового перехода I рода из жидкого состояния вещества в газообразное. Пограничная кривая CK разделяет двухфазную область II и однофазную область III газообразного состояния вещества.

Двухфазная область II не может существовать при давлениях, больших критического p_K , когда вещество может находиться в одном из двух состояний — жидком или газообразном. Газ при температуре выше критической T_K никаким давлением не может быть переведен в жидкое состояние изотермическим сжатием. Критические температуры ряда газов очень низкие: у гелия $T_K \approx 5$ К, у водорода ≈ 33 К. Это затрудняет сжижение таких газов.

В критическом состоянии вещества, помимо разности молярных объемов кипящей жидкости и сухого насыщенного пара, обращаются в нуль удельная теплота парообразования и коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Таким образом, в критическом состоянии вещества полностью исчезают различия между жидким и газообразным состояниями вещества.

Уравнение Ван-дер-Ваальса (2.19) можно переписать в следующем виде:

$$pV^3 - (RT + pb) \cdot V^2 + aV - ab = 0. \quad (2.20)$$

Это уравнение является уравнением третьей степени относительно молярного объема V с коэффициентами, зависящими от давления, температуры и химической природы газа. Это уравнение имеет или один, или три действительных корня в зависимости от численных значений p и T .

На рис. 2.4 представлены изотермы реального газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса при различных температурах.

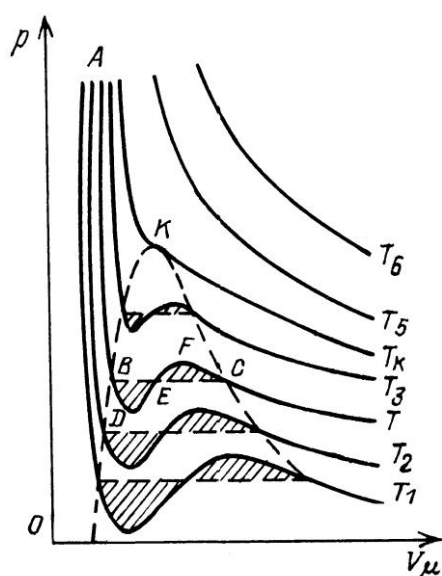


Рис. 2.4. Изотермы реального газа:
($T_1 < T_2 < T < T_3 < T_K < T_5 < T_6$)

На всех докритических изотермах имеется заштрихованная область, где каждому давлению соответствуют три различных состояния, которым сопоставляются три точки изотермы — B , E и C . Волнообразные части $BDEFC$ изотерм на рис. 2.4 более точно описывают переход вещества из газообразного в жидкое состояние, чем горизонтальные участки экспериментальных изотерм (штриховые прямые BC). Участок BD изотермы соответствует перегретой жидкости, которую можно получить, если за-

держать начало кипения в точке B . Участок CF изотермы описывает состояние пересыщенного пара, возникающее при медленном изотермическом сжатии в отсутствие центров конденсации. Если такие центры (пылинки, ионы) вводятся в пересыщенный пар, то происходит быстрая конденсация пара.

На участке DEF изотермы одновременно с увеличением (уменьшением) давления возрастает (уменьшается) молярный объем. Такие состояния вещества невозможны. Горизонтальные отрезки BC рассекают участки изотерм $BDEFC$ так, чтобы площади $BDEB$ и $EFCE$ на рис. 2.4 были равны друг другу (правило Максвелла).

Значения критических параметров p_K , V_K и T_K выражаются через коэффициенты a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса и универсальную газовую постоянную R :

$$\begin{aligned} p_K &= \frac{1}{27} \cdot \frac{a}{b^2}, \\ V_K &= 3b, \\ T_K &= \frac{8}{27} \cdot \frac{a}{bR}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Мы будем рассматривать распространенные способы получения низких температур, широко используемые в промышленных и лабораторных условиях.

2.2.1. Эффект Джоуля–Томсона

Эффектом Джоуля–Томсона называется изменение температуры газа в результате медленного протекания его под действием постоянного перепада давления сквозь дроссель — местное препятствие потоку газа (капилляр, вентиль или пористую перегородку, расположенную в трубе на пути потока). Течение газа сквозь дроссель (дросселирование) должно происходить без теплообмена газа с окружающей средой (адиабатически).

Эффект Джоуля–Томсона был обнаружен и исследован английскими учеными Дж. П. Джоулем и У. Томсоном (Кельвином) в 1852–62 гг. В опытах Джоуля и Томсона измерялась температура в двух последовательных сечениях непрерывного и стационарного потока газа (до дросселя и за ним, см. рис. 2.5).

Вследствие значительного трения газа в дросселе (мелкопористой пробке из ваты) скорость газового потока была очень малой, и кинетическая энергия потока при дросселировании практически не изменялась. Бла-

годаря низкой теплопроводности стенок трубы и дросселя теплообмен между газом и внешней средой отсутствовал.

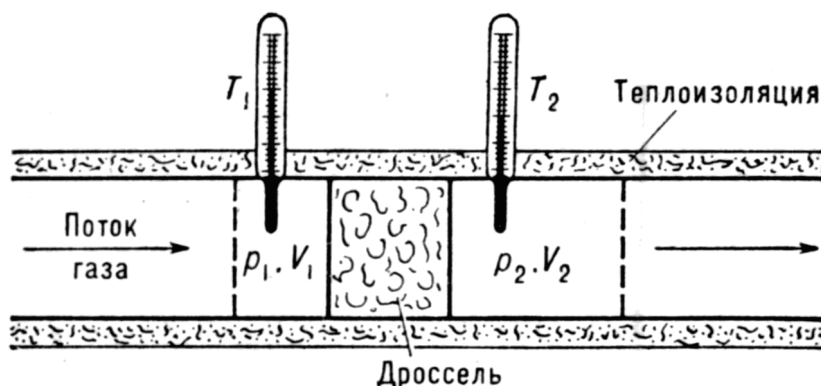


Рис. 2.5. Схема опыта Джоуля–Томсона: в теплоизолированной трубке создается стационарный поток газа; после прохождения газа через дроссель его давление p , удельный объем V и температура T изменяются

При перепаде давления на дросселе $\Delta p = p_1 - p_2$, равном атмосферному давлению, измеренная разность температур $\Delta T = T_2 - T_1$ для воздуха составила $-0,25^\circ\text{C}$ (опыт проводился при комнатной температуре). Для CO_2 и H_2 в тех же условиях ΔT оказалась соответственно равной $-1,25$ и $+0,02^\circ\text{C}$. Эффект Джоуля–Томсона принято называть *положительным*, если газ в процессе дросселирования охлаждается ($\Delta T < 0$), и *отрицательным*, если газ нагревается ($\Delta T > 0$).

Согласно молекулярно-кинетической теории строения вещества, эффект Джоуля–Томсона свидетельствует о наличии в газе сил междомолекулярного взаимодействия (обнаружение этих сил и было целью опытов Джоуля и Томсона). Действительно, при взаимном притяжении молекул внутренняя энергия (W) газа включает как кинетическую энергию молекул, так и потенциальную энергию их взаимодействия. Расширение газа в условиях энергетической изоляции не меняет его внутренней энергии W , но приводит к росту потенциальной энергии взаимодействия молекул W_n (см. рис. 2.1), поскольку $r > r_0$. В результате кинетическая энергия молекул W_k уменьшается (происходит замедление теплового движения молекул), и температура расширяющегося газа понижается.

Реальные процессы сложнее, так как газ не изолирован энергетически от внешней среды. Он совершает внешнюю работу (последующие пор-

ции газа теснят предыдущие), а над самим газом совершают работу силы внешнего давления (поддерживающие стационарность потока). Это учитывается при составлении энергетического баланса в опытах Джоуля–Томсона.

Работа продавливания через дроссель порции газа, занимающего до дросселя объём V_1 , равна p_1V_1 . Эта же порция газа, занимающая за дросселем объём V_2 , совершает работу p_2V_2 . Прделанная над газом результирующая внешняя работа

$$A = p_1V_2 - p_2V_2 \quad (2.22)$$

в адиабатических условиях может пойти только на изменение его внутренней энергии:

$$W_2 - W_1 = p_1V_1 - p_2V_2. \quad (2.23)$$

Из этого соотношения следует:

$$W_1 + p_1V_1 = W_2 + p_2V_2 = H, \quad (2.24)$$

где H — энтальпия газа (при адиабатическом дросселировании энтальпия газа сохраняется).

Отсюда, зная уравнение состояния газа и выражение для W , можно найти ΔT .

Величина и знак эффекта Джоуля–Томсона определяются соотношением между работой газа и работой сил внешнего давления, а также свойствами самого газа, в частности размером его молекул и их взаимодействием. Для идеального газа, молекулы которого рассматриваются как материальные точки, не взаимодействующие между собой, эффект Джоуля–Томсона нулевой (отсутствует).

Для реального газа полная энергия системы есть сумма кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_{кин} + E_{пот}, \text{ где } E_{кин} = c_0 dT. \quad (2.25)$$

Соответственно, изменение полной энергии, в общем случае:

$$dE = dE_{кин} + dE_{пот}. \quad (2.26)$$

Рассмотрим адиабатический процесс (газ термоизолирован, $dQ = 0$). Если внешней работы газ не совершает ($dA = 0$), то согласно II началу термодинамики:

$$dE = dQ + dA = 0 \Rightarrow E = const. \quad (2.27)$$

Отсюда

$$dE_{кин} + dE_{ном} = 0 \Rightarrow dE_{кин} = -dE_{ном} \Rightarrow c_0 dT = -dE_{ном}. \quad (2.28)$$

Так как при прохождении через дроссель газ расширяется ($p_1 > p_2$), то в случае реального газа, возможны два граничных варианта:

1. Между молекулами газа *существуют только силы отталкивания*, т. е. в уравнении Ван-дер-Ваальса $a = 0$.

$$p \downarrow \Rightarrow r \uparrow \Rightarrow E_{ном} \downarrow \Rightarrow dE_{ном} < 0 \Rightarrow c_0 dT > 0 \Rightarrow T \uparrow. \quad (2.29)$$

Таким образом, наблюдаемый эффект Джоуля–Томсона — отрицательный, газ греется.

2. Между молекулами газа *существуют только силы притяжения*, т. е. в уравнении Ван-дер-Ваальса $b = 0$.

$$p \downarrow \Rightarrow r \uparrow \Rightarrow E_{ном} \uparrow \Rightarrow c_0 dT < 0 \Rightarrow T \downarrow. \quad (2.30)$$

В этом случае наблюдаемый эффект Джоуля–Томсона — положительный, газ охлаждается.

В зависимости от условий дросселирования (точнее, начального состояния, в котором находится газ на входе дросселя) один и тот же газ может как нагреваться, так и охлаждаться. Входная температура газа, при которой вследствие изменения физических свойств газа изменяется знак эффекта Джоуля–Томпсона, называется *температурой инверсии эффекта Джоуля–Томпсона* или просто температурой инверсии.

