



МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В. П. Шестак



ФАКУЛЬТЕТ
АВТОМАТИКИ
И ЭЛЕКТРОНИКИ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ**

Москва 1991

Министерство науки, высшей школы и технической политики РСФСР

Московский ордена Трудового Красного Знамени
инженерно-физический институт

В. П. Шестак

*Дорогой Розе Александовне
с благодарностью
[подпись]
19.05.92.*

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Утверждено
редсоветом института
в качестве учебного пособия

Шестак В. П. **Физические основы вакуумной техники:**
Учебное пособие. М.: МИФИ, 1991. 88 с.

Учебное пособие содержит физическое описание вакуума как среды, в которой производится вакуумный технологический процесс, а также физические основы проектирования и расчета вакуумных систем, обеспечивающих получение требуемого вакуума. Рассматриваются основные понятия, используемые в вакуумной технике, термодинамический и статистический методы описания разреженного газа в вакуумных системах. Приведен результат структурного анализа вакуумных систем.

Изложенный материал может служить руководством при разработке вакуумных систем.

Предназначается для студентов старших курсов технических вузов и физических факультетов, стажеров, аспирантов и слушателей факультетов повышения квалификации по специальности «Вакуумная техника и технология».

© Московский
инженерно-физический
институт, 1991.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целями рассмотрения состояния вакуумной техники и отдельных ее разделов могут быть как поиск новых физических возможностей по обеспечению сложных и противоречивых требований технологических процессов, требующих вакуума, так и изучение накопленного опыта для дальнейшего использования.

Последнее десятилетие у нас в стране практически ежегодно публикуются книги по вакуумной технике. Часть из них традиционно излагает основные разделы молекулярной физики без их адаптации к проблемам современной вакуумной техники [1, 2, 6], другая часть является монографиями по узкоспециальным вопросам, например, разработки или эксплуатации насосов или манометров [8, 13], третья часть очень интересна с точки зрения развития вакуумной техники [3, 4], но сложна в восприятии и перегружена математикой.

Настоящее пособие представляет собой изложение физических основ современной вакуумной техники на языке вакуумной техники с сохранением присущей ей специфики.

Раздел 1 посвящен рассмотрению основных понятий вакуумной техники, к которым, в первую очередь, относятся вакуумные системы и их характеристики.

В разделе 2 обсуждается поведение газов в вакуумных системах и методы его описания.

Раздел 3 содержит вопросы проектирования и расчета вакуумных систем, анализ газовой нагрузки, откачиваемой из вакуумных систем.

Особенностью изложения материала является отсутствие повторов разделов курса общей физики и направленность на описание собственно вакуумных систем. Кроме этого, вопрос о первичности понятий: давление газа и его молекулярная концентрация [3] решен в пользу последнего, что отразилось в нетрадиционной форме записи ряда известных выражений и формул, а также привела к введению ряда новых определений.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы мироздания и строения материи всегда волновали человечество. Причин для этого было множество, и они определялись конкретными потребностями общества в процессе его развития. Общество реализовывало эти потребности через создание и совершенствование отраслевой науки и техники.

Очевидно, что все известные отрасли техники дополняют и поддерживают друг друга и в то же время имеют право на собственное существование. При этом их внутренняя структура схожа и включает ряд типовых разделов. Теоретическое рассмотрение вопросов, специфичных для данной отрасли, составляет содержание определенного направления в прикладной науке. Структура взаимосвязей науки, производства и технологии приведена на рис. В.1, где определяется место современной вакуумной техники.

Понятие «вакуумная техника» может быть интерпретировано как «техника пустоты», если использовать перевод латинского слова «вакуум». Естественно, это является преувеличением, так как под техническим вакуумом понимается состояние газовой среды, плотность которой ниже, чем в атмосфере, т.е. существо состоит не в качественном, а в количественном отличии состояния газа.

Технические средства, позволяющие получать, поддерживать и измерять разреженное состояние газа, составляют собственно вакуумную технику, вакуумные элементы и вакуумные приборы, обладающие ярковыраженной спецификой и используемые практически во всех отраслях современной техники и в научных исследованиях.

Возраст вакуумной техники — 350 лет и в нем можно выделить пять основных этапов.

1-й этап — накопление опыта (1641 — 1811): осознано существование атмосферного давления и его изменение с высотой, изобретены насосы и барометры, обнаружены основные закономерности в поведении газов (газовые законы), построена молекулярная теория строения веществ.

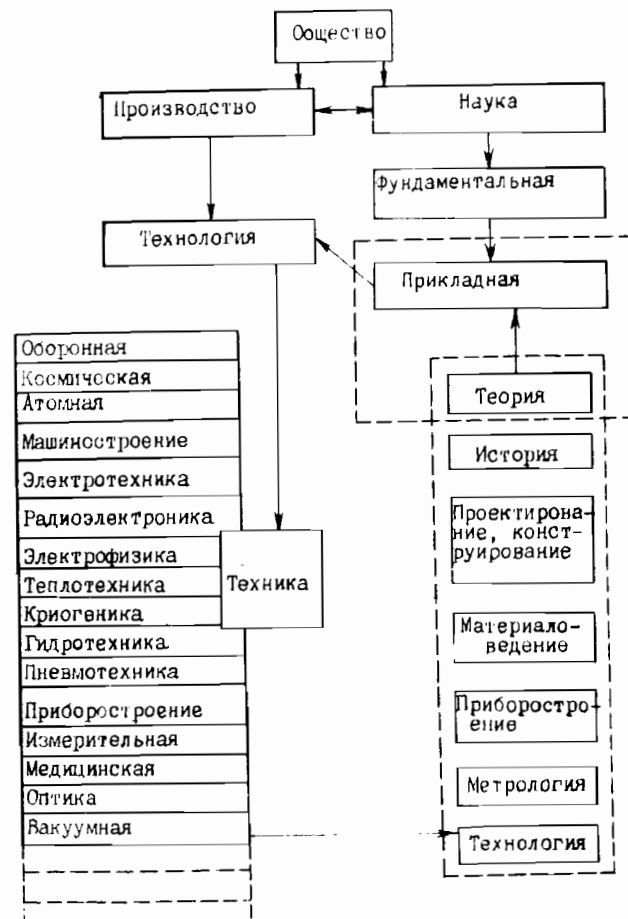


Рис. В.1. Место и структура вакуумной техники в современном обществе

2-й этап — поиск общности (1834 — 1873): составлены уравнения состояния идеального и реального газов, сформулированы начала термодинамики, разработаны молекулярно-кинетическая теория и теория диффузии газов, начаты поиски критических температур веществ и способов сжижения газов.

3-й этап — создание технической базы (1905 — 1928): за короткий промежуток времени изобретены практически все используемые ныне средства откачки и измерений.

4-й этап — создание технологии вакуума (1957 — 1965): принципиальный отход от традиционных стеклянных вакуумных систем, широкое международное сотрудничество, системы приобретают модульный характер, развиваются вакуумное материаловедение, вакуумное конструирование, вакуумная метрология, вакуумное аппаратостроение.

5-й этап — интеграция вакуумной техники (с 1975 г. и по настоящее время): происходит осознание того, что вакуумная система должна рассматриваться в совокупности с тем технологическим (физическим) процессом, ради которого она создается; углубляются представления о роли материаловедения и физики поверхности для вакуумных систем; разрабатываются теории вакуумных систем в электрофизике, в криогенной технике, т.е. ищется фундаментальная связь с другими отраслями науки и техники.

Развитие вакуумной техники обуславливалось потребностями общества. Например, для изучения электрических разрядов в газах был необходим вакуумный насос, и он был изобретен (Г. Гейслер, 1855 г.), а изобретение этого насоса позволило открыть катодные лучи (Ю. Плюккер, 1859 г.), изобрести уникальный манометр (Г. Маклеод, 1874 г.), который более 100 лет являлся единственным абсолютным манометром для измерения давления в высоком вакууме.

Ретроспективный подход при рассмотрении состояния вакуумной техники, ее теорий и путей развития позволяет оценить ее перспективы как самостоятельной отрасли.

В табл. В.1 приведена краткая хронология основных этапов развития вакуумной техники.

Таблица В.1

Хронология развития вакуумной техники

Год	Вклад в развитие	Автор	Страна
1641	Установление существования давления воздуха. Изобретение воздушного вакуумного насоса и водяного барометра	Отто фон Герике	Германия
1643	Получение вакуума в ртутном барометре — «торричеллиева пустота»	Эванджелиста Торричелли	Италия
1661	Установление закона изменения объема воздуха с давлением	Роберт Бойль	Великобритания
1706	Начало исследований разряда в газе (электрическая машина Гауксби)	Эдм Мариотт Френсис Гауксби	Франция Великобритания

Год	Вклад в развитие	Автор	Страна
1738	Публикация «Гидродинамики» — молекулярная теория материи	Даниил Бернулли	Швейцария
1750	Создание теории теплоты	М. В. Ломоносов	Россия
1770	Введено понятие теплёмкости	Джозеф Блек	Великобритания
1787	Получение зависимости давления газа от температуры	Жак Шарль	Франция
1802	Получение зависимости объема газа от температуры	Жозеф Луи Гей-Люссак	Франция
1811	Молекулярная гипотеза строения вещества и закон об одинаковом количестве молекул в равных объемах газов при одинаковых условиях. Установление числа Авогадро для моля	Амадео Авогадро	Италия
1834	Получение уравнения состояния идеального газа	Бенуа Клапейрон	Франция
1849—1850	Формулировка первого и второго начал термодинамики	Рудольф Клаузиус	Германия
1865	Введение понятия энтропии системы		
1855	Изобретение ртутного вакуумного насоса (насос Гейслера)	Георх Гейслер	Германия
1857—1859	Разработка кинетической теории газов. Понятие о «сфере действия» молекул и вычисление средней длины их свободного пробега	Рудольф Клаузиус	Германия
	Формулировка статистического закона распределения молекул по скоростям (распределение Максвелла для идеального равновесного газа)	Джеймс Максвелл	Великобритания
1872	Получение интегрально-кинетического уравнения для идеального газа, находящегося во внешнем поле (статистика Больцмана)	Людвиг Больцман	Германия
1874	Изобретение компрессионного манометра	Г. Маклеод	Великобритания
1876	Осуществление криогенной откачки	Джеймс Дьюар	Великобритания
1884	Осуществление геттерной откачки ламп накаливания	А. Малиньяни	Италия
1905—1915	Изобретение вращательного ртутного и масляного насосов,	Вольфганг Геде	Германия