Для ряда точек выходных условий можно построить зависимость от входных условий и получить линии постоянной энтальпии. Для реального

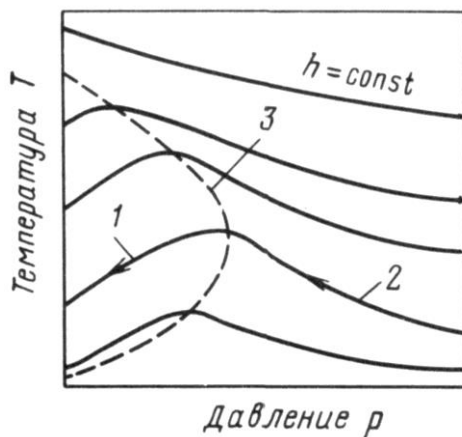


Рис. 2.6. Изэнтальпное расширение реального газа:

- 1 — понижение,
- 2 — повышение температуры;
- 3 — кривая инверсии

газа такая зависимость показана на рис. 2.6. Из графика видно, что существует область, в которой дросселирование (уменьшение давления) приводит к увеличению температуры, тогда как в другой дросселирование приводит к уменьшению температуры.

Очевидно, что в системах ожижения дроссель должен работать в области, где этот процесс приводит к общему уменьшению температуры. Кривая, разделяющая эти две области, называется *кривой инверсии*.

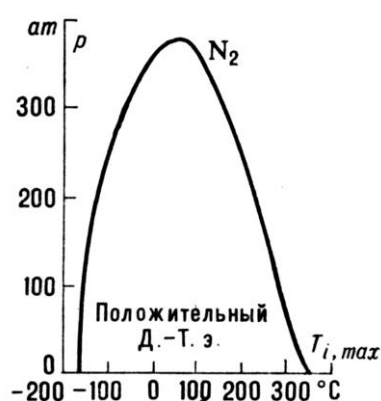


Рис. 2.7. Кривая инверсии азота: в пределах кривой эффект Джоуля–Томсона положителен ($\Delta T < 0$), вне кривой — отрицателен ($\Delta T > 0$), для точек на самой кривой эффект равен нулю

Температура T_i , при которой (для данного давления) разность ΔT , проходя через нулевое значение, меняет свой знак, как уже говорилось выше, является температурой инверсии эффекта Джоуля–Томсона. Типичная зависимость температуры инверсии от давления (кривая инверсии) показана на рис. 2.7. Значение верхних температур инверсии ($T_{i, \max}$) при $p \rightarrow 0$ для ряда газов приведены в табл. 2.1.

Явление изменения температуры для изоэнтальпного изменения давления характеризуется коэффициентом Джоуля–Томсона $\mu_{\text{дт}}$, определяемым как

$$\mu_{\text{дт}} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h, \quad (2.31)$$

где производную следует рассматривать как скорость изменения температуры при изменении давления и постоянной энтальпии. Отметим, что коэффициент Джоуля–Томсона есть угол наклона линий постоянной энтальпии на рис. 2.6. Коэффициент Джоуля–Томсона на кривой инверсии равен нулю, так как эта кривая соединяет точки с нулевым наклоном изоэнтальп. Коэффициент Джоуля–Томсона отрицателен для дросселирования с увеличением температуры; в процессе с уменьшением температуры коэффициент положителен.

Таблица 2.1

Температуры инверсии для различных газов

Газ	CO ₂	Ar	N ₂	H ₂	He	воздух
$T_{i, \max}$, К	1500	723	621	202	50	603

Если вычислить коэффициент Джоуля–Томсона, пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса для больших удельных объемов, получим:

$$\mu_{\text{дт}} = \frac{1}{c_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right), \quad (2.32)$$

где $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$ — теплоемкость газа при постоянном давлении, a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса.

В случае малых перепадов давления эффект Джоуля–Томсона характеризуется малыми перепадами температуры (так называемый дифференциальный эффект Джоуля–Томсона):

$$\Delta T = -\frac{1}{c_p} \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \Delta p. \quad (2.33)$$

При больших перепадах давления на дросселе температура газа может изменяться значительно. Например, при дросселировании от 200 до 1 атм. и начальной температуре 17° С воздух охлаждается на 35° С.

2.2.2. Обратимое адиабатическое расширение

При расширении в дросселе энергия газа не отводится, а молекулы удаляются друг от друга под влиянием межмолекулярных сил. Этот метод называют *методом внутренних сил*. Более эффективным способом охлаждения газа является его расширение в устройстве, производящем работу, например, в детандере. Этот метод получения низких температур называют иногда *методом внешней работы*.

В процессе расширения в детандере энергия отводится от газа путем совершения внешней работы:

$$dE = dQ + pdV. \quad (2.34)$$

Таким образом, можно сказать, что в детандере реализован цикл Карно — обратимый круговой процесс, в котором совершается превращение теплоты в работу (или работы в теплоту).

Цикл Карно состоит из последовательно чередующихся двух изотермических и двух адиабатических процессов, осуществляемых с рабочим телом (например, паром) и впервые был рассмотрен французским физиком Н. Л. С. Карно (1824 г.) как идеальный рабочий цикл теплового двигателя, совершающего работу за счёт теплоты, подводимой к рабочему телу в изотермическом процессе. Рабочее тело последовательно находится в тепловом контакте с двумя тепловыми резервуарами (имеющими постоянные температуры) — нагревателем (с температурой T_1) и холодильником (с температурой $T_2 < T_1$).

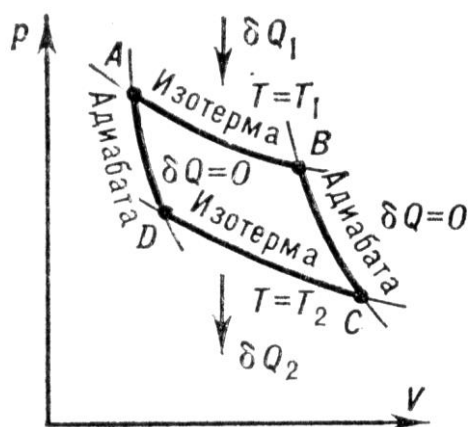


Рис. 2.8. Цикл Карно на диаграмме $p - V$ (давление — объём): δQ_1 — количество теплоты, получаемой рабочим телом от нагревателя, δQ_2 — количество теплоты, отдаваемой им холодильнику; площадь, ограниченная изотермами и адиабатами, численно равна работе цикла Карно

Превращение теплоты в работу сопровождается переносом рабочим телом определенного количества теплоты от нагревателя к холодильнику. Цикл Карно осуществляется следующим образом (см. рис. 2.8):

- рабочее тело (например, пар в цилиндре под поршнем) при температуре T_1 приводится в соприкосновение с нагревателем и изотермически получает от него количество теплоты δQ_1 (при этом пар расширяется и совершает работу). На рис. 2.8 этот процесс изображён отрезком изотермы AB ;

- затем рабочее тело, расширяясь адиабатически (по адиабате BC), охлаждается до температуры T_2 и приводится в тепловой контакт с холодильником;

- при этой температуре, сжимаясь изотермически (отрезок CD), рабочее тело отдаёт количество теплоты δQ_2 холодильнику;

- завершается цикл Карно адиабатным процессом (отрезок DA), возвращающим рабочее тело в исходное термодинамическое состояние.

При постоянной разности температур ($T_1 - T_2$) между нагревателем и холодильником рабочее тело совершает за один цикл Карно работу:

$$\delta A = \delta Q_1 - \delta Q_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot \delta Q_1. \quad (2.35)$$

Эта работа численно равна площади $ABCD$, ограниченной отрезками изотерм и адиабат, образующих цикл Карно.

Цикл Карно обратим и его можно осуществить в обратной последовательности (в направлении $ADCBA$). При этом количество теплоты δQ_2 отбирается у холодильника и передаётся нагревателю за счёт затраченной работы δA . Тепловой двигатель работает в этом режиме как идеальная холодильная машина.

Детандер (от франц. *detendre* — ослаблять) — машина для охлаждения газа путём его расширения с отдачей внешней работы. Детандер отно-

сится к классу расширительных машин, но применяется главным образом не с целью совершения внешней работы, а для получения холода. Детандер используется в установках для сжижения газов и разделения газовых смесей методом глубокого охлаждения, в криогенных рефрижераторах, в установках, имитирующих высотные и космические условия, в некоторых системах кондиционирования воздуха и т. д.

Наиболее распространены поршневые детандеры (рис. 2.9) и турбодетандеры (рис. 2.10).

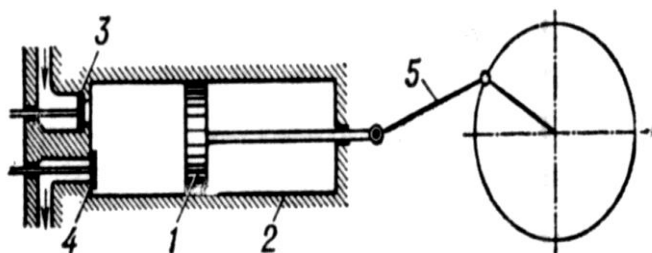


Рис. 2.9. Схема поршневого детандера:
1 — поршень; 2 — цилиндр; 3 — впускной клапан; 4 — выпускной клапан;
5 — кривошипно-шатунный механизм

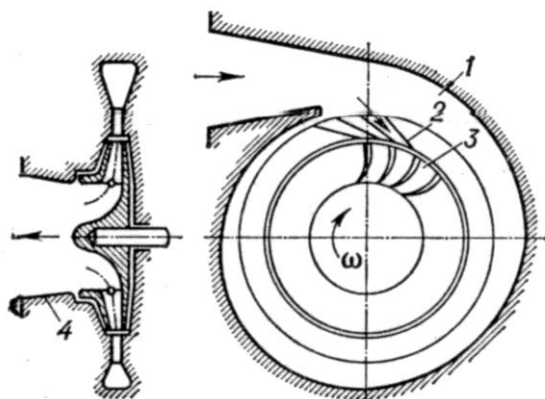


Рис. 2.10. Схема центробежного реактивного турбодетандера:
1 — спиральный подвод газа;
2 — направляющий сопловой аппарат; 3 — ротор; 4 — отводной диффузор

Поршневые детандеры — машины объёмного периодического действия, в которых потенциальная энергия сжатого газа преобразуется во

внешнюю работу при расширении отдельных порций газа, перемещающих поршень. Они выполняются вертикальными и горизонтальными, одно- и многорядными. Торможение поршневых детандеров осуществляется электрогенератором и реже компрессором. Применяются в основном в установках с холодильными циклами высокого $150\text{--}200\text{ кгс/см}^2$ и среднего $20\text{--}80\text{ кгс/см}^2$ давлений для объёмных расходов газа при температуре и давлении на входе в машину (физических расходов) $0,2\text{--}20\text{ м}^3/\text{ч}$.

Турбодетандеры — лопаточные машины непрерывного действия, в которых поток проходит через неподвижные направляющие каналы (сопла), преобразующие часть потенциальной энергии газа в кинетическую, и систему вращающихся лопаточных каналов ротора, где энергия потока преобразуется в механическую работу, в результате чего происходит охлаждение газа.

Они делятся по направлению движения потока на центростремительные, центробежные и осевые; по степени расширения газа в соплах — на активные и реактивные; по числу ступеней расширения — на одно- и многоступенчатые. Наиболее распространён реактивный одноступенчатый центростремительный детандер, разработанный П. Л. Капицей. Торможение турбинных детандеров осуществляется электрогенератором, гидротормозом, нагнетателем, насосом. Турбодетандеры применяются главным образом в установках с холодильным циклом низкого давления $4\text{--}8\text{ кгс/см}^2$ для объёмных (физических) расходов газа $40\text{--}4000\text{ м}^3/\text{ч}$. Созданы турбодетандеры для холодильных циклов низкого, среднего и высокого давлений с объёмными расходами газа $1,5\text{--}40\text{ м}^3/\text{ч}$. Эти машины характеризуются малыми размерами (диаметр рабочего колеса $10\text{--}40\text{ мм}$) и высокой частотой вращения ротора ($100000\text{--}500000\text{ об/мин}$).

2.2.3. Магнитное охлаждение

Магнитное охлаждение — это метод получения температур ниже 1 К путём адиабатического размагничивания парамагнитных веществ. Метод предложен П. Дебаем и американским физиком У. Джиоком (1926 г.), и впервые осуществлён в 1933 г. Магнитное охлаждение — один из двух практически применяемых методов получения температур ниже $0,3\text{ К}$ (другим методом является растворение жидкого гелия ^3He в жидком ^4He).

Для магнитного охлаждения применяют соли редкоземельных элементов (например, *сульфат гадолиния*), хромокалиевые, железоаммониевые, хромометиламмониевые квасцы и ряд других парамагнитных веществ.

Кристаллическая решётка этих веществ содержит ионы Fe, Cr, Gd с недостроенными электронными оболочками и отличным от нуля собственным магнитным моментом (спином). Парамагнитные ионы разделены в кристаллической решётке большим числом немагнитных атомов. Это приводит к тому, что магнитное взаимодействие ионов оказывается слабым: даже при низких температурах, когда тепловое движение значительно ослаблено, силы взаимодействия не способны упорядочить систему хаотически ориентированных спинов.

В методе магнитного охлаждения применяется достаточно сильное ($\sim$ нескольких кЭ) внешнее магнитное поле, которое, упорядочивая направление спинов, намагничивает парамагнетик.

При выключении внешнего поля (размагничивании парамагнетика) спины под действием теплового движения атомов (ионов) кристаллической решётки вновь приобретают хаотическую ориентацию.

Если размагничивание осуществляется адиабатически (в условиях теплоизоляции), то температура парамагнетика понижается.

Процесс магнитного охлаждения принято изображать на термодинамической диаграмме в координатах температура T — энтропия S (рис. 2.11). Получение низких температур связано с достижением состояний, в которых вещество обладает малыми значениями энтропии.

В энтропию кристаллической решетки парамагнетика, характеризующую неупорядоченность его структуры, свою долю вносят тепловые колебания атомов кристаллической решётки («тепловой беспорядок») и разориентированность спинов («магнитный беспорядок»). При $T \rightarrow 0$ энтропия решётки $S_{\text{реш}}$ убывает быстрее энтропии системы спинов $S_{\text{магн}}$, так что $S_{\text{реш}}$ при температурах $T < 1$ К становится исчезающе малой по сравнению с $S_{\text{магн}}$. В этих условиях возникает возможность осуществить магнитное охлаждение.

Цикл магнитного охлаждения (рис. 2.11) состоит из двух стадий:

- изотермического намагничивания (линия AB);
- адиабатического размагничивания парамагнетика (линия BB).

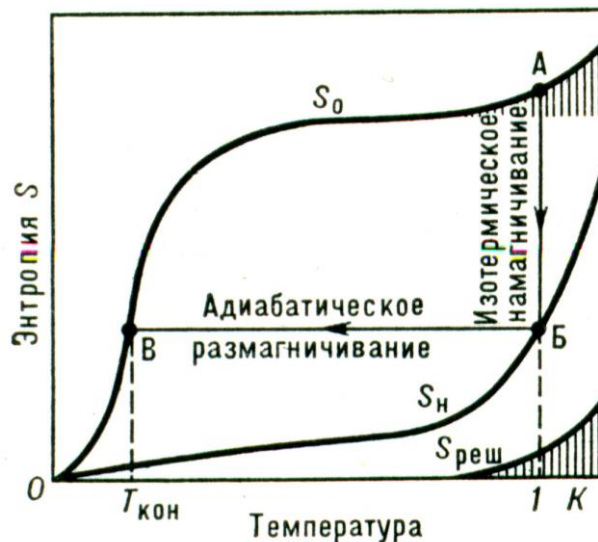


Рис. 2.11. Энтропийная диаграмма процесса магнитного охлаждения (S — энтропия, T — температура): кривая S_0 — изменение энтропии рабочего вещества с температурой без магнитного поля; S_n — изменение энтропии вещества в поле напряжённостью H ; $S_{реш}$ — энтропия кристаллической решётки ($S_{реш} \sim T^3$); $T_{кон}$ — конечная температура в цикле магнитного охлаждения

Перед намагничиванием температуру парамагнетика при помощи жидкого гелия понижают до $T \sim 1$ K и поддерживают её постоянной на протяжении всей 1-й стадии магнитного охлаждения. Намагничивание сопровождается выделением теплоты и уменьшением энтропии до значения S_n .

На 2-й стадии магнитного охлаждения тепловое движение, разрушая упорядоченность спинов, приводит к увеличению $S_{магн}$. Однако в процессе адиабатического размагничивания энтропия парамагнетика в целом не меняется. Увеличение $S_{магн}$ компенсируется уменьшением $S_{реш}$, т. е. охлаждением парамагнетика.

Взаимодействие спинов между собой и с кристаллической решёткой (спин-решёточное взаимодействие) определяет температуру, при которой начинается резкий спад кривой $S_{магн}$ при $T \rightarrow 0$, и становится возможным магнитное охлаждение. Чем слабее взаимодействие спинов, тем более низкие температуры можно получить методом магнитного охлаждения. Пара-

магнитные соли, применяемые для магнитного охлаждения, позволяют достичь температур $\sim 10^{-3}$ К.

Значительно более низких температур удалось достигнуть, используя парамагнетизм уже не атомов (ионов), а атомных ядер. Магнитные моменты ядер примерно в тысячу раз меньше спиновых магнитных моментов электронов, определяющих моменты парамагнитных ионов. Поэтому взаимодействие ядерных магнитных моментов значительно слабее взаимодействия моментов ионов. Для намагничивания до насыщения системы ядерных магнитных моментов даже при $T = 1$ К требуются сильные магнитные поля ($\sim 10^7$ Э). Практически применяют поля 10^5 Э, но тогда необходимы более низкие температуры ($\sim 0,01$ К). При исходной температуре $\sim 0,01$ К адиабатическим размагничиванием системы ядерных спинов (например, в образце меди) удаётся достигнуть температуры 10^{-5} – 10^{-6} К. До этой температуры охлаждается не весь образец. Полученная температура (её называют спиновой) характеризует интенсивность теплового движения в системе ядерных спинов сразу после размагничивания. Электроны же и кристаллическая решётка остаются после размагничивания при исходной температуре $\sim 0,01$ К. Последующий обмен энергией между системами ядерных и электронных спинов (посредством спин-спинового взаимодействия) может привести к кратковременному охлаждению всего вещества до $T \sim 10^{-4}$ К. Измеряют низкие температуры ($\sim 10^{-2}$ К и ниже) методами магнитной термометрии.

Практически магнитное охлаждение, осуществляют следующим способом (рис. 2.12, а).

Блок парамагнитной соли C помещается на подвесках из материала с малым коэффициентом теплопроводности внутри камеры 1, которая погружена в криостат 2 с жидким гелием ^4He .

Откачкой паров гелия температура в криостате поддерживается на уровне 1,0–1,2 К (применение жидкого ^3He позволяет снизить исходную температуру до $\sim 0,3$ К). Теплота, выделяющаяся в соли во время намагничивания, отводится к жидкому гелию газом, заполняющим камеру 1. Перед выключением магнитного поля газ из камеры 1 откачивают через кран 4 и таким образом блок соли C теплоизолируют от жидкого гелия. После размагничивания температура соли понижается и может достигнуть нескольких тысячных долей градуса. Запрессовывая в блок соли какое-либо веще-

ство или соединяя вещество с блоком соли пучком тонких медных волочек, можно охладить вещество практически до тех же температур.

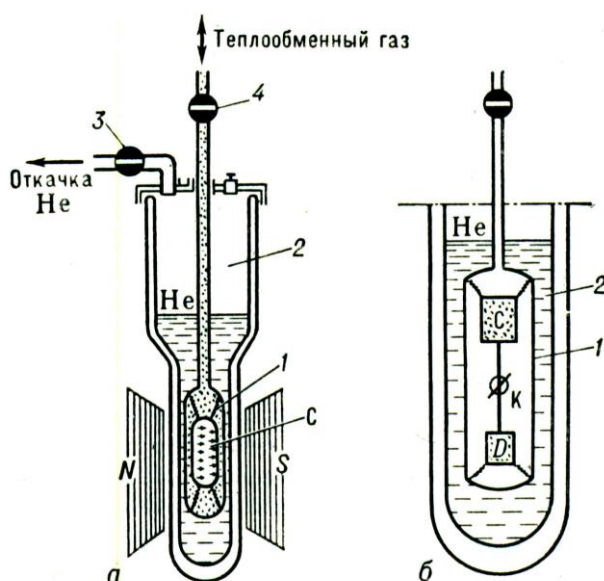


Рис. 2.12. Схемы установок для магнитного охлаждения: (а) — одноступенчатого (N , S — полюсы электромагнита), (б) — двухступенчатого

Наиболее низкие температуры получают методом двухступенчатого магнитного охлаждения (рис. 2.12, б). Сначала производят адиабатическое размагничивание соли C , и через тепловой ключ (теплопроводящую перемычку) K охлаждают предварительно намагниченную соль D . Затем, после размыкания ключа K , размагничивают соль D , которая при этом охлаждается до температуры существенно более низкой, чем была получена в блоке соли C . Тепловым ключом в установках описанного типа обычно служит проволочка из сверхпроводящего вещества, теплопроводность которой в нормальном и сверхпроводящем состояниях при $T \sim 0,1$ К различается во много раз. По схеме рис. 2.12, б осуществляют и ядерное размагничивание с тем отличием, что соль D заменяют образцом (например, меди), для намагничивания которого применяется поле напряжённостью в несколько десятков кЭ.