Год	Вклад в развитие	Автор	Страна
1957	молекулярного механического насоса, диффузионного пароструйного ртутного насоса Начало широких космических исследований		СССР, США
1958	Изобретение турбомолекулярного и магниторазрядного насосов	В. Беккер и Лью Холл	США
1960	Возникновение множества фирм, производящих и торгующих металлическими компонентами сверхвысоковакуумных систем		
1965	Начало интенсивных исследований поверхности твердого тела, развитие микроэлектроники		
1975—1985	Разработка и создание более 10 крупных электрофизических установок и комплексов (ускорителей, накопителей частиц, термоядерных установок)		
1977	Первое применение нераспыляемых геттеров	Фирма SAES Getters	Италия
1980	Формулировка концепции вакуумной техники электрофизических установок и комплексов. Постановка вопроса об адекватности давления и молекулярной концентрации	Г. Д. Саксаганский	СССР
1982	Публикация первого отечественного учебника для вузов «Вакуумная техника»	Л. Н. Розанов	СССР
1987	Формулировка понятия «Экстремальный вакуум» (менее 10^{-12} Па) и разработка технологии его получения	К. Бенвенути	Швейцария (ЦЕРН)

1. ТЕХНИЧЕСКИЙ ВАКУУМ. ПОНЯТИЯ

1.1. ВАКУУМНО-ЗАВИСИМЫЕ ПРОЦЕССЫ

Рост производства элементов вакуумной техники опережает аналогичный рост других отраслей техники, что связано с очень высокой экономической рентабельностью любых процессов с использованием вакуума. Например, вакуумные клапаны выпускают в мире 78 фирм (из них 44 американских). Крупнейшие фирмы, специализирующиеся на вакуумном оборудовании, такие, как Alcatel (Франция), Balzers (Лихтенштейн), Perkin-Elmer (США), Edwards (Великобритания), выпускают более 150 наименований компонентов вакуумных систем каждая.

Современные технологии широко используют вакуумные условия для достижения лучших, а иногда и уникальных результатов. В табл. 1.1 приведены примеры основных вакуумных технологических процессов, где функции вакуума условно разнесены на 9 групп.

Наиболее характерными примерами вакуумно-зависимых процессов являются современные технологии в электронной промышленности:

молекулярно-лучевая эпитаксия, применяемая для выращивания монокристаллических пленок с заданным распределением примесей, где вакуум необходим для обеспечения чистоты выращиваемой пленки и формирования молекулярных пучков;

ионная имплантация примесей в полупроводниковые материалы, где вакуум необходим для сохранения прецизионного ионного пучка;

литография при экспонировании рисунков микросхем с субмикронными размерами электронными и рентгеновскими лучами, где вакуум обеспечивает экспонирование с высоким пространственным разрешением;

вакуумные методы диагностики состояния поверхностей, растровая электронная микроскопия, оже-спектроскопия, масс-спектроскопия вторичных ионов и т. п.

В физике высоких энергий, в ускорителях заряженных частиц вакуумные условия определяют их основные рабочие характеристики, так как ускоряемые и накапливаемые пучки частиц могут существовать только в вакууме. Характер взаимодействия пучка и остаточного газа зависит от вида частиц и типа ускорителя [4]. Например:

при повышенных токах **пучка протонов** может инициироваться лавинный процесс «вакуумной неустойчивости», так как образованные при столкновении ионы стимулируют десорбцию молекул, «налипших» на внутренней поверхности вакуумных камер;

Таблица 1.1

Вакуумные технологические процессы

Функция вакуума	Диапазон давлений, Па	Отрасль, в которой используется
Обеспечение «пустоты» в пространстве	$10-10^{-12}$	Химия, физхимия, физика пучков, приборостроение (напылительные установки)
Обеспечение чистоты поверхностей	$\sim 10^{-7}$	Микроэлектроника, физика поверхностей
Имитация космического пространства	$\sim 10^{-7}$	Космическая техника
Обеспечение подсоса различных сред	до 10	Бытовая техника (пылесосы), животноводство (доильные аппараты), медицина, химия (перекачка продуктов)
Теплоизоляция	$\sim 10^{-4}$	Сверхпроводимость, криогенная техника, ракетная техника
Обеспечение перепада давлений и создание механической силы	до 10	Металлургия (литье), электротехника (пропитка), транспорт
Формирование заданной газовой среды	$10^{-1} - 10^{-7}$	Термоядерные исследования, электротехника, химия, вакуумные печи
Леофильная (активная) сушка испарением	до 10	Медицина, сельское хозяйство (сублиматоры), строительная техника
Шлюзование объектов в вакуум и вне его	$10^{-5} - 10^{-4}$	Электронно-лучевая сварка, анализ материалов

в ускорителях **многозарядных ионов** существенны процессы **перезарядки ионов**;

опасность электрического пробоя в линейных ускорителях, в которых ускорение частиц достигается за счет их движения в сильных полях, снижается при **вакуумной изоляции** зазоров;

качество и величина ускоряемого и накапливаемого тока пучка определяется количеством молекул остаточного газа, являющихся центрами **рассеяния частиц** пучка;

из-за рассеяния частиц пучка на остаточном газе активируется оборудование и образуется мешающий **фон вторичных частиц**, что особенно нежелательно в областях взаимодействия встречных пучков, так как затрудняет регистрацию событий;

в ускорителях с **криогенной откачкой** возникают дополнительные нестационарные потоки молекул от «теплых» участков вакуумной системы к «холодным».

Интересны и очень сложны требования к вакууму в термоядерных реакторах, в которых вакуумно-технологический процесс носит импульсный характер и делится на три этапа с принципиально различными вакуумными условиями:

фоновая откачка системы, откачка примесей и нейтрального газа (протия), получение давлений по примесям ($10^{-5} \div 10^{-6}$) Па, что обеспечивает требуемую температуру плазмы (высоковакуумный этап);

рабочий цикл при впрыскивании в разрядную камеру газообразного топлива — смеси тяжелых изотопов водорода (дейтерий, тритий) при давлении ($10^{-1} \div 1$) Па (низковакуумный этап);

удаление газообразных продуктов реакции (гелий) и остатков топлива в паузе между рабочими циклами (быстрый высоковакуумный этап).

В этом примере сложность определяется прежде всего селективностью требований по разным газам и необходимостью быстрого реагирования вакуумной системы на условия физического процесса.

В табл. 1.2 приведена условная градация вакуумных условий по уровню достигнутого вакуума и ряд соответствующих этому вакууму величин, используемых при различных вакуумных технологических процессах в качестве основной характеристики вакуумных условий.

Ситуация, сложившаяся в современной вакуумной технике и иллюстрируемая табл. 1.1 и 1.2, сводится к тому, что и методы описания, и проблемы, и используемые вакуумные системы для разных вакуумных технологических процессов различны, что существенно усложняет не только задачу общего описания физических основ этих систем, но и затрудняет процесс общения и обмена информацией для специалистов, работающих с вакуумными системами различного назначения. Тем не менее, возможно выявить общее в понятиях и критериях проектирования любых вакуумных систем на основе рассмотрения поведения газов в них.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМА

1.2.1. Давление

Традиционно главным параметром, характеризующим вакуум, является давление газа. Рассматривая вакуум как состояние газа после его разрежения относительно атмосферных условий, считают, что в некотором объеме V хаотически движутся N молекул. При этом газ находится в равновесии, т. е. не существует преимущественного направления движения молекул, а они сами распределены

Степень вакуума и соответствующие ей величины
(воздух, $M = 29$, 20°C)

Величина	Вакуум в системе				
	Разгерметизация	Низкий	Средний	Высокий	Сверхвысокий
Диапазон давления, мм рт.ст. (Па)	До 760 (10^5)	До 10^{-2} (1,3)	До 10^{-6} ($1,3 \cdot 10^{-4}$)	До 10^{-10} ($1,3 \cdot 10^{-8}$)	До 10^{-12} ($1,3 \cdot 10^{-10}$)*
Молекулярная концентрация, мол. · м ⁻³	$2,7 \cdot 10^{25}$	$3,6 \cdot 10^{20}$	$3,6 \cdot 10^{16}$	$3,6 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^{10}$
Средняя длина свободного пробега, м	$6,6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-3}$	50	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^7$
Плотность потока молекул, мол. · м ⁻² · с ⁻¹	$2,9 \cdot 10^{27}$	$3,9 \cdot 10^{22}$	$3,9 \cdot 10^{18}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$3,9 \cdot 10^{11}$
Время образования монослоя на поверхности	$3 \cdot 10^{-19}$ с	100 мкс	1 с	2,8 ч	11 сут.
Высота над землей для вакуума в космосе, км	0	80	200	700	1500**
Допустимая величина потока натекания, Вт	—	10^{-2}	10^{-6}	10^{-10}	10^{-12} ***

* При меньших давлениях условия «экстремального вакуума».

** Межгалактический вакуум 10^{-27} Па.

*** Соответствует пределу чувствительности теченскаателей.

по объему равномерно. В единице объема такого газа число молекул, движущихся в произвольном телесном угле $d\omega$, составляет

$$\frac{N}{V} \frac{d\omega}{4\pi} = n \frac{d\omega}{4\pi}.$$

Если функция распределения молекул по скоростям $f(\vec{v})$, то произведение $f(\vec{v})d\vec{v}$ характеризует долю молекул, обладающих скоростями в интервале от $\vec{v}$ до $\vec{v} + d\vec{v}$, независимо от направления их движения. Число молекул в единице объема, обладающих данной скоростью в выбранном направлении (внутри телесного угла $d\omega$) равно:

$$f(\vec{v})d\vec{v} \frac{d\omega}{4\pi}.$$

Рассматриваемый случай приведен на рис. 1.1. Молекулы из единичного объема $\vec{V}$ налетают на элемент внутренней поверхности камеры dA . За время dt долетит до площадки dA и ударится о нее число молекул $\tilde{N}$:

$$\tilde{N} = f(\vec{v})d\vec{v} \sin\theta d\theta d\psi \times \times \cos\theta d\vec{r} dA \cdot \frac{1}{4\pi}, \quad (1.1)$$

где $\vec{V} = \vec{r} \sin\theta d\psi \cdot (\vec{r} d\theta) \times \times d\vec{r}$, $d\omega = \cos\theta \frac{dA}{r^2}$, $\vec{r}$ —

радиус-вектор, $d\vec{r} = \vec{v} \cdot dt$.