Магнитное охлаждение широко применяется при изучении низкотемпературных свойств жидкого гелия (сверхтекучести и др.), квантовых яв-

лений в твёрдых телах (например, сверхпроводимости), явлений ядерной физики и т. д.

2.3. СИСТЕМЫ ОЖИЖЕНИЯ ГАЗОВ

2.3.1. Системы охлаждения с использованием процесса дросселирования

2.3.1.1. Простая система Линде–Хэмпсона

Эта система является простейшей среди всех систем охлаждения. Схема системы *Линде–Хэмпсона* показана на рис. 2.13, а цикл показан в T – S диаграмме на рис. 2.14.

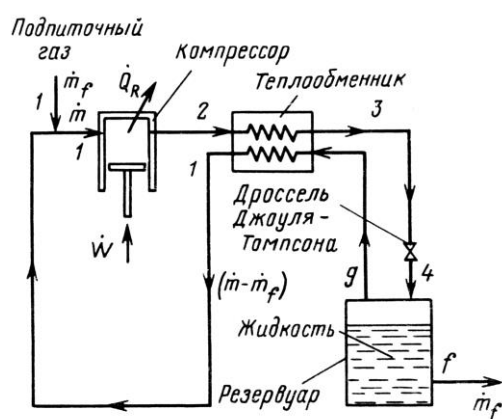


Рис. 2.13. Ожижительная система Линде–Хэмпсона: W — затрачиваемая работа по сжатию газа, Q_R — суммарный поток тепла от системы

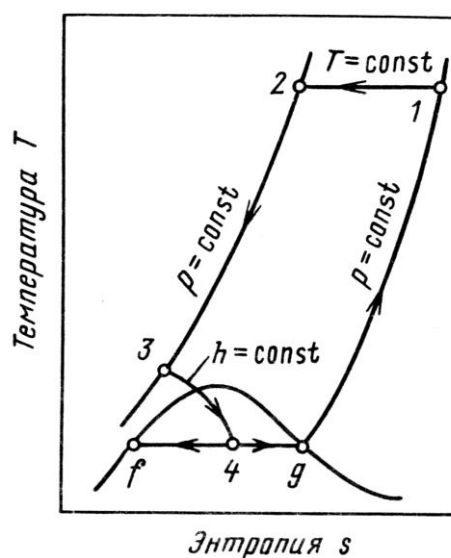


Рис. 2.14. Цикл Линде–Хэмпсона

Для анализа эффективности системы примем идеальные условия: необратимые потери в гидравлических сопротивлениях отсутствуют (за исключением дросселя), отсутствуют также теплопритоки из окружающей среды, теплообменник имеет стопроцентную эффективность.

Цикл Линде–Хэмпсона осуществляется следующим образом:

- первоначально газ сжимается обратимо и изотермически от условий окружающей среды в точке 1 до точки 2. В реальной системе процесс 1–2 в действительности состоит из двух процессов: необратимого адиабатного или политропного сжатия и последующего снижения температуры газа до значения, отличающегося от температуры окружающей среды всего на несколько градусов;

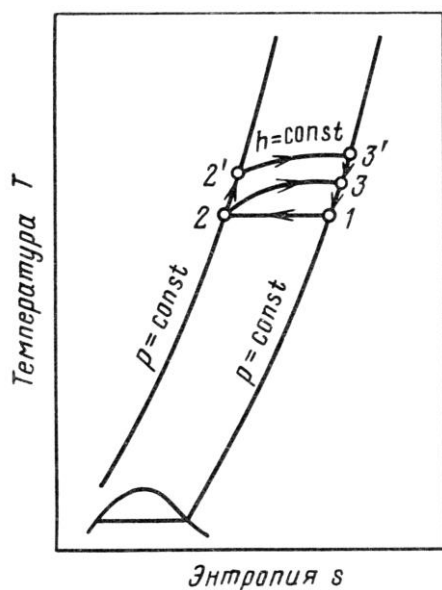


Рис. 2.15. Пуск системы Линде–Хэмпсона (без предварительного охлаждения) с использованием в качестве рабочего тела гелия или водорода: рабочее тело расширяется, проходя через дроссель, от состояния 2 к состоянию 3 с повышением температуры, так как это состояние находится справа от инверсионной кривой

сти y — доля ожиженного газа m_f из общего потока m , $y = \dot{m}_f / \dot{m}$) системы Линде–Хэмпсона состояние 2 должно находиться на кривой инверсии. Для воздуха при 300 К соответствующее давление примерно 40 МПа, однако в реальных системах обычно применяется давление примерно 20 МПа.

Простая система Линде–Хэмпсона, показанная на рис. 2.13, не будет работать для таких газов, как *неон*, *водород* и *гелий* так как, эта система не сможет быть запущена, в связи с тем, что максимальная температура инверсии для этих газов ниже комнатной температуры.

Обращаясь, например, к T – S диаграмме для гелия (рис. 2.15), видим, что при первом запуске системы теплообмен будет отсутствовать, и точки 2 и 3 будут совпадать. Расширение в дросселе при комнатной температуре от точки 3 до точки 4 будет приводить к увеличению температуры, газ, входящий в теплообменник, будет всегда теплее, чем охлаждаемый. Таким

- затем газ проходит через теплообменник при постоянном давлении (в идеальном случае), в котором происходит обмен энергией с отходящим потоком низкого давления (точка 3);

- от точки 3 до точки 4 происходит расширение газа в дросселе до $p_4 = p_1$. (процессы 2–3 и 4–1 — изобарические). В точке 4 часть газового потока находится в жидком состоянии и выводится из системы в состоянии f (состояние насыщенной жидкости), остальная часть потока выводится из сборника жидкости в состоянии g (состояние насыщенного пара);

- этот холодный газ, в конечном счете, нагревается до начальной температуры, отводя энергию при постоянном давлении (в идеальном случае) от входящего потока высокого давления.

Для получения оптимальной *эффективности* (максимальный выход жидкости

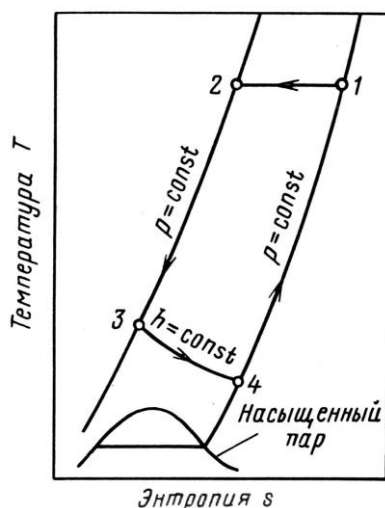


Рис. 2.16. Термодинамический цикл системы Линде-Хэмпсона

образом, низкую температуру получить невозможно. Но если бы даже удалось достичь низких температур в системе Линде-Хэмпсона, то расширение в дросселе при низких температурах происходило бы в области пара, и ожижения газа происходить не будет.

Начало процесса при температуре окружающей среды не является достаточным для снижения температуры газа до той точки, в которой в результате расширения могла бы быть получена жидкость (рис. 2.16).

Эффективность системы Линде-Хэмпсона η для различных веществ ($p_1 = 101,3$ кПа; $p_2 = 20,265$ МПа; $T_1 = T_2 = 300$ К; эффективность теплообменника 100 %; полный КПД компрессора 100 %) приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Эффективность ожижения различных газов

Вещество	N ₂	воздух	CO	Ar	O ₂	CH ₄	NH ₃
Выход жидкости	0,0708	0,0808	0,0871	0,1183	0,1065	0,1977	0,8079

2.3.1.2. Система Линде-Хэмпсона с предварительным охлаждением

Очевидно, что эффективность этой системы *Линде-Хэмпсона* может быть повышена, если ее модернизировать таким образом, чтобы газ на входе в теплообменник имел температуру ниже температуры окружающей среды. Такая усовершенствованная система показана на рис. 2.17, а цикл в T - S диаграмме — на рис. 2.18.

Для охлаждения основного потока газа используется отдельная система охлаждения на таких хладагентах, как углекислый газ, аммиак, хладоны. Критическая температура вспомогательного хладагента должна быть выше температуры окружающей среды, для того чтобы он мог быть скон-

денсирован в результате обмена теплотой с атмосферной или охлаждающей водой при температуре окружающей среды.

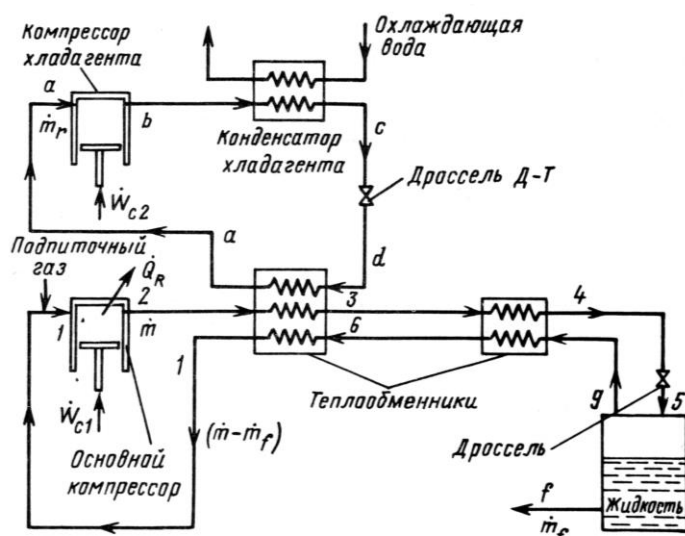


Рис. 2.17. Система Линде-Хэмпсона с предварительным охлаждением

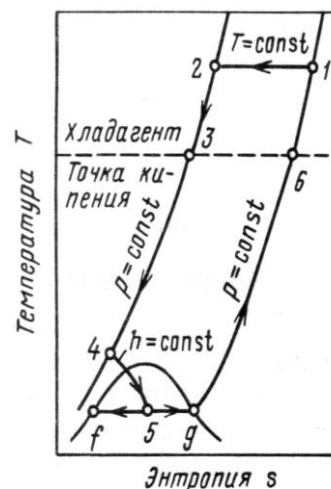


Рис. 2.18. Цикл Линде-Хэмпсона с предварительным охлаждением

Значение КПД для таких систем примерно на 50 % выше, чем для простой системы Линде-Хэмпсона.

2.3.1.3. Система Линде с двойным дросселированием

Для снижения полных затрат работы *простая система Линде-Хэмпсона* может быть модернизирована другим способом, хотя эта модернизация и несколько снижает выход жидкости. Так как в простой системе только небольшая часть газа ожижается, можно усовершенствовать цикл таким образом, чтобы не весь газ расширялся до низкого давления, а некоторая часть расширялась бы до промежуточного давления. Затраты работы в идеальном изотермическом компрессоре для идеального газа равны $RT_1 \ln(p_2/p_1)$, т. е. снижение степени сжатия снижает затраты работы. Это реализовано в системе Линде с двойным дросселированием, схема которой показана на рис. 2.19. Цикл показан в T - S диаграмме на рис. 2.20.

Первоначально газ сжимается до промежуточного давления и затем до высокого давления цикла после возврата газа из системы.

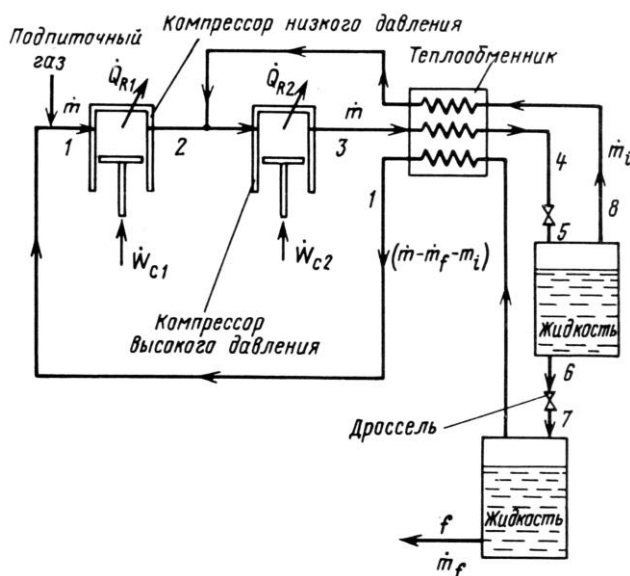


Рис. 2.19. Система Линде с двойным дросселированием (двух давлений)

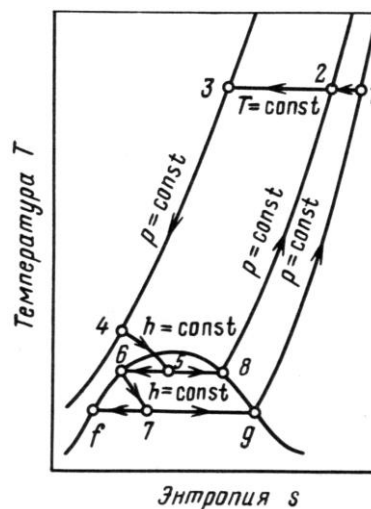


Рис. 2.20. Цикл Линде с двойным дросселированием

Газ высокого давления проходит через трехпоточный теплообменник и расширяется до промежуточного давления в точке 5, где часть газа охлаждается.

Насыщенная жидкость и пар разделяются в сборнике жидкости.

Затем пар возвращается во второй компрессор через трехпоточный теплообменник, в то время как жидкость расширяется до нижнего давления цикла.

Значение КПД для систем с двойным дросселированием примерно на 20–30 % выше, чем для простой системы Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением.

2.3.1.4. Каскадная система

Каскадная система является развитием системы с предварительным охлаждением, в которой предварительная система охлаждения охлаждается другой дополнительной системой. Каскадная система стала первой из всех ожижительных систем, предназначенных для получения жидкого воздуха. Каскадная система, предложенная Кеезом в 1933 г., показана на рис. 2.21.

В этой системе используется аммиак для ожижения этилена при 1925 кПа, этилен — для ожижения метана при 2530 кПа. В завершение метан используется для ожижения азота при 1885 кПа.

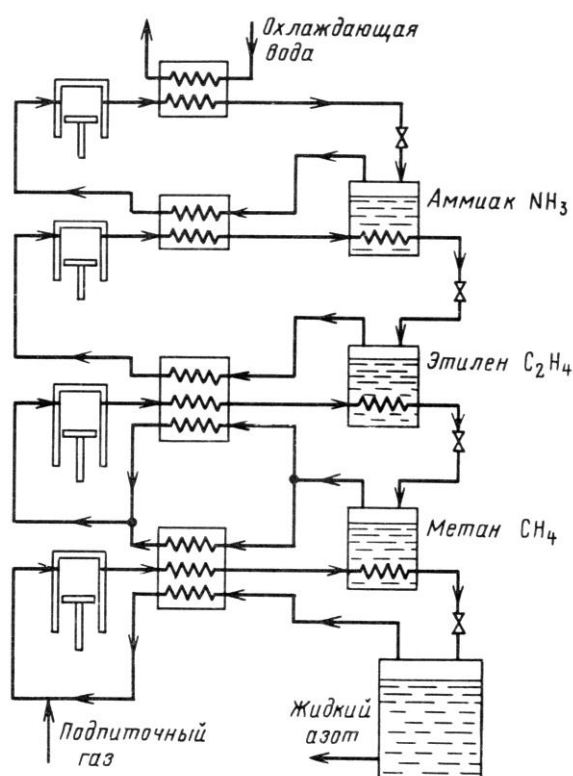


Рис. 2.21. Каскадная система

Другой приемлемой каскадной комбинацией является ряд хладонов (хладон-22, -113 и -14), используемых для ожижения азота, воздуха или кислорода.

С термодинамической точки зрения каскадные системы предпочтительнее для ожижения, так как они более близки к идеальным обратимым системам, чем обсуждавшиеся ранее. Тот факт, что необратимые потери в дросселе имеют место в более узком диапазоне давлений, чем в других системах, дает основание утверждать, что каскадные системы будут иметь более высокую эффективность. Более низ-

кое рабочее давление также свидетельствует в пользу этих систем.

С другой стороны, каскадные системы имеют ряд серьезных технических недостатков. Каждый контур должен быть герметичен, чтобы предотвратить утечку жидкости. Это вызывает сложности с монтажом — необходимо убедиться в отсутствии течей и обеспечить безопасную эксплуатацию установки.

2.3.1.5. Система Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением для неона и водорода

Благодаря своей простоте система Линде–Хэмпсона вполне подходит для установок ожижения большой мощности. Однако было показано, что базовая система Линде–Хэмпсона без предварительного охлаждения является неработоспособной для неона, водорода и гелия, так как максимальная температура инверсии этих газов ниже температуры окружающей среды. Применяя систему с предварительным охлаждением, температуру газа, поступающего на вход основной части ожижителя Линде–Хэмпсона, можно

понизить ниже температуры окружающей среды, выбрав соответствующее рабочее тело для системы предварительного охлаждения.

В принципе, в качестве предварительного хладагента может быть выбрано любое рабочее вещество, имеющее тройную точку ниже максимальной температуры инверсии неона или водорода. К таким веществам можно отнести *фтор, кислород, воздух, метан, аргон и азот*. Четыре первых могут быть исключены из практических применений вследствие их взрывоопасности. Аргон годен для употребления, однако он много дороже жидкого азота. Следовательно, в качестве предварительного криоагента для систем ожижения водорода и неона выбор можно остановить на жидком азоте.

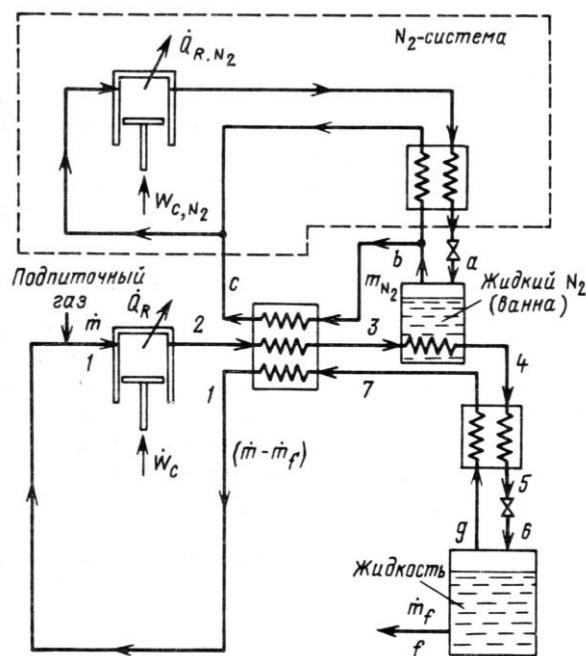


Рис. 2.22. Ожижитель неона или водорода Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением жидким азотом

Система Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением жидким азотом схематично показана на рис. 2.22. Для небольших лабораторных ожижителей подсистема жидкого азота может быть заменена небольшой емкостью для хранения, из которой жидкий азот переталкивается в ванну предварительного охлаждения, а пары отводятся через трехпоточный теплообменник в атмосферу. Для крупных систем вопрос об использовании

отдельной установки ожижения азота должен решаться на основе экономического анализа.

Выход жидкости в системе Линде—Хэмпсона с предохлаждением может быть увеличен за счет снижения температуры на входе в холодный теплообменник (точка 4 на рис. 2.22). В системе ожижения водорода или неона это может быть легко выполнено снижением давления в ванне с жидким азотом. Так как в ванне предварительного охлаждения происходит кипение азота, снижение давления приводит к снижению температуры кипения или температуры ванны. Однако существует технический предел процессу снижения температуры ванны.

При 63,2 К происходит затвердевание жидкого азота при давлении насыщения собственных паров (тройная точка азота), и дальнейшее уменьшение давления приводит к тому, что вся жидкость в ванне превратится в твердое тело. Между теплообменными поверхностями и твердым азотом трудно достичь хорошего теплового контакта из-за парового слоя, образующегося между твердым телом и стенками. Это явление лимитирует температуру ванны предохлаждения значением 63,2 К.

2.3.2. Системы ожижения с использованием процесса обратимого адиабатического расширения

2.3.2.1. Система Клода

С термодинамической точки зрения расширение в дросселе является необратимым процессом. Таким образом, для того чтобы приблизиться к идеальной эффективности, нужно найти лучший процесс для получения низких температур. В системе *Клода*, показанной на рис. 2.23, энергия отводится от газового потока за счет производства им работы в расширительной машине или детандере. Цикл Клода в T – S диаграмме показан на рис. 2.24. Если процесс в детандере обратимый и адиабатный, то этот процесс является изоэнтروпийным, в котором достигается более низкая температура, чем для изоэнтальпного расширения.

Газ первоначально сжимается до давления примерно 4 МПа и затем проходит через первый теплообменник.

Около 60–80 % газа отделяется от основного потока, расширяется в детандере и вновь объединяется с обратным потоком за вторым теплообменником.