Нормальная составляющая импульса этих молекул равна

$$\frac{1}{4\pi} m \vec{v} \cos\theta f(\vec{v}) d\vec{v} \vec{v} \cos\theta \sin\theta d\theta d\psi dt dA. \quad (1.2)$$

В предположении упругого взаимодействия молекулы будут отражаться с неизменной скоростью под углом, равным углу падения. Тогда изменение нормальной составляющей импульса равно удвоенному выражению (1.2), т.е.:

$$\frac{1}{2\pi} m \vec{v}^2 f(\vec{v}) d\vec{v} \cos^2\theta \sin\theta d\theta d\psi dt dA.$$

Импульс, сообщаемый телу в единицу времени, дает силу, действующую на тело, а сила, действующая на единицу поверх-

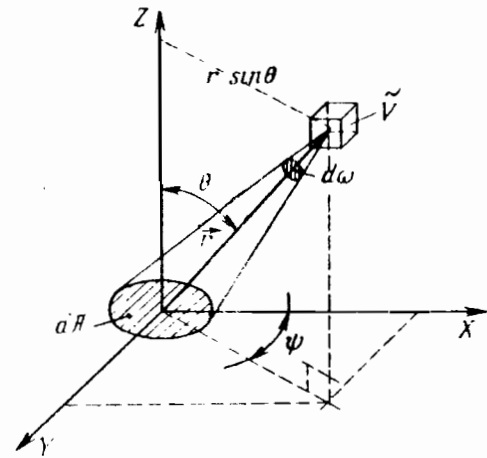


Рис. 1.1. Схема соударений молекул с поверхностью

ности тела, дает давление, оказываемое на тело:

$$d\bar{p} = m \bar{v}^2 f(\bar{v}) d\bar{v} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\psi \frac{1}{2\pi}.$$

Интегрируя полученное выражение по скоростям и направлениям, находим:

$$\bar{p} = \frac{m}{2\pi} \int_0^\infty \bar{v}^2 f(\bar{v}) d\bar{v} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{3} m n \langle \bar{v}^2 \rangle \quad (1.3)$$

с учетом того, что $\frac{1}{n} \int_0^\infty \bar{v}^2 f(\bar{v}) d\bar{v} \equiv \langle \bar{v}^2 \rangle$.

1.2.2. Длина свободного пробега молекул

Естественно, что рассмотренная выше модель бомбардировки поверхности может работать лишь при условии, что молекулы из объема $\bar{V}$ без помех долетают до площадки dA , т.е. между объемом $\bar{V}$ и площадкой dA молекулы, двигаясь вдоль радиуса вектора $\bar{r}$, не должны испытывать столкновений.

В этом случае принято говорить о длине свободного пробега молекул или об усредненной длине ее перемещения между последовательными столкновениями, например, с другими молекулами. Предположим, что все молекулы диаметром d , кроме одной, покоятся. Движущаяся молекула будет сталкиваться со всеми молекулами, центры которых лежат на расстоянии, меньшем или равном d от прямой, вдоль которой она движется. Считаем, что движущаяся молекула обладает эффективным сечением столкновения, равным πd^2 . Если скорость молекулы равна v , то в единицу времени она столкнется со всеми молекулами, находящимися внутри зоны прохода молекулы, объем которой равен $\pi d^2 v$. Тогда число столкновений в единицу времени: $n \pi d^2 v$, где n — число молекул в единице объема.

Поскольку в действительности все молекулы одновременно находятся в движении, то под v следует понимать относительную среднюю скорость движения молекул [6]:

$$\bar{v}_{\text{рез}} = f(\bar{v}_1) f(\bar{v}_2) \bar{v}_1 \bar{v}_2 \int \sin \theta_1 d\theta_1 d\psi_1 \int \sin \theta_2 d\theta_2 d\psi_2 \times$$

где индексы 1 и 2 относятся к двум сталкивающимся молекулам; $\bar{v}_{\text{рез}}$ — результирующая скорость после столкновения.

Считаем, что $\bar{v}_{\text{рез}} = \left(\langle \bar{v}_1^2 \rangle + \langle \bar{v}_2^2 \rangle \right)^{1/2} = \sqrt{2} v_{\text{ср}}$, где $v_{\text{ср}}$ — одинаковая для всех молекул средняя скорость.

Число столкновений в единицу времени:

$$n \pi d^2 \sqrt{2} v_{\text{ср}},$$

а средняя длина свободного пробега молекулы:

$$\lambda = \frac{v_{\text{ср}}}{n \pi d^2 \sqrt{2} v_{\text{ср}}} = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2}.$$

В случае смеси двух газов, молекулы которых имеют массы m_1 и m_2 и диаметры d_1 и d_2 , средняя длина свободного пути молекулы с массой m_1 , равна [1]:

$$\lambda_{m_1} = \frac{1}{\sqrt{2} n_1 \pi d_1^2 + n_2 \pi d_2^2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}}, \quad (1.4)$$

где $d_{12} = \frac{1}{2}(d_1 + d_2)$.

Длина свободного пробега обратно пропорциональна молекулярной концентрации в объеме или величине давления. В ряде случаев, например в **напылительных установках**, длина свободного пробега является самостоятельным параметром вакуума (для воздуха при 20° С: $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{p}$, м, Па).

Средняя длина свободного пробега электронов λ_e в газе, в котором средняя длина свободного пробега молекул равна λ , вычисляется по формуле

$$\lambda_e \approx 5,6 \lambda.$$

1.2.3. Молекулярная концентрация

Оба рассмотренных параметра позволяют оценить количество молекул в объеме. Когда молекул «много», эти параметры имеют не только физический смысл, но и физические проявления — прогиб диафрагмы, подъем столбика жидкости, размывание пучка частиц по экспоненциальному закону за счет потери интенсивности из-за рассеивания частиц на молекулах остаточного газа.

Однако в подавляющем большинстве случаев в вакуумной технике принято иметь дело с «малым» количеством молекул (см. табл. 1.1 и 1.2).

В этом случае силовое воздействие молекул незначительно и процессы, протекающие в вакуумных камерах, характеризуются количеством молекул в единице объема вакуумной камеры [9] — молекулярной концентрацией $n = \frac{N}{V}$, мол. · м⁻³. В этом параметре есть существенный недостаток — отсутствие информации

о величине скорости молекул и ее направлении. Поэтому можно использовать для описания вакуума, например, плотность потока молекул или произведение $n \bar{v}^0$, мол. · м⁻² · с⁻¹, где $\bar{v}^0$ — скорость молекул в направлении переноса.

Оценим плотность потока молекул I на элемент площади dA , используя выражение (1.1):

$$I = \frac{N}{dA dt} = \int (\bar{v}) d\bar{v} \sin \theta d\theta d\psi \bar{v} \cos \theta \frac{1}{4\pi}.$$

Интегрируя это выражение по скоростям и направлениям, можно определить плотность потока молекул на стенку камеры:

$$I = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \bar{v} f(\bar{v}) d\bar{v} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\psi = \\ = \frac{n}{2} \langle \bar{v}^0 \rangle \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]_0^{\pi/2} = \frac{n \langle \bar{v}^0 \rangle}{4}, \quad (1.5)$$

где $\frac{1}{n} \int_0^\infty \bar{v} f(\bar{v}) d\bar{v} \equiv \langle \bar{v}^0 \rangle$.

Выражение (1.5) интересно тем, что плотность потока не зависит от массы молекул и что можно вычислить объем газа, проходящий через единичную площадку в единицу времени, V_∞ :

$$V_\infty n = I dA dt,$$

откуда

$$V_\infty = \frac{\langle \bar{v}^0 \rangle}{4}, \text{ м}^3. \quad (1.6)$$

Величина V_∞ является практически верхней оценкой предельных возможностей по откачке любого насоса, так как определяет количество молекул поступающих на его вход.

Вопрос об определении средней скорости молекул является самым сложным для вакуумной техники, так как модельное представление о хаотизированном движении совокупности молекул имеет смысл только для стационарного равновесного состояния газа при отсутствии молекулярных потоков, а следовательно, неприменимо для реальных систем с откачкой. Подробнее об этом будет сказано в п. 2.3.

1.2.4. Парциальный состав

Закон Дальтона формулируется следующим образом: общее давление смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме парциальных давлений компонентов смеси.

Следует отметить, что вакуум, получаемый из атмосферного воздуха, всегда содержит смесь газов, комбинация которых за-

висит от многих причин, главными из которых являются, во-первых, начальный состав атмосферного воздуха и, во-вторых, селективность средств откачки, используемых при получении вакуума. Таблицы состава атмосферного воздуха и основных характеристик разных газов приведены в приложении.

Отдельные компоненты смеси газов должны рассматриваться автономно и с точки зрения анализа суммарных характеристик вакуума, и с точки зрения метрологии вакуума. При этом под термином «характеристики вакуума» понимается:

взаимодействие вакуума и вакуумного технологического процесса;

реакция вакуума на охлаждение или нагрев камеры;
стабильность параметров вакуума во времени;
равномерность состояния молекул в вакууме;
изотропность распределения молекул в вакууме.

Перечисленные характеристики вакуума для разных компонентов смеси отличаются, что определяется отличием физико-химических свойств разных газов.

1.2.5. Газовые законы

Для разреженного состояния идеального газа справедливо уравнение состояния [10]:

$$\frac{p V_m}{T} = \text{const} = R, \quad (1.7)$$

где p — давление; V_m — объем, занимаемый молекулами газа; T — его температура; R — универсальная газовая постоянная (работа расширения одного моля газа при его нагревании на один градус и постоянном давлении $R = 8,3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$).

При вакуумных условиях и не очень низких температурах (не близких к температурам конденсации) все газы можно рассматривать как идеальные, т.е. все частные законы, вытекающие из выражения (1.7) справедливы для вакуума, например, закон Бойля — Мариотта: для данной массы газа при неизменной температуре произведение его объема на давление есть величина постоянная.

Под массой газа в нашем случае следует понимать количество молекул; уменьшение или увеличение объема при неизменной температуре процесс безусловно идеализированный и называется изотермическим, т.е. если объем, в котором получен некий вакуум, изометрически сжимать, то давление будет расти по гиперболической зависимости от объема.