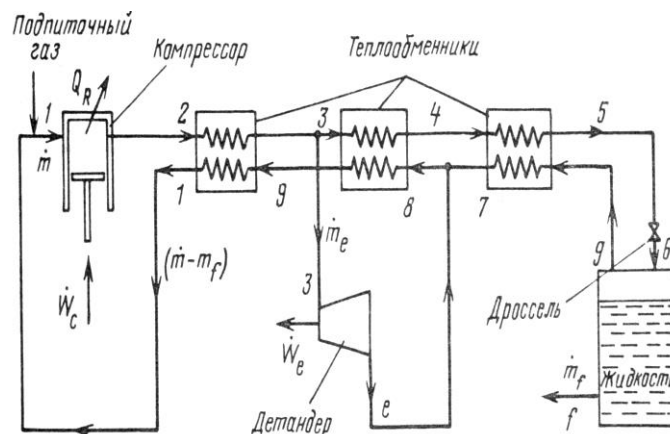


Рис. 2.23. Система Клода

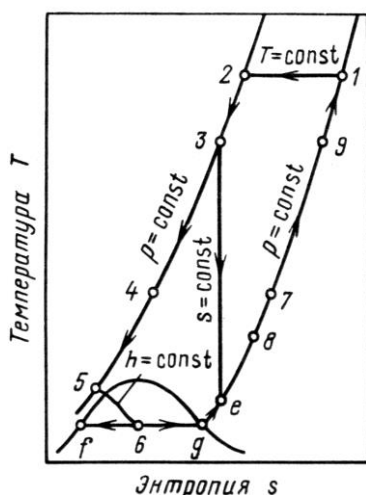


Рис. 2.24. Цикл Клода:
эффективность теплооб-
менников равна 100 %
и адиабатная эффектив-
ность детандера равна
100 %

Ожижаемый поток движется дальше через второй и третий теплообменники и, наконец, дросселирует в сборник жидкости.

Холодный пар из сборника жидкости возвращается через теплообменники, охлаждая поступающий газ.

Дроссель по-прежнему необходим в системе Клода, так как детандер реальной системы не может выдержать большое влагосодержание. Жидкость имеет значительно меньшую сжимаемость, чем газ, поэтому, если в цилиндре детандера (поршневого типа) образуется жидкость, это приведет к высоким ударным нагрузкам. Были разработаны некоторые турбодетандеры (осевого типа), успешно работающие с содержанием жидкости до 15 % по весу без разрушения

В некоторых системах Клода работа, получаемая в детандере, используется при сжатии газа. В большинстве малых систем энергия рассеивается в тормозах или потребляется внешним воздушным вентилятором. На выход жидкости не оказывает влияния, рассеивается ли энергия или нет; однако в том случае, когда работа детандера не используется, естественно, увеличиваются затраты работы на сжатие.

Теоретически КПД таких систем доходит до 80 %.

2.3.2.2. Система Капицы

Капица модернизировал базовую схему Клода, отказавшись от третьего, или низкотемпературного, теплообменника (рис. 2.25). В систему также введено несколько значительных технических усовершенствований. Вместо поршневого детандера был использован турбодетандер.

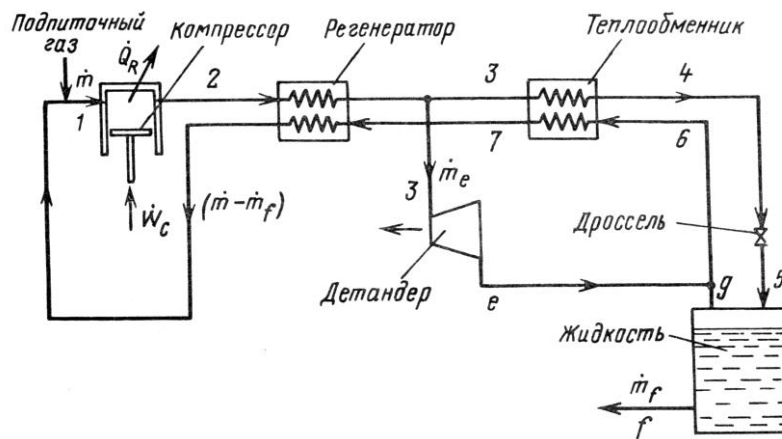


Рис. 2.25. Система Капицы

Теплый теплообменник фактически является переключаемым регенератором. Эта система была одной из первых, где были использованы турбодетандеры. Первый, или высокотемпературный, теплообменник в системе Капицы представлял собой в действительности набор регенераторов с клапанами, в которых объединяются процессы охлаждения и очистки.

Входящий теплый газ охлаждался в одном регенеративном элементе, и в нем же осаждались примеси, в то время как выходящий поток нагревался в другом элементе регенератора и выносил примеси, осажденные в нем ранее. Через несколько минут срабатывали клапаны и переключали потоки высокого и низкого давлений с одного элемента на другой. Система Капицы обычно работала при сравнительно низких давлениях — примерно 700 кПа.

2.3.2.3. Система Гейландта

Гейландт заметил, что для цикла высокого давления (примерно 20 МПа с долей детандируемого потока примерно 0,60) оптимальное значение температуры перед расширением в детандере близко к температуре окружающей среды. Таким образом, применяя систему Клода с давлением 20 МПа, можно исключить первый теплообменник. Такая модернизи-

ванная система Клода названа системой Гейландта по имени ее автора и широко используется в установках высокого давления для ожижения воздуха. Схема установки показана на рис. 2.26.

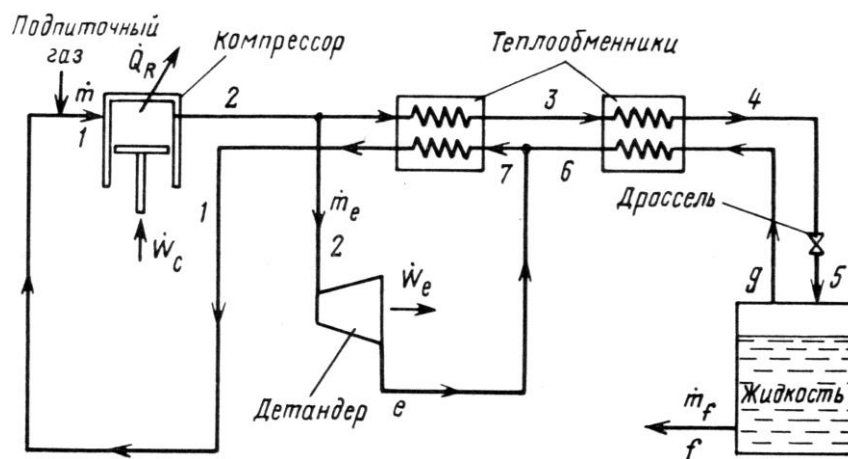


Рис. 2.26. Система Гейландта

Преимуществом системы Гейландта является простое решение вопросов смазки в детандере. В системах ожижения воздуха газ поступает в детандер при комнатной температуре и выходит с температурой примерно 150 К; для смазки могут использоваться обычные смазочные вещества. В системе Гейландта детандер и дроссель вносят примерно одинаковый вклад в получение низких температур, в то время как в обычной системе Клода роль детандера много больше.

2.3.2.4. Система Клода с двумя уровнями давления

Существует множество усовершенствований, которые могут быть использованы для повышения эффективности базовой схемы Клода. На рис. 2.27 показана система Клода с двумя уровнями давления, принципиально аналогичная системе Линде с двойным дросселированием.

В этой системе до высокого давления сжимается только газ, идущий на дроссель. Газ, циркулирующий через детандер, сжимается до некоторого промежуточного давления; поэтому затраты работы на единицу массы ожижаемого газа снижаются. Оптимальная эффективность этой системы на азоте, сжимаемом от 101,3 кПа до 3,5 МПа, достигается, когда примерно 75 % общего потока направляется в детандер.

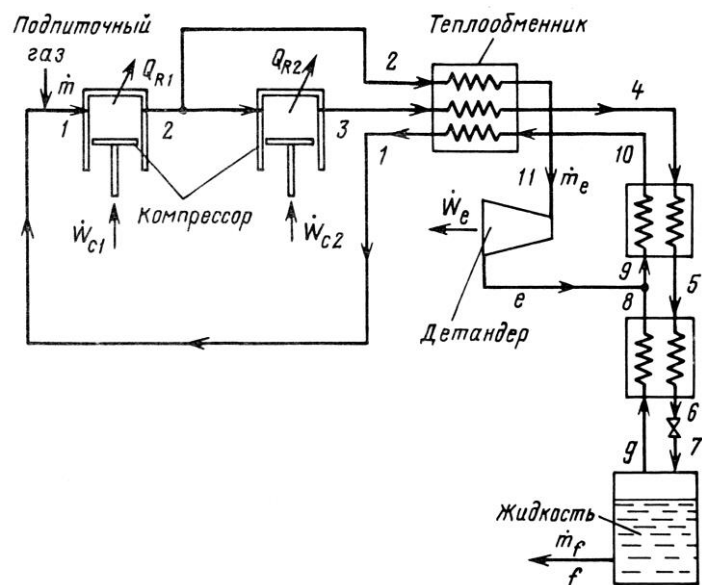


Рис. 2.27. Система Клода двух давлений

2.3.2.5. Система ожижения природного газа

Многие установки *ОПГ* работают по модернизированной каскадной схеме, называемой каскадной системой на смешанном хладагенте (*КСХ*), которая показана на рис. 2.28.

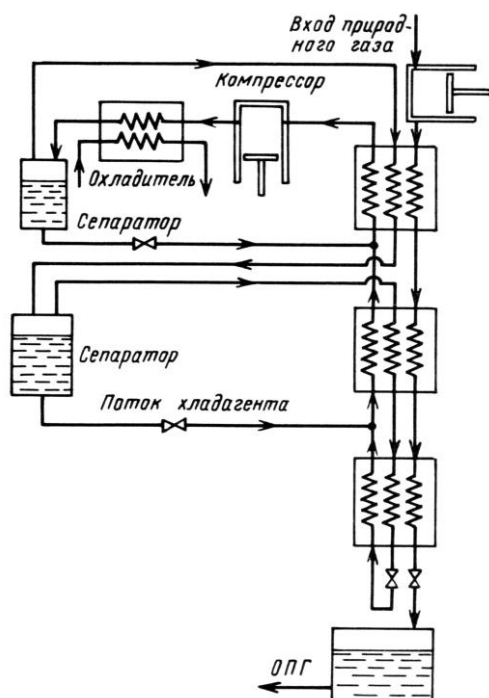


Рис. 2.28. Каскадная система на смесях, используемая для ожижения природного газа

Эта система была спроектирована для применения в каскадных системах авторефрижераторов. Работа такой системы стала возможной потому, что природный газ состоит из нескольких компонентов, конденсирующихся на различных температурных уровнях. Эти различные компоненты могут быть использованы для охлаждения входящего потока в *КСХ* без применения отдельных охлаждающих контуров для хладагентов. Это позволяет использовать один компрессор для организации циркуляции газа вместо отдельных компрессоров для каждого из потоков, как в случае обычной каскадной системы.

Природный газ обычно поступает в систему *КСХ* при давлении от 3,9 до 5,3 МПа. Если давление потока природного газа достаточно высоко, вспомогательный (дожимающий) компрессор может и не понадобиться.

Газовая смесь в охлаждающем цикле сжимается и частично конденсируется в охладителе за компрессором.

Поток поступает в сепаратор фаз, после которого жидкая фаза, обогащенная пропаном, расширяется в дросселе и смешивается с обратным газовым потоком для осуществления охлаждения в первом трехпоточном теплообменнике.

Пар из фазового сепаратора частично ожижается в трехпоточном теплообменнике и проходит во второй сепаратор фаз, из которого жидкость, обогащенная этаном, расширяется в дросселе и направляется во второй трехпоточный теплообменник.

Пар из второго сепаратора и поток природного газа частично конденсируются в окончательном трехпоточном теплообменнике. В этой точке цикла поток хладагента в основном состоит из метана; поток расширяется в дросселе и возвращается в систему для охлаждения основного потока в трехпоточном теплообменнике.

Жидкий природный газ дросселируется до давления хранения в сборник жидкости.

Ожижение природного газа включает несколько факторов, не учитываемых в других криогенных системах, например, в установках ожижения воздуха. В них только два компонента (азот и кислород) присутствуют в количествах более 1 %, в то время как природный газ состоит из трех или более компонентов с концентрацией, превышающей 1 %, включая метан, этан, пропан и азот. Эти составляющие конденсируются в широком диапазоне температур. Это делает системы *КСХ* удобными для установок *ОПГ*, однако они непригодны для ожижения чистых газов или таких смесей, как воздух.

2.3.2.6. Система Клода для водорода или неона

Получение низких температур в системе Клода в принципе не зависит от дроссельного вентиля. Поэтому система Клода, рассмотренная выше, может быть использована для водорода или неона без усовершенствований. Однако ее эффективность может быть улучшена, если в системе Кло-

да использовать ванну предварительного охлаждения с жидким азотом, как показано на рис. 2.29.

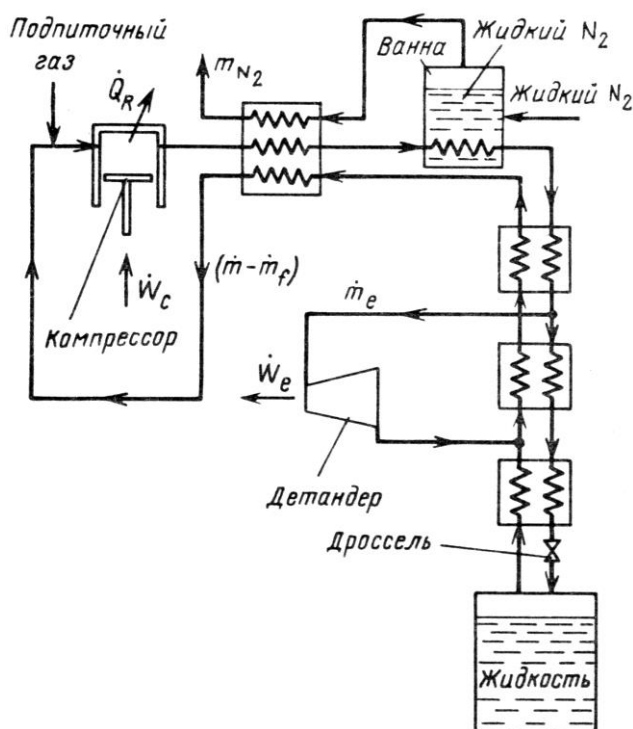


Рис. 2.29. Водородная или неоновая система Клода с предварительным охлаждением

Система Клода с предохлаждением жидким азотом для производства водорода имеет КПД на 50–75 % выше, чем система Линде–Хэмпсона с предварительным охлаждением.

2.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Температура (от лат. *temperatura* — надлежащее смешение, соразмерность, нормальное состояние) — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура одинакова для всех частей изолированной системы, находящейся в термодинамическом равновесии.

Чтобы корректно говорить об измерении какой-либо величины, должны быть определены 3 понятия — предмет измерения, прибор для измерения и масштаб (шкала) измерения. Рассмотрение этих объектов начнем с конца.

Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68) — температурная шкала, установленная в 1968 г. Международным комитетом мер и весов на основе 11 первичных воспроизводимых температурных точек, каждой из которых присвоено определённое значение температуры. В МПТШ-68 различают международную практическую температуру Кельвина (символ T_{68}) и международную практическую температуру Цельсия (символ t_{68}); соотношение между T_{68} и t_{68} следующее: $t_{68} = T_{68} - 273,15$ К. Основные реперные (постоянные) точки Международной практической температурной шкалы представлены в табл. 2.3. За исключением тройных точек и одной точки равновесного водорода (17,042 К), присвоенные значения температур действительны для состояний равновесия при давлении 101325 Па (1 нормальная атмосфера).

Таблица 2.3

Основные реперные точки международной шкалы температур

Состояния равновесия	Присвоенное значение международной практической температуры	
	T_{68} , К	t_{68} , °C
Тройная точка равновесного водорода	13,81	-259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами равновесного водорода при давлении 33330,6 Па (25/76 нормальной атмосферы)	17,042	-256,108
Точка кипения равновесного водорода	20,28	-252,87
Точка кипения неона	27,102	-246,048
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789
Точка кипения кислорода	90,188	-182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01
Точка кипения воды	373,15	100
Точка затвердевания цинка	692,73	419,58
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43

Приборы, применяемые для измерения температуры (термометры) делятся по принципу действия и диапазону измеряемых температур. Мы можем сделать вывод о температуре тела, измеряя:

- длину столбика ртути в капилляре;
- электрическое сопротивление проводника;
- давление идеального (близкого к идеальному) газа;

- термоЭДС между двумя разнородными металлами;
- равновесное давление газа над кипящей жидкостью;
- разность теплового расширения двух металлов в составном образце;
- скорость звука в газе;
- магнитную восприимчивость парамагнитного материала.

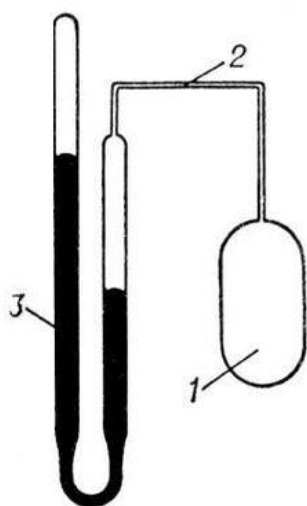


Рис. 2.30. Газовый термометр постоянного объема: 1 — заполненный газом баллон неизменного объема; 2 — тонкая соединительная трубка; 3 — устройство для измерения давления

Разумеется, перечисленные подходы относятся, в первую очередь, к случаю измерения низких температур.

Первичным термометрическим прибором для измерения термодинамической температуры вплоть до 1 К служит газовый термометр.

Газовый термометр — прибор для измерения температуры, действие которого основано на зависимости давления или объема идеального газа от температуры. Чаще всего применяют газовый термометр постоянного объема (рис. 2.30). В таком термометре изменение температуры газа в баллоне пропорционально изменению давления. Газовым термометром из-

меряют температуры в интервале от ~ 2 К до 1300 К. Предельно достижимая точность в зависимости от измеряемой температуры — $3 \cdot 10^{-3}$ – $2 \cdot 10^{-2}$ град.

Прибор такой высокой точности — сложное устройство; при измерении им температуры учитывают: отклонения свойств газа, заполняющего прибор, от свойств идеального газа; изменения объема баллона с изменением температуры; наличие в газе примесей, особенно конденсирующихся; сорбцию и десорбцию газа стенками баллона; диффузию газа сквозь стенки, а также распределение температуры вдоль соединительной трубки.

Температурная шкала газового термометра совпадает с термодинамической температурной шкалой, поэтому газовый термометр применяется в качестве первичного термометрического прибора. При помощи газового

термометра определены температуры постоянных (реперных) точек МПТШ-68.

Другими вариантами первичного термометра являются *акустический* и *шумовой термометры*, действие которых основано на связи термодинамической температуры соответственно со значением скорости звука в газе и интенсивностью тепловых флуктуаций напряжения в электрической цепи. Первичные прецизионные термометры используются в основном для определения температур легко воспроизводимых фазовых равновесий в однокомпонентных системах (так называемых реперных точек), которые служат опорными температурными точками МПТШ-68.

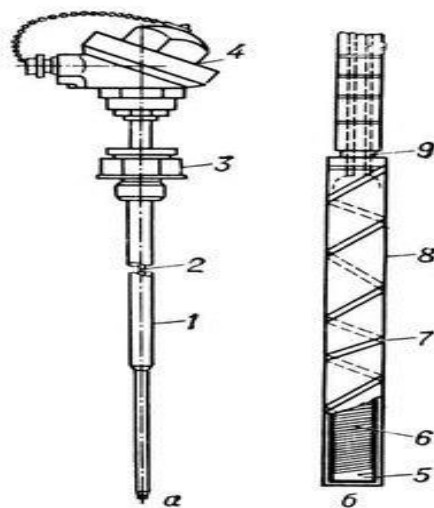


Рис. 2.31. Термометр сопротивления. Общий вид платинового термометра сопротивления (а) и его чувствительный элемент (б): 1 — стальной чехол; 2 — чувствительный элемент; 3 — штуцер для установки термометра; 4 — головка для присоединения термометра к электроизмерительному прибору; 5 — слюдяной каркас; 6 — бифилярная обмотка платиновой проволоки; 7 — серебряная лента; 8 — слюдяная накладка; 9 — серебряные выводы

Для воспроизведения любого значения температуры от $630,74^{\circ}\text{C}$ до $13,81\text{ K}$ по МПТШ-68 с точностью $\sim 0,001\text{ K}$ служит платиновый *термометр сопротивления* (рис. 2.31).

Принцип действия термометра сопротивлений основан на изменении электрического сопротивления чистых металлов, сплавов и полупроводников с температурой (на увеличении сопротивления R с повышением температуры T у металлов и обратной зависимости R от T у полупроводников).

Температурный коэффициент сопротивления α определяется как

$$\alpha = \frac{R_{1000^{\circ}\text{C}} - R_{0^{\circ}\text{C}}}{100R_{0^{\circ}\text{C}}}. \quad (2.36)$$

Широкое распространение получили термометры сопротивлений из чистых металлов, особенно *платины* ($\alpha = 0,0039\text{ град}^{-1}$) и *меди* ($\alpha = 0,0044\text{ град}^{-1}$), которые конструктивно представляют собой металлическую проволоку или ленту, намотанную на жёсткий каркас (из кварца, фарфора, слюды), заключённый в защитную оболочку (из металла, кварца, фарфора, стекла) с головкой, через которую проходят 2, 3 или 4 вывода, соединяющие термометр с измерительным прибором (рис. 2.31). Платиновые термометры сопротивления применяют для измерения температур в пределах от -263 до 1064°C , медные — от -50 до 180°C . Материал и конструкция термометра должны обеспечивать его чувствительность и стабильность, достаточные для требуемой точности измерений в заданном диапазоне температур при определённых условиях применения (вибрации, агрессивные среды и др.). Точность измерений температуры зависит также от точности прибора, которым измеряют сопротивление. Термометры сопротивления технического применения работают в комплекте с мостами измерительными, потенциометрами, логометрами (показывающими и самопишущими), шкалы которых градуированы непосредственно в градусах Цельсия в соответствии с таблицами зависимости R от T для данного типа термометра. При помощи высокоточных платиновых термометров воспроизводится Международная практическая температурная шкала, проводятся точные измерения температуры и градуировка других термометров в диапазоне $14\text{--}900\text{ K}$. В качестве лабораторных иногда применяют индиевые ($4\text{--}300\text{ K}$) и бронзовые ($1\text{--}4\text{ K}$) термометры сопротивления. Термометры из полупроводников (композиционный углерод, легированный германий и

др.) широко применяются для измерения низких температур (0,1–100 К) благодаря их высокой чувствительности. Приборы этого вида представляют собой полупроводниковые пластинки (плёнки) различных габаритов и формы с приваренными металлическими выводами, помещаемые часто в защитную оболочку. В диапазоне температур 4,2–13,8 К как особо точные применяют германиевые термометры. При температурах выше 100 К применение полупроводниковых термометров ограничено (сказываются их нестабильность и разброс индивидуальных характеристик).