Газовые законы используются для описания только характеристик низкого вакуума. Например, при «улучшении вакуума»,

т. е. при снижении давления, закон Шарля ($\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$) не выполняется, так как в газе действуют другие условия достижения равновесия — равенство интенсивности молекулярных потоков:

$$\frac{n_1 \langle \bar{v}_1 \rangle}{4} = \frac{n_2 \langle \bar{v}_2 \rangle}{4},$$

откуда $\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$ (эффект Кнудсена), учитывая, что $\langle v \rangle \sim \sqrt{T}$.

1.3. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

Natura abhorret vacuum (лат.) — природа боится пустоты, природа не терпит пустоты — так до открытия атмосферного давления объясняли всасывание воды вслед за поднимающимся поршнем, т. е. действие вакуумного насоса. Действительно, вакуум обладает всасывающим действием и, предоставленный сам себе, через определенное время перестает существовать, заполняясь каким-либо веществом. Современная теория объясняет это свойство вакуума процессами диффузии из-за существования градиента концентрации веществ (газов).

Для поддержания заданных параметров вакуума в вакуумной технике используются вакуумные системы, сложность и конфигурация которых зависит от конкретных условий вакуумного технологического процесса. Эти системы создаются на основе индивидуальных проектов.

На рис. 1.2 приведена общая схема вакуумной системы. Все



Рис. 1.2. Структурная схема вакуумной системы

пять компонентов, составляющих систему, обязательны, так как нет смысла получать вакуум без технологической потребности; вакуум не может быть получен иначе, чем в камере ограниченного объема; для получения вакуума необходимо средство, снижающее количество молекул в камере, которое следует контролировать, и, наконец, все элементы должны механически соединяться друг с другом с помощью труб, фланцев, клапанов и других конструктивных элементов.

1.3.1. Быстрота действия насоса

Все известные высоковакуумные насосы работают в непрерывном режиме, т. е. непрерывно удаляют из системы молекулы, попадающие на вход насоса (или в его активную зону). Это происходит одновременно со снижением количества молекул в камере за счет перемещения их в насос, что и составляет суть процесса откачки.

Идеальный насос должен, во-первых, обеспечивать 100 %-ный захват попадающих на его вход молекул и, во-вторых, обеспечивать постоянство потока молекул во времени: $Q = dN/dt = \text{const}$, что может быть выполнено только при условии увеличивающейся объемной быстроты действия насоса S_0 , т. е. должна увеличиваться величина объема газа V^* , проходящего в единицу времени внутрь насоса, так как при откачке снижается молекулярная концентрация газа n :

$$Q = n \frac{dV^*}{dt} = n S_0. \quad (1.8)$$

Однако из п. 1.2.3 следует, что объем газа, попадающий на вход насоса, ограничен, следовательно, такой путь создания идеального насоса невозможен. На практике его реализуют поэтапным включением насосов со все увеличивающейся быстротой действия по мере уменьшения числа молекул и получения все более глубокого вакуума.

Из (1.8) следует, что быстрота действия насоса

$$S_0 = \frac{1}{n_0} \frac{dN}{dt}, \quad (1.9)$$

где n_0 — молекулярная концентрация на входе насоса.

1.3.2. Поток молекул

Традиционно поток газа определяется как количество газа, проходящего через сечение системы в единицу времени:

$$Q^* = \frac{d(pV)}{dt}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.10)$$

где индекс «т» означает, что использован термодинамический подход в определении величины потока газа.

Выражение (1.10) может быть записано в виде:

$$Q^T = \frac{d(NkT)}{dt} = kT \frac{dN}{dt}, \text{ Вт,}$$

где k — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); $[T] = \text{К}$; N — количество молекул.

При такой форме записи ясно, что поток газа является тепловым потоком, созданным молекулами, что, однако, не упрощает описания процессов откачки вакуумных систем. Представляется более рациональным для этого использовать форму записи потока газа (молекул), общепринятую в других разделах физики:

$$Q^\Phi = \frac{dN}{dt}, \text{ мол.} \cdot \text{с}^{-1},$$

где индекс «ф» подчеркивает корпускулярную природу потока молекул.

В этом случае (1.9) может быть записано как

$$S_0 = \frac{Q^\Phi}{n_0}. \quad (1.11)$$

Плотность потока молекул I определяется из выражения:

$$I = \frac{Q^\Phi}{A}, \text{ мол.} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

где A — площадь, на которую попадает поток Q^Φ .

1.3.3. Проводимость элементов тракта

При движении молекул газа вдоль неподвижного тракта возникает внутреннее трение (вязкостные явления) и сила трения, препятствующая движению молекул. Такой подход, без излишних подробностей описывающий процесс движения молекул вдоль тракта системы, позволяет объяснить наличие конечной проводимости элементов тракта, определяющей величину потока газа при известном перепаде молекулярных концентраций на концах тракта:

$$Q^\Phi = C(n_1 - n_2),$$

где C — проводимость тракта, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; n_1, n_2 — молекулярные концентрации на входе и выходе тракта соответственно.

Поток молекул на входе, внутри и на конце тракта одинаков, т. е. можно записать:

$$Q^\Phi = S_1 n_1 = C(n_1 - n_0) = S_0 n_0, \quad (1.12)$$

где S_1 — быстрота (скорость) откачки на входе тракта, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

n_0 — молекулярная концентрация на выходе тракта и входе насоса, подсоединенного к выходу тракта и имеющего быстроту действия $S_0, \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Из (1.12) следует неприятный вывод, что при постоянной проводимости C и любой скорости действия насоса максимально достижимая скорость откачки камеры, подсоединенной ко входу тракта, не превышает величины C :

$$S = \frac{C}{1 + C/S_0}. \quad (1.13)$$

Следовательно, полностью использовать возможности насоса можно только в том случае, если он непосредственно размещен в камере.

1.3.4. Откачка системы

Задачей откачки камеры конечного размера является снижение количества молекул газов, находящихся в ней. Естественно желание обеспечить откачку до предельного вакуума («предельного давления» или минимального количества молекул). Процесс откачки всегда можно разделить на два этапа: первый — откачка основного количества молекул с помощью насоса предварительного разрежения (форвакуумная откачка); второй — удаление паров материалов, десорбированных со стенок системы молекул, откачка молекул, проникающих в систему извне через малые отверстия (течи) и выделяющихся из материалов, обращенных в вакуум.

Уравнение откачки можно записать в следующем виде:

$$\frac{dN}{dt} = Q_{\text{вх}}^\Phi - Q_{\text{вых}}^\Phi, \quad (1.14)$$

где $Q_{\text{вх}}^\Phi$ — поток молекул, поступающих по различным причинам в камеру; $Q_{\text{вых}}^\Phi$ — поток молекул, откачиваемых насосом, $Q_{\text{вых}}^\Phi = \frac{NS}{V}$:

$$\frac{dN}{dt} = Q_{\text{вх}}^\Phi - \frac{NS}{V}. \quad (1.15)$$

Предполагая $Q_{\text{вх}}^\Phi$ постоянным и интегрируя выражение (1.14) по времени, получаем:

$$N(t) = \frac{Q_{\text{вх}}^\Phi V}{S} + \left(N_0 - \frac{Q_{\text{вх}}^\Phi V}{S} \right) \exp\left(-\frac{S}{V}t\right), \quad (1.15)$$

где N_0 — начальное количество молекул в системе.

Следовательно, в процессе откачки количество молекул уменьшается по экспоненциальному закону с постоянной времени

τ , равной V/S , и при $t \rightarrow \infty$ минимальное количество молекул в камере составляет:

$$N_{\text{пред}} = Q_{\text{вх}}^{\Phi} \tau = Q_{\text{вх}}^{\Phi} \frac{V}{S}, \quad \text{мол.} \quad (1.16)$$

Постоянная времени τ характеризует инерционность откачиваемой системы.

На первой стадии откачки входной поток обычно ничтожно мал по сравнению с выходным, и выражение (1.15) принимает вид:

$$N(t) \cong N_0 \exp(-t/\tau). \quad (1.17)$$

Откуда время откачки t_1 до состояния с количеством молекул N_1 равно

$$t_1 = \frac{V}{S} \ln\left(\frac{N_0}{N_1}\right),$$

где N_0 — количество молекул, соответствующее атмосферному давлению $N_0 = 2,7 \cdot 10^{25} V$, где V — объем вакуумной системы, м^3 .

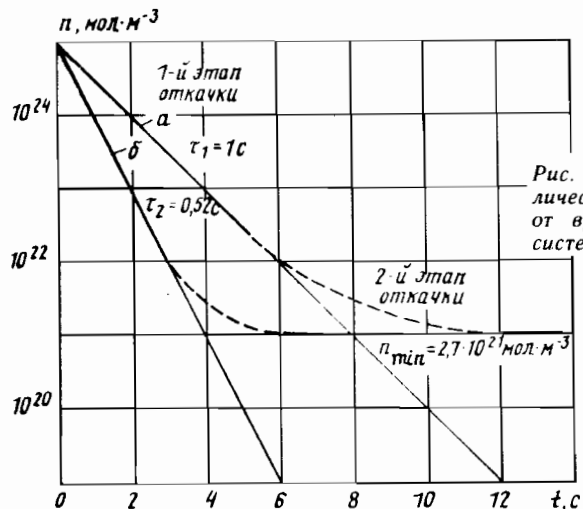


Рис. 1.3. Зависимости количества остаточного газа от времени при откачке системы («кривые откачки»)

На рис. 1.3 представлены «кривые откачки», рассчитанные для камер объемом 1 м^3 (кривая «а») и $0,52 \text{ м}^3$ (кривая «б») при быстроте откачки $1 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и начальном количестве молекул $10^{25} \text{ мол} \cdot \text{м}^{-3}$. Необходимо заметить, что зависимость давления (или молекулярной концентрации) от времени дана в полулогарифмических координатах, что связано со значительным (на 5—

15 порядков) изменением измеряемых величин. Кроме того, необходимо помнить, что «0» давления (или молекулярной концентрации) практически недостижим, следовательно, не имеет смысла нулевая точка на оси ординат.

На втором этапе откачки обычно включают «следующий» (высоковакуумный) насос, начальное давление для которого близко к 10 Па ($n = 2,7 \cdot 10^{21} \text{ мол} \cdot \text{м}^{-3}$). Величина минимально достижимого количества молекул в системе (предельного давления) всегда определяется выражением, аналогичным выражению (1.16):

$$N_{\text{пред}} = \frac{V \Sigma Q_{\text{вх}}^{\Phi}}{\Sigma S(n_{\text{min}})}, \quad (1.18)$$

где $\Sigma Q_{\text{вх}}^{\Phi}$ — суммарный поток всех молекул, поступающих в вакуумную систему; ΣS — суммарная скорость откачки системы, например, в случае использования нескольких параллельно включенных насосов; n_{min} — минимально достижимая в системе молекулярная концентрация; $S(n_{\text{min}})$ — величина скорости откачки насоса при данных параметрах вакуума, обычно определяется по рабочей характеристике насоса для его рабочего диапазона давлений (количества молекул, концентраций).

Для случая, представленного на рис. 1.3, величина входящего потока равна $2,7 \cdot 10^{21} \text{ мол} \cdot \text{с}^{-1}$ (для обеих кривых).

1.3.5. Измерение параметров вакуума

В высоком вакууме единственным параметром, который возможно измерить, является молекулярная концентрация (см. п. 1.2.3). Именно ее и измеряют все манометры (за исключением жидкостных и деформационных) и измерители парциальных «давлений» — масс-спектрометры.

Измерение уменьшения количества молекул в камере как прямого результата ее откачки для современных вакуумных систем, характеризующихся наличием молекулярных потоков локализованных источников газа и средств откачки, приводящих к существенно неизотропному распределению молекул внутри системы, не нужно!

Что касается параметров и характеристик вакуума, традиционно выражаемых в единицах давления — паскалях, то, видимо, это дело времени, так как их легко записать в любых терминах без изменения физического существа. Например:

1) поток газа:

$$Q^{\Phi} = \frac{dN}{dt} \quad \text{или} \quad Q^{\Phi} = n \frac{dV}{dt} \quad \text{при } n = \text{const},$$

5. Интерпретация закона сохранения энергии в первом начале термодинамики, из которого следует, что для изменения внутренней энергии газа к нему необходимо подвести тепло и (или) совершить над ним работу:

$$dE = \delta Q + \delta W,$$

где dE — изменение внутренней энергии газа; δQ и δW — количества теплоты и работы соответственно.

6. Введены понятия для термодинамических процессов, т.е. процессов, в результате которых изменяются термодинамические параметры: обратимые и необратимые, изолированные и открытые, равновесные и неравновесные. Доказано, что реальные процессы, существующие в технике, всегда необратимы и открыты.

7. Введена функция состояния термодинамической системы — энтропия, объясняющая стремление термодинамической системы к равновесию и достижению максимальной энтропии, т.е. к состоянию с максимальной вероятностью (второе начало термодинамики). Исходя из этого, объясняются явления переноса в газах. Рассчитаны энтропии для газов. Например, энтропия при нормальных условиях равна $192 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

8. Рассмотрена связь изменения энтропии ΔS с температурой T и подводимой к системе теплотой δQ : $dS = \frac{\delta Q}{T}$. Для необратимых процессов $T dS > \delta Q$, так как часть подводимого тепла теряется и не превращается ни в работу, ни во внутреннюю энергию газа. Проведен анализ термодинамических процессов в системе координат «температура — энтропия», поведение систем рассматривается на $T\Delta S$ — диаграмме. Доказано, что при расширении газа в пустоту его энтропия возрастает, а температура снижается (эффект Джоуля — Томсона). При протекании обратимого процесса в системе, отдающей теплоту внешней среде (системе), энтропия может убывать.

9. Третье начало термодинамики (теорема Нернста) утверждает, что энтропия любого тела стремится к нулю при стремлении к нулю температуры, и невозможен такой процесс, в результате которого тело может быть охлаждено до температуры абсолютного нуля.

10. Исследованы процессы фазовых переходов систем, например: конденсация (сжижение), испарение и сублимация, поведение насыщенных паров веществ и образование адсорбционных слоев.

2.1.2. Термодинамические процессы в вакуумной технике

Термодинамические процессы в вакуумной технике можно разделить на две группы: 1) процессы, происходящие в газе при его разрежении путем откачки, 2) процессы, происходящие с ме-

ханизмами, осуществляющими или способствующими откачке газа.

Газ в вакуумной системе, откачиваемой средствами откачки (насосами), по крайней мере, дважды находится в состояниях равновесия, для которых можно записать уравнения состояния идеального газа. Причем все газы при малых давлениях и не очень низких температурах можно считать идеальными. В первом случае равновесие существует до начала работы насоса, а во втором — при достижении предельного разрежения.

При кратковременном нарушении состояния равновесия газа по концентрациям молекул, температурам или скоростям возникают явления нестационарного переноса в газе, основой которых является диффузия молекул, приводящая к релаксации системы после ее возмущения и к установлению равновесия в соответствии со вторым началом термодинамики. В случае возникновения постоянного источника нарушения равновесия, например при введении в вакуумную камеру источника газа, нагретой нити, вращающегося тела, в системе устанавливаются молекулярные потоки, осуществляющие явления стационарного переноса.

В процессе откачки из вакуумной системы удаляются молекулы газов, т.е. уменьшается энтропия остаточного газа, определяемая формулой Больцмана как $\Delta S = k \ln \Omega$, где k — постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$); Ω — статистический вес макросистемы ($\Omega = 10^N$, N — число молекул); $\Delta S = 2,3 k N$.

Уменьшение энтропии (теплоты) газа происходит за счет совершения над газом внешней работы, затрачиваемой средствами откачки или при передаче газу дополнительной теплоты (положительной или отрицательной). Эти два признака являются основными при классификации видов насосов: насосы «объемного» действия или «забирающие» молекулы из вакуумной системы и перемещающие их из вакуума в атмосферу; насосы «поверхностного» действия или электрофизические, работающие по принципу «липкой бумаги для мух», т.е. производящие физико-химическое связывание свободных молекул при взаимодействии свободных молекул с пленками и слоями, напыленными на отдельные участки внутренней поверхности насосов (или вакуумных камер). В первом случае работа затрачивается на сжатие захваченного газа до состояния, при котором он может быть введен в зону с давлением большим (вплоть до атмосферного), чем в вакуумной камере. Для насосов второго типа рассматриваются сорбционные явления, связанные с потерей молекулами газа тепла при взаимодействии с сорбентом, обладающим определенной теплотой сорбции (адсорбционным потенциалом), или энергией связи, определяющей время пребывания молекул на поверхности в связанном состоянии.

В обоих случаях возможен энергетический расчет средств откачки в зависимости от требуемых параметров вакуума. Очевидно, что при работе вакуумных систем с низким вакуумом энергетические затраты будут больше, чем при работе с высоким, так как количество работы (энергии), которую необходимо затратить для откачки, пропорционально количеству газа (теплоты), которое удаляется из вакуумной системы или переводится из свободного связанного состояния.

На рис. 2.1, а представлена pV -диаграмма цикла откачки механического форвакуумного насоса. При давлении p происходит «отбор» газа в расширяющийся объем насоса (линия 1—2), далее происходит адиабатическое сжатие газа (почти изотермическое) (линия 2—3), затем выброс газа при давлении p_A путем сжатия его насосом (линия 3—4), после чего цикл вновь повторяется.

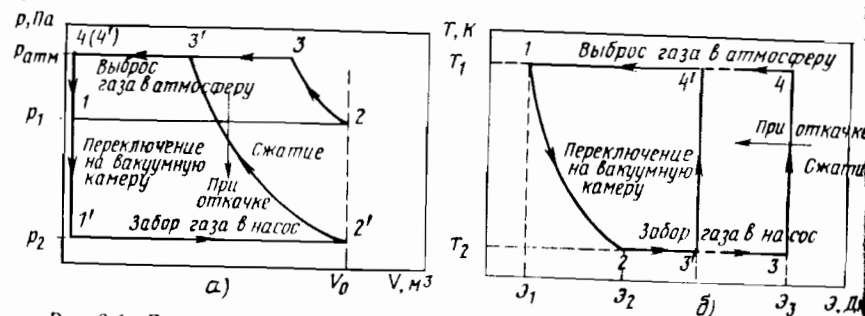


Рис. 2.1. Диаграммы цикла откачки механического форвакуумного насоса

На $T\Delta S$ -диаграмме того же цикла (рис. 2.1, б) процесс отбора газа изображен линией 1—2, температура в насосе понижается до температуры газа в вакуумной системе, энтропия растет, так как увеличивается объем газа; изотерма 2—3 изображает процесс дальнейшего расширения отобранного газа в насосе, энтропия газа продолжает расти; затем начинается почти адиабатическое сжатие (линия 3—4) — энтропия не изменяется, температура растет и, наконец, происходит выброс газа в атмосферу (изотерма 4—1), энтропия при этом резко уменьшается, так как объем газа и его количество стремится к нулю. Неравенство энтропии ΔS нулю означает, что в насосе существует «паразитный» объем, газ из которого снова поступает в вакуумную систему.

Площадь между кривой 1—2—3 и осью абсцисс численно выражает количество теплоты, отобранное у газа при одном цикле откачки, что соответствует количеству откаченных молекул. Площадь фигуры 1—2—3—4 численно равна максимальной работе, затраченной на этот цикл.

Для последующего цикла откачки точки на диаграммах имеют индекс ('). Видно, что снижение количества откачиваемого газа приводит к уменьшению энергетических затрат и количества удаляемой теплоты.

Очевидно, что анализ механических насосов с помощью $T\Delta S$ -диаграмм позволяет проводить сравнение их эффективности аналогично тому, как это делается для циклов Карно реальных тепловых машин, например в холодильных машинах, где эффективность или холодильный коэффициент есть отношение количества теплоты, отобранной у газа, к величине затраченной для этого работы.

Газ может быть превращен в жидкое состояние, если его температура ниже критической, т. е. температура, при которой не различимы газообразная и жидкостная фазы состояния веществ (фаза состояния является дополнительным термодинамическим параметром).

Для вакуумной техники проблема сжижения газов интересна с двух сторон. Во-первых, аналогично криогенной технике вакуумная техника нуждается в хладагентах. Широко используются в вакуумной технике охлаждаемые жидким азотом (77 К) стенки вакуумных камер, экраны, ловушки, сорбенты (цеолиты, угли). Для криосорбционной откачки используются криопанели, охлаждаемые до температуры жидкого гелия (4 К) или жидкого водорода (20 К).