Существует ряд других чувствительных к изменениям температуры устройств, которые могут быть использованы в качестве вторичных термометров для измерения низких температур: термопары, термисторы, полупроводниковые диоды, датчики из сверхпроводящих сплавов (в области гелиевых и водородных температур).

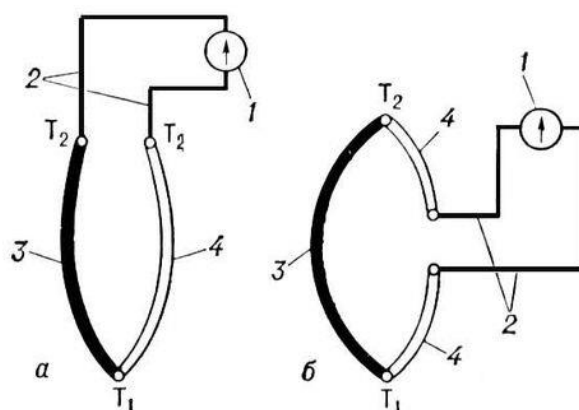


Рис. 2.32. Термопарный термометр и схемы включения термопары в измерительную цепь: измерительный прибор 1 подключен соединительными проводами 2 к концам термоэлектродов 3 и 4 (а) и в разрыв термоэлектрода 4 (б) T_1 , T_2 — температура «горячего» и «холодного» контактов (спаев) термопары

Термопара — датчик температуры, состоящий из двух соединённых между собой разнородных электропроводящих элементов (обычно металлических проводников, реже полупроводников — см. рис. 2.32). Действие термопары основано на *эффекте Зеебека*. Если контакты (обычно спаи) проводящих элементов, образующих термопару (их часто называют термо-

электродами), находятся при разных температурах, то в цепи термопары возникает ЭДС (*термоЭДС*), величина которой однозначно определяется температурой «горячего» и «холодного» контактов и природой материалов, примененных в качестве термоэлектродов.

Термопары используются в самых различных диапазонах температур. Так, термопары из золота, легированного железом (2-й термоэлектрод — медь или хромель), перекрывают диапазон 4–270 К, медь-константан — 70–800 К, хромель-копель — 220–900 К, хромель-алюмель — 220–1400 К, платинородий-платина — 250–1900 К, вольфрам-рений — 300–2800 К. ЭДС термопары из металлических проводников обычно лежит в пределах 5–60 мВ.

Точность определения температуры с помощью термопар составляет, как правило, несколько К, а у некоторых термометров достигает $\sim 0,01$ К. ЭДС термопары из полупроводников может быть на порядок выше, но такие термопары отличаются существенной нестабильностью. В сочетании с электроизмерительным прибором (милливольтметром, потенциометром и т. п.) термопара образует термоэлектрический термометр. Измерительный прибор подключают либо к концам термоэлектродов (рис. 2.32, а), либо в разрыв одного из них (рис. 2.32, б). При измерении температуры один из спаев обязательно термостатируется (обычно при 273 К). В зависимости от конструкции и назначения различают термопары: погруженные и поверхностные; с обыкновенной, взрывобезопасной, влагонепроницаемой или иной оболочкой (герметичной или негерметичной), а также без оболочки; обыкновенные, виброудароустойчивые и ударопрочные; стационарные и переносные и т. д.

Ниже 1 К газовым термометром пользоваться практически нельзя. Для определения термодинамической температуры в этой области используют *магнитные* и *ядерные* методы. В магнитной термометрии пользуются понятием магнитной температуры T^* , которую определяют из измерений магнитной восприимчивости χ парамагнитной соли. Для магнитной термометрии подбирают парамагнетики, у которых χ простейшим образом зависит от температуры: $\chi = C/T$ (*закон Кюри*). По измеренному в слабом внешнем магнитном поле значению χ и известной для данного парамагнетика постоянной Кюри C может быть определена так называемая магнитная температура T^* . В области температур, в которой выполняется закон

Кюри, T^* совпадает с термодинамической температурой T . При понижении температуры закон Кюри перестаёт быть точным и T^* может заметно отличаться от T . Практически магнитную температуру переводят в термодинамическую по таблицам и кривым, составленным на основании тщательных исследований зависимости восприимчивости χ парамагнитных солей от температуры. Наиболее широко для измерения сверхнизких температур до 6 мК применяют церий-магниевого нитрат, для которого расхождение шкал при указанной температуре меньше 0,1 мК.

В основе ядерных методов измерения низких температур лежит принцип квантовой статистической физики, согласно которому равновесная заселенность дискретных уровней энергии системы зависит от температуры. В одном из таких методов измеряется интенсивность линии ядерного магнитного резонанса, определяемая разностью заселённости уровней ядерных магнитных моментов в магнитном поле. В другом методе определяется зависящее от температуры отношение интенсивностей компонент, на которые расщепляется линия резонансного гамма-излучения (*эффект Мёссбауэра*) во внутреннем магнитном поле ферромагнетика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование современной вакуумной техники в первой половине XX в. было тесно связано с развитием электронных приборов. Средства вакуумной техники, кроме того, использовались в химической и пищевой промышленности, производстве оптических приборов, медицинских препаратов и т. п. После Второй мировой войны вакуумная техника нашла широкое применение в атомной промышленности, металлургическом производстве, исследованиях, связанных с физикой элементарных частиц и управляемой термоядерной реакцией, изучением и освоением космического пространства и т. д. Сегодня становится ясным, что одним из наиболее перспективных применений вакуумной техники в будущем продолжает оставаться электроника. При этом проблемы, стоящие перед вакуумной и криогенной техникой, в меньшей степени связаны с откачиваемыми электронными приборами и в большей — с технологическими процессами изготовления изделий микроэлектроники, включая интегральные схемы с субмикронными и нанометровыми размерами элементов, оптоэлектронику на основе наногетероструктур, твердотельную СВЧ-технику и т. д.

Очевидно, что дальнейшее развитие техники вакуума и криогеники как науки напрямую связано с развитием нанотехнологий и определяется именно знанием физических основ процессов, протекающих в сильно разреженных газах или приборах, находящихся при сверхнизких температурах. За долгие годы развития вакуумной и криогенной техники исчерпаны почти все возможные инженерные решения. Поэтому читателю следует сконцентрироваться на изучении именно физических основ явлений, так как только на основании их анализа возможно дальнейшее продвижение в область ультравысокого вакуума и сверхнизких температур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Архипов А. В.* Прикладная физика. Физические основы вакуумной и криогенной техники: учеб. пособие / А. В. Архипов, М. В. Мишин, А. В. Филимонов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 207 с.
2. *Розанов Л. Н.* Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. — М.: Высшая школа, 2007. — 392 с.
3. *Шешин Е. П.* Вакуумные технологии / Е. П. Шешин. — М.: Интеллект, 2009. — 502 с.
4. *Нестеров С. Б.* Расчет сложных вакуумных систем / С. Б. Нестеров, Ю. К. Васильев, А. В. Андросов. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 180 с.
5. *Брагин О. А.* Знакомство с методами получения и измерения вакуума: методические указания к лабораторной работе / О. А. Брагин. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 2006. — 14 с.
6. *Фролов Е. С.* Вакуумная техника: справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев и др. — М.: Машиностроение, 1992. — 480 с.
7. *Васильев Г. А.* Магниторазрядные насосы / Г. А. Васильев. — М.: Энергия, 1970. — 112 с.
8. *Дешман С.* Научные основы вакуумной техники: [пер. с англ.] / С. Дешман; под ред. М. И. Меншикова. — М.: Мир, 1994. — 715 с.
9. *Уэстон Дж.* Техника сверхвысокого вакуума / Дж. Уэстон. — М.: Мир, 1988. — 366 с.
10. *Нестеров С. Б.* Сверхвысоковакуумные низкотемпературные установки для сканирующих зондовых микроскопов. Области применения и конструктивные решения / С. Б. Нестеров, Н. Р. Сабирзянов // Вестник МЭИ. — 2004. — № 6. — С. 77.
11. *Кузьмин В. В.* Состояние и тенденции развития современного вакуумметрического приборостроения / В. В. Кузьмин // Вакуумная техника и технология. — 2001. — Т. 11. — № 1. — С. 3.
12. *Кузьмин В. В.* Современное состояние разработки и производства вакуумметрических приборов / В. В. Кузьмин // Вакуумная техника и технология. — 2002. — Т. 12. — № 4. — С. 193.
13. *Борисов В. П.* Вакуум: от натурфилософии до диффузионного насоса / В. П. Борисов. — М.: Изд-во НПК “Интелвак”, 2001. — 142 с.
14. *Плисковский В. Я.* Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. / В. Я. Плисковский. — М.: Машиностроение, 1976. — 64 с.

15. Барон Р. Ф. Криогенные системы / Р. Ф. Барон. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 408 с.
16. Орлова Н. П. Низкотемпературная термометрия. / Н. П. Орлова, О. Ф. Погорелова, С. А. Улыбин. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 192 с.
17. Университетское вакуумное общество СПбПУ «Унивак» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vacuum.ru/>.
18. Российское научно-техническое вакуумное общество [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rvs.itsoft.ru/>.
19. Электронная энциклопедии «Кругосвет», раздел «Вакуумная техника» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.krugosvet.ru/articles/15/1001578/1001578a1.htm>.
20. Сайт компании «Гидромех» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gidromeh.ru/>.
21. Сайт компании ООО ТПК «РосТехКом» [Электронный ресурс], URL: <http://www.vacmash.ru>.
22. Сайт компании ОАО "Вакууммаш" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vacma.ru>.
23. Сайт компании KJLC® [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lesker.com>.
24. Сайт группы компаний Pfeiffer Vacuum [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pfeiffer-vacuum.com/>.
25. Сайт компании Aerzen [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aerzengb.com>.
26. Сайт компании Agilent: Technologies [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.agilent.com>.
27. Сайт компании Ulvac Technologies [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ulvac.com>.
28. Сайт компании Edwards [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.edwardsvacuum.com>.
29. Сайт компании Shimadzu [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.shimadzu.com>.
30. Сайт компании Leybold [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/en/home/>.
31. Сайт компании Hositrad [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hositrad.com/>.