При снижении температуры газа до 4 К происходит его конденсация, снижается давление, газ переходит в двухфазное «состояние жидкость—пар», что позволяет снижать количество молекул, находящихся в свободном состоянии в вакуумной камере.

Для сжижения газов с низкой критической температурой (азот, неон, водород, гелий) используется явление Джоуля—Томсона, согласно которому газ при расширении в пустоту охлаждается. Явление Джоуля—Томсона для ожижения газов реализуется в каскадном методе, заключающемся в последовательном сжижении нескольких газов с различными все понижающимися температурами кипения. Жидкость, обладающая низкой температурой кипения, испаряется под пониженным давлением, чем достигается еще большее понижение ее температуры. Повышая давление, этот газ можно сконденсировать. Испаряя его затем под пониженным давлением, можно еще понизить его температуру, и таким путем сконденсировать газ в смеси с более низкой температурой конденсации. Последовательность каскадов ожижения при этом следующая: аммиак, этилен, кислород, азот.

Каскадный метод впервые был реализован в машине Линде (1895 г.), где атмосферный воздух сжимается первым компрессо-

ром до давления $20 \cdot 10^5$ Па, во втором компрессоре до $220 \cdot 10^5$ Па. При этом сжатый воздух охлаждается в змеевике с двойными стенками проточной водой до температуры $10\text{--}15^\circ\text{C}$. После этого воздух выходит в резервуар с давлением $20 \cdot 10^5$ Па и расширяется. При расширении он охлаждается в соответствии с явлением Джоуля—Томсона на 50°C . Охлажденный воздух по наружному каналу змеевика отводится к компрессору, охлаждая при этом следующие порции газа, идущие по внутреннему каналу. Следовательно, расширение этих порций газа будет происходить при все более низких температурах пока при температуре около 90 K и при давлении 20 атм не начнется конденсация воздуха.

$T\text{--}S$ -диаграмма рабочего цикла машины Линде изображена на рис. 2.2. В машине используется внутренняя энергия газа, которая совершает работу против сил межмолекулярного сцепления — так называемый метод дросселирования. Процесс охлаждения изображен линией 1—2, расширения — 2—3, после расширения часть газа конденсируется (линия 3—4), часть же вместе с некоторым количеством вновь испарившейся жидкости (линия 3—5) нагревается в змеевике при охлаждении идущих по внутреннему его каналу масс воздуха (линия 5—6) и затем в компрессоре сжимается до начального состояния (линия 6—1).

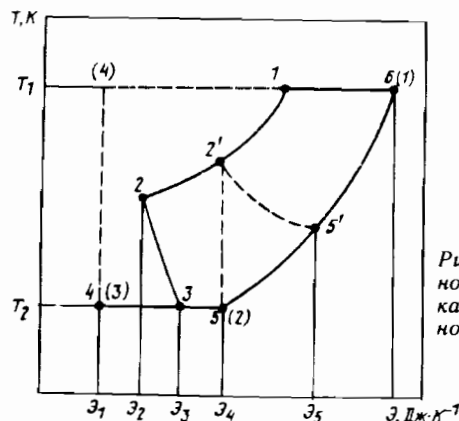


Рис. 2.2. Рабочий цикл холодильной машины Линде (цифры в скобках показывают диаграмму идеального процесса сжижения газа)

Возможен и другой метод охлаждения газа — при совершении им внешней работы расширения. Основанные на этом принципе установки называются детандерами. Например, в детандере П. Л. Капицы (1934 г.) газ, сжатый до давления $(6\text{--}7) \cdot 10^5$ Па, поступает в турбину, расширяется до давления $1,3 \cdot 10^5$ Па, вращает турбину и совершает внешнюю работу, сильно охлаждаясь и, наконец, конденсируется. $T\text{--}S$ -диаграмма детандера очень похожа на диаграмму машины Линде. В отличие от нее в детандере возможен прямой переход 2—5 за счет снижения темпера-

туры части газа при совершении внешней работы при вращении турбины. Другая часть газа, не поступающая на турбину, проходит цикл, аналогичный машине Линде.

Современные криогенные насосы, позволяющие снижать давление насыщенных паров основных газов, составляющих воздух, до давлений ниже 10^{-6} Па, работают при температуре рабочей ступени 20 К. Для создания такой температуры разработаны небольшие гелиевые криогенераторы, обеспечивающие автономность и удобство крионасосов в эксплуатации. Холодильные машины этих насосов работают по замкнутым циклам либо Стирлинга, либо Гиффорда—Макмахона, либо Сольвея [6], в которых внешняя механическая работа компрессоров превращается в пониженную температуру газа. Наиболее популярен в вакуумной технике цикл Макмахона, так как компрессор в нем отделен от охлаждаемых ступеней и его вибрации не передаются вакуумной системе.

2.1.3. Термодинамическая модель вакуума

1. Газы, откачиваемые из вакуумной системы при давлениях ниже атмосферного и температурах, близких к комнатной, могут считаться идеальными. Отличия от идеального газа, характерные для криогенных насосов, относятся, в первую очередь, к насосам и принципам откачки, а не к процессу откачки вакуумной системы и поведению газа в ней.

2. Уравнение состояния идеального газа и газовые законы описывают остаточный газ в вакуумированной системе, если он находится в состоянии равновесия или квазиравновесия, т. е. равновесия, определяемого балансом сил, потоков и т. д. При этом в вакуумной технике объем газа обычно остается постоянным, так как вакуумные системы обычно имеют фиксированные размеры и конфигурации. Температура газа в большинстве случаев равна комнатной (за исключением систем с нагревом или охлаждением). Давление газа, как следует из п. 1.2.3, неудобно для характеристики вакуума, хотя содержит в себе информацию о скоростях молекул, направленных перпендикулярно к поверхности и пропорциональных $\sqrt{T}$.

3. Основным объектом внимания в вакуумной технике является количество молекул N (не термодинамический параметр), легко вычисляемое, если известно общее количество теплоты, содержащейся в остаточном газе: величина энтропии $\mathcal{E}$ или количество газа pV :

$$N = \frac{\mathcal{E}}{2,3 k}, \text{ мол.} \cdot \text{моль}^{-1} \quad \text{или} \quad N = \frac{pV}{kT}, \text{ мол.} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Таким образом, описание процесса откачки вакуумных систем можно свести к описанию процесса отбора теплоты у остаточного газа. При этом очевидно, что количество отобранной теплоты определяет величину работы, производимой внешними механизмами — средствами откачки. По мере улучшения вакуума количество отбираемой теплоты в современных вакуумных системах снижается, что снижает эффективность их работы.

4. При уменьшении количества молекул в вакуумной системе снижается и энтропия остаточного газа, так как уменьшается статистический вес (или число возможных состояний) термодинамической системы.

5. Явления переноса в вакуумных системах реализуют второе начало термодинамики, т.е. стремление термодинамических систем к достижению равновесия и максимума энтропии.

Реакция систем на импульсные или стационарные изменения одного из термодинамических параметров сводится к тому, чтобы ликвидировать эти изменения. При этом в остаточном газе возникают направленные потоки молекул, осуществляющие выравнивание возникших градиентов концентраций, температур, скоростей молекул. Естественно, эффективность реакции системы зависит от двух ее параметров: длины свободного пробега молекул и их общего количества, т.е. потенциального количества переносчиков. Поэтому коэффициенты явлений переноса (диффузии, теплопроводности и вязкости) зависят от степени вакуума, что является основой для их использования при измерении вакуума [9].

6. При откачке или возникновении переноса в вакуумных системах формируются направленные потоки молекул. В процессе откачки остаточный газ находится в нестационарном состоянии, при достижении предельного разрежения — в квазистационарном.

Энтропия газа в откачиваемых вакуумных системах с молекулярными потоками всегда меньше, чем энтропия изолированных систем при тех же усредненных параметрах вакуума. При отключении насосов энтропия остаточного газа неизбежно возрастает.

7. В вакуумных системах с наличием в них криогенных температур, криосистемы поглощают теплоту остаточного газа, что может приводить к фазовым переходам газов (например, к их конденсации) и, следовательно, к откачке вакуумной системы и понижению энтропии остаточного газа.

8. Энтропия остаточного газа характеризует состояние вакуума в системе. Можно говорить об абсолютном вакууме, т.е. о состоянии остаточного газа, при котором энтропия его стремится к нулю, что достижимо при стремлении к нулю температуры или количества молекул. В этом случае низковакуумные системы

являются высокоэнтропийными, высоковакуумные — низкоэнтропийными и т.д.

9. Термодинамический подход позволяет проводить расчет однородных равновесных вакуумных систем, в результате которого можно получить три их важных параметра: 1) предельное количество молекул остаточного газа; 2) время откачки; 3) энергозатраты, необходимые для откачки.

10. Получение вакуума для проведения любого технологического (или физического) процесса необходимо для того, чтобы устранить термодинамическую систему (остаточный газ), способную обмениваться энергией с этим процессом, т.е. нарушать его нормальное течение.

11. Термодинамическое описание вакуумной системы, в которой последовательно обеспечиваются разные стадии вакуума, приведено на рис. 2.3 (под введением в систему внешней теплоты Q понимается не только возможный нагрев остаточного газа, но и возможное введение извне дополнительного количества газа или придания молекулам дополнительного количества движения).

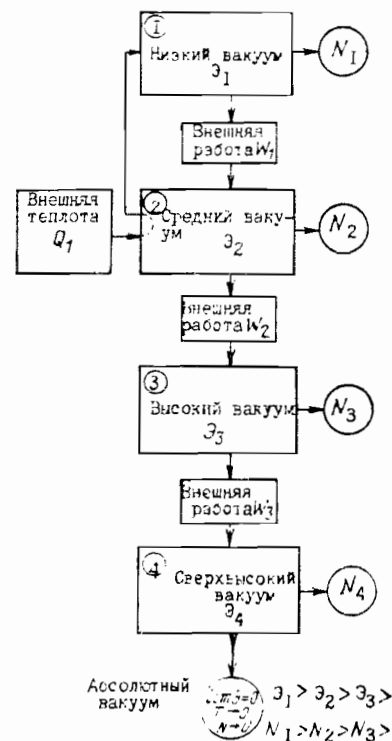


Рис. 2.3. Термодинамическая модель вакуумной системы

2.2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ВАКУУМ

2.2.1. Функция распределения молекул в вакуумной системе

Для равновесных систем термодинамика позволяет вычислить усредненные параметры получаемого вакуума. Во многих практических случаях эти параметры для неравновесных систем могут быть рассчитаны тем же путем, т.е. с помощью уравнения состояния газа, которое обычно записывается в виде: $pV = NkT$ или $p = nkT$, где n — молекулярная концентрация газа, одинаковая по всему объему V вакуумной системы.

В этом случае считают, что величина давления p и молекулярная концентрация n адекватно характеризуют состояние вакуума. Г. Л. Саксаганский [3] впервые убедительно доказал, что адекватность этих параметров для вакуумных систем, в которых существуют молекулярные потоки, нарушается и, следовательно, применение термодинамических методов расчета параметров вакуума может привести к большим погрешностям.

Причин возникновения молекулярных потоков в вакуумных системах много (см. п. 2.3), но главной из них является работающий насос. Таким образом, все вакуумные системы, структура которых совпадает с изображенной на рис. 1.2, не могут анализироваться традиционными методами осреднения параметров и нуждаются в решении системы уравнений, описывающих движение каждой молекулы остаточного газа:

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \vec{F}_i, \quad (2.1)$$

где m_i — масса i -й молекулы; $\vec{r}_i$ — радиус-вектор i -й молекулы (ее координата); $\vec{F}_i$ — внешняя сила, действующая на i -ю молекулу, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ (N — число молекул в системе).

Из (2.1) видно, что общий подход, используемый в молекулярно-кинетической теории газов и основанный на рассмотрении движения отдельных молекул, сохраняется, но при этом дополнительно молекула характеризуется двумя параметрами: координатой и вектором скорости в момент рассмотрения.

Для решения системы (2.1) необходимо знать начальные координаты молекул, начальные скорости и принять какую-либо модель взаимодействия молекул с внешней средой для определения сил, действующих на молекулу в зоне A (рис. 2.4). Такой моделью, справедливой для вакуумной техники, является электростатическое притягивание или отталкивание диполей

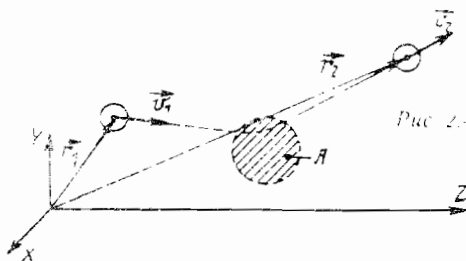


Рис. 2.4 Движение молекулы в вакуумной системе

Для этой модели можно определить силу

$$\vec{F} = -q \left(\frac{\vec{r}}{r} \right) \frac{d\varphi(r)}{dr}, \quad (2.2)$$

где $\varphi(r)$ — потенциал взаимодействия, определяемый для

конкретного случая парных взаимодействий молекул с молекулами или поверхностями; q — заряд диполя.

Практическая ценность (2.1) нулевая, так как даже в высоком вакууме придется записывать более 10^{10} уравнений, что, естественно, нереально, да и не нужно.

В математике для анализа большого числа отдельных событий используются методы статистики, которые позволяют, не рассматривая отдельные события, на основе вероятностного прогнозирования анализировать возникающие новые закономерности в поведении совокупности отдельных событий, т. е. усредняется действие отдельных событий, например, за определенное время или в определенной зоне пространства, в котором происходят события.

Объем пространства вакуумной системы, по которому проводится осреднение характеристик отдельных молекул, должен быть достаточно мал, чтобы в его пределах действительно существовала изотропность распределения молекул и не изменялись внешние силы, действующие на молекулы. В соответствии с работой [3] объем должен быть таков, чтобы число молекул в нем было более 100. Выбор величины объема, с одной стороны, определяется степенью вакуума, но, с другой стороны, он может быть определен и конкретными требованиями к точности определения параметров вакуума в заданных областях вакуумной системы.

Функция распределения вероятности P того, что молекулы попадут в выделенный нами объем и будут обладать при этом определенной скоростью, лежащей в интервале от $\vec{v}$ до $\vec{v} + d\vec{v}$, может быть записана [10] в виде:

$$dP = f(dV, \vec{v}) dV d\vec{v}.$$

Умножив dP на полное число молекул в системе, получим количество молекул dN , находящихся в объеме dV и имеющих скорости в указанном диапазоне:

$$dN = N dP = N f(dV, \vec{v}) dV d\vec{v}. \quad (2.3)$$

Интеграл от dN , взятый по всему объему и интервалу возможных скоростей, должен равняться полному числу молекул в системе N :

$$N = \int dN = \int N f(dV, \vec{v}) dV d\vec{v} = N.$$

В молекулярно-кинетической теории газов выражение (2.3) записывают в виде [3]

$$f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t) = \frac{dN}{dx dy dz dv_x dv_y dv_z dt},$$

где t — текущее время; x, y, z, v_x, v_y, v_z — компоненты векторов $\vec{r}$ и $\vec{v}$;

или

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t) = \frac{dN}{d\vec{r} d\vec{v} dt} = \frac{dn}{d\vec{v} dt} \quad (2)$$

Из (2.4) следует, что физический смысл функции распределения состоит в том, что она имеет смысл концентрации молекул в малой области вокруг точки $\vec{r}$ с координатами x, y, z , обладающих скоростями в указанном интервале, т. е.

$$n(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} \quad (2)$$

Отличие определяемой в (2.5) молекулярной концентрации от определенной в п. 1.2.3 состоит в том, что, во-первых, это «кальная» концентрация, т. е. концентрация молекул в определенной точке (микрообъеме) вакуумной системы, и, во-вторых, определяется в некоторый момент времени t .

2.2.2. Кинетическое уравнение Больцмана

Поскольку в вакуумной технике все системы являются системами с потоками, то использованное в пп. 1.2.1 и 1.2.2 понятие «средняя скорость молекул» нуждается в уточнении. Поток молекул обычно называют совокупность молекул, движущихся по близким траекториям, следовательно, можно говорить о переносе молекул и о средней скорости переноса, направленной в направлении переноса. Средняя скорость переноса $\langle \vec{v} \rangle$ определяется следующим выражением:

$$\langle \vec{v}(\vec{r}, t) \rangle = \frac{1}{n} \int \vec{v} f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} \quad (2)$$

Возвращаясь к обсуждению адекватности понятий «давление» и «молекулярная концентрация», следует обратить внимание на то, что в выражение для определения давления (1.3) входила скорость, но считается, что у этой скорости нет выделенного направления. Если это не так, то следует говорить о давлении в выделенном направлении (давление приобретает тензорный характер).

Полная скорость молекулы может быть определена в результате векторного сложения тепловой (собственной) скорости молекулы $\vec{v}_1$ и средней скорости переноса $\langle \vec{v} \rangle$:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \langle \vec{v} \rangle$$

В равновесном газе $\langle \vec{v} \rangle$ равна нулю, так как в нем нет потоков и нет переноса молекул в выбранном направлении. Функция распределения молекул по координатам и скоростям превращается в распределение Максвелла по скоростям, не зависящее от координат, ни от времени [10]. Средняя арифметическая

тепловая скорость молекул, обычно принимаемая во внимание при анализе равновесного газа, вычисляется из выражения

$$\vec{v}_T = \int_0^\infty \vec{v} f(\vec{v}) d\vec{v} / \int_0^\infty f(\vec{v}) d\vec{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2}$$

(например, для молекул азота $|\vec{v}_T| = 470 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при температуре 293 К).

При анализе молекулярных потоков в вакуумных системах необходимо проследить за поведением выделенной группы молекул во времени при условии, что она подтверждена воздействием внешней силы $\vec{F}(\vec{r}, t)$. Если анализ вести на языке функций распределения, можно говорить об ее изменении:

$$\Delta f = f_1 - f_2,$$

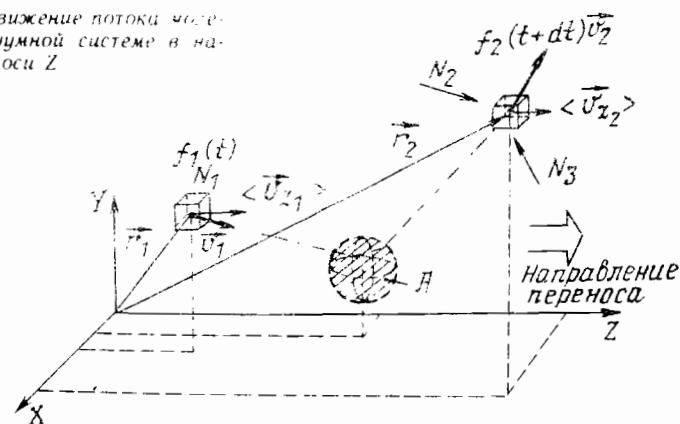
где

$$f_1 = f(\vec{v} + d\vec{v}, \vec{r} + d\vec{r}, t + dt); \quad f_2 = f(\vec{r}, \vec{v}, t),$$

dt — промежуток времени, за который произошло изменение функции распределения; $d\vec{r} = \vec{v} dt$; $d\vec{v} = \frac{\vec{F}}{m} dt$; m — масса молекул.

Изменение функции распределения происходит за счет взаимодействия молекул с внешней средой, причем не только силового, например: в выделенный элемент объема dV_2 могут попадать молекулы из произвольных частей вакуумной системы, часть молекул из объема dV_1 могут вообще не попадать в объем dV_2 , а могут попадать без взаимодействия с зоной А. На рис. 2.5 изображен процесс формирования «новой» функции распределения

Рис. 2.5. Движение потока молекул в вакуумной системе в направлении оси Z



в течение интервала времени dt . В случае специальной организации взаимодействия молекул с внешней средой, например с насосом, можно получить направленный поток молекул в заданном направлении.

Число частиц, появляющихся в данном состоянии и с данной скоростью в окрестности рассматриваемой точки в единице объема в единицу времени, называется интегралом столкновений $I_{ст}$ [20]:

$$I_{ст} = \frac{df}{dt}.$$

Кинетическое уравнение Больцмана имеет вид:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \nabla f + \frac{F}{m} \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = I_{ст}. \quad (2.7)$$

Функция распределения является решением уравнения (2.7) и может быть использована для вычисления параметров вакуума в вакуумных системах с молекулярными потоками.

2.3. Движение молекул и молекулярные потоки

Как было отмечено выше, основной причиной направленного перемещения молекул в вакуумной системе является работа насоса, в результате которого снижается молекулярная концентрация на его входе (насос как бы является «стоком» для молекул) и возникает перепад концентраций во всех направлениях при удалении от входа насоса. Перепад концентраций (градиент) приводит к возникновению стационарной диффузии молекул в направлении, противоположном градиенту. Плотность потока молекул, например в направлении, совпадающем с осью Z , может быть записана следующим образом:

$$n \langle v_z \rangle = -D \frac{\partial n}{\partial z},$$

где $\langle v_z \rangle$ — средняя скорость переноса в направлении оси Z .

Из (1.12) следует, что

$$n_1 = n_0 + \Delta n = n_0 + \frac{Q^{\Phi}}{C}, \quad (2.8)$$

где C — проводимость в направлении переноса.

Ясно, что величина перепада молекулярной концентрации может определяться не только насосом, но и потоком газовой нагрузки Q^{Φ} , который может быть стационарным и нестационарным, локализованным и распределенным, зависящим от величины молекулярной концентрации. В последнем случае вакуумные системы называются нелинейными. В перечисленных случаях анализ движения молекул несколько усложняется, но принцип остается неизменным.

В случае существования в вакуумной системе температурного поля, т.е. при наличии участков с отличающимися температурами, в вакуумной системе происходит явление перемещения молекул из более нагретых зон в менее нагретые, называемое тепловой эффузией [18], которое приводит к установлению в этих зонах концентраций, обратно пропорциональных корням квадратным из соответствующих температур.

Рассмотренные случаи вынужденного движения молекул характерны для высоковакуумных систем при отсутствии внешней силы и равенства интеграла столкновений нулю. Функция распределения молекул в пространствах координат и скоростей может быть записана следующим образом:

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t_0) = f[\vec{r} + \vec{v}(t - t_0), \vec{v}, t], \quad (2.9)$$

где t_0 — начальный момент времени.

Из (2.9) следует, что функция распределения постоянна вдоль траектории молекул.

Чаше всего к изменению функции распределения приводит взаимодействие молекул с внутренней поверхностью элементов вакуумной системы. Известно, что в высоком вакууме длина свободного пути молекул значительно превышает геометрические размеры вакуумной системы и, следовательно, молекулы движутся по отрезкам прямых, имеющих начала и концы на стенках системы. При взаимодействии молекулы и стенки могут происходить три явления: 1) часть молекул может сорбироваться (поглощаться) поверхностью; 2) в ответ на «удар» молекулы поверхность может эмиттировать в вакуумную систему дополнительные молекулы, т.е. произойдет массообмен; 3) молекулы могут отразиться от поверхности.

Третье явление самое распространенное, но отражение чаще всего не бывает зеркальным. Взаимодействие падающей на поверхность молекулы и потенциального поля поверхности таково, что отражение носит диффузный характер и пространственное распределение молекул после столкновения описывается «косинусным законом отражения»:

$$dI = I_0 \frac{dA}{\pi} \cos \theta,$$

где dI — единичная плотность отраженного потока; I_0 — плотность падающего потока; dA — единичная площадь поверхности; θ — угол между нормалью к поверхности и вектором скорости отраженной молекулы.

При таком отражении распределение молекул по скоростям описывается распределением Максвелла.

Диффузное отражение молекул от поверхности означает, что существует 50-процентная вероятность того, что молекула, движущаяся слева направо, после взаимодействия начнет двигаться в обратном направлении. Причем изменения в направлении движения молекул зависят от формы и состояния поверхностей, с которыми они взаимодействуют.

Для образования молекулярных потоков недостаточно только направленного движения отдельных молекул, необходимо и определенное их количество. Количество молекул, достаточное для образования потока, — понятие относительное и в конкретном случае определяется в зависимости, во-первых, от степени достигнутого вакуума и, во-вторых, от места источника молекул в приоритетном ряду, который составляется при анализе вакуумной системы, исходя из назначения вакуумной системы.

На рис. 2.6. условно изображены процессы, ведущие к образованию молекулярных потоков (Q). Очевидно, что при определенных условиях каждый из восьми указанных потоков может оказаться наибольшим, и на его фоне какие-то потоки можно и не рассматривать. Обычно при откачке вакуумной системы поток откачки должен преобладать над суммой всех остальных. В этом случае количество молекул в системе будет уменьшаться,

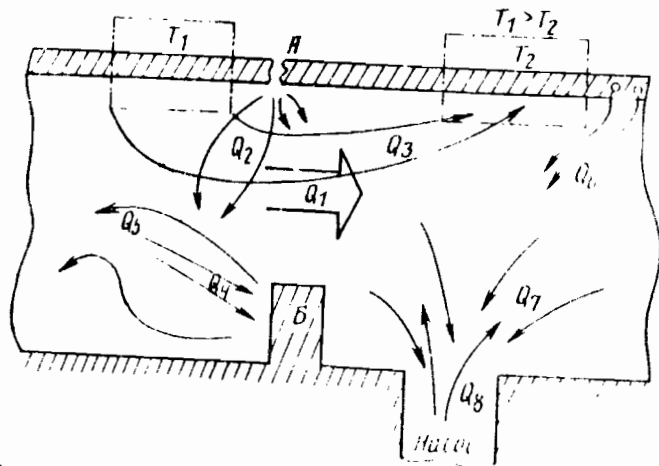


Рис. 2.6. Схема образования направленных потоков молекул и полей молекулярных концентраций:

Q_1 — градиентный поток молекул в трубопроводе; Q_2 — поток натекания газа из атмосферы через течь А; Q_3 — поток тепловой эффузии; Q_4 — часть потока Q_1 , попадающая на выступ Б; Q_5 — часть потока Q_4 , отраженная в обратном направлении; Q_6 — поток газовой выделений из стенки; Q_7 — поток откачки; Q_8 — обратный поток из насоса

а при их равенстве достигается состояние предельного вакуума (см. (1.14), в котором $Q_{\text{вых}}^{\Phi} = Q_7$, а $Q_{\text{вх}}^{\Phi}$ равно сумме остальных семи потоков).

В работе [4] рассмотрен процесс формирования функции распределения молекулярной концентрации газа при движении молекулярного потока в протяженных камерах простой геометрии. Нужно отметить, что наиболее наглядно трехмерная функция распределения молекулярной концентрации может быть представлена ее поперечным (в случае аксиальной симметрии) и продольным профилями, которые представляют собой проекции трехмерной функции пространственного распределения молекул на соответствующие оси.

2.3.1. Продольные профили концентрации остаточного газа

Рассмотрим элементарный участок dx протяженной камеры длиной L , имеющей периметр $B(x)$, с площадью поперечного сечения $A(x)$, внутри которой существует распределенная газовая нагрузка $Q(x)$, не зависящая от молекулярной концентрации газа $n(x)$ (например, установившийся поток газовой выделений из стенок камеры) (рис. 2.7). Камера откачивается насосом с быстротой действия S_0 , установленным в сечении $x=0$.

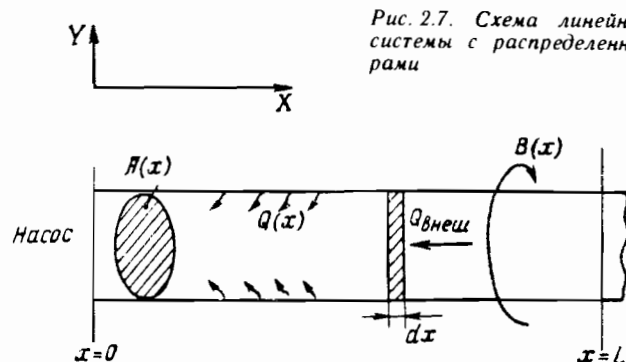


Рис. 2.7. Схема линейной вакуумной системы с распределенными параметрами

Для квазистационарного состояния динамическое равновесие газа, т.е. равновесие по потокам для элементарного объема $dV = A(x)dx$, может быть определено в соответствии с пп. 1.3.2 и 1.3.4 системой уравнений:

$$Q_{\text{вых}}^{\Phi} = n_0 S_0, \quad Q^{\Phi}(x) = n(x) S(x),$$

$$Q_{\text{вх}}^{\Phi}(x) = \int_0^x Q(x) B(x) dx,$$

$$Q_{\text{вх}0}^{\Phi} \Big|_{x=0} = \int_0^L Q(x) B(x) dx, \quad n_0 = \frac{Q_{\text{вх}0}^{\Phi}}{S_0},$$

$$n(x) = n_1 + n_2,$$

где

$$S(x) = \frac{C(x)}{1 + C(x)/S_0}, \quad n_1 = \frac{Q_{\text{вх}}^{\Phi}(x)}{S(x)}, \quad n_2 = \frac{\int_x^L Q(x) B(x) dx}{S(x)}.$$

Величина n_1 определяется конкретными условиями, существующими слева от выбранного участка dx , а величина n_2 — условиями, существующими справа.

Можно записать

$$n(x) = \int_0^x \frac{Q(x) B(x) dx}{S(x)} + \frac{1}{S(x)} \int_x^L Q(x) B(x) dx.$$

После простых преобразований

$$n(x) = \frac{1}{S_0} \int_0^L Q(x) B(x) dx + \int_0^x \frac{Q(x) B(x) dx}{S(x)} + \frac{1}{C(x)} \int_x^L Q(x) B(x) dx, \quad (2.10)$$

$$n(x) - n_0 = \int_0^x \frac{Q(x) B(x) dx}{C(x)} + \frac{1}{C(x)} \int_x^L Q(x) B(x) dx.$$

В большинстве практических случаев периметр протяженной вакуумной камеры не изменяется, а поток газовой нагрузки постоянен по длине. При этих допущениях (2.10) может быть записано:

$$n(x) - n_0 = \frac{1}{LC(L)} Q B \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right), \quad (2.11)$$

т.е. продольное распределение молекулярной концентрации — параболическое.

Для некоторых сочетаний функций $B(x)$ и $Q(x)$ продольные профили концентраций изображены на рис. 2.8:

$$1) B(\xi) = B_0(1 + \xi); \quad Q(\xi) = Q_0(1 - \xi);$$

$$2) B(\xi) = \text{const}; \quad Q(\xi) = \text{const};$$

$$3) B(\xi) = \text{const}; \quad Q(\xi) = Q[1 + \exp(10\xi)].$$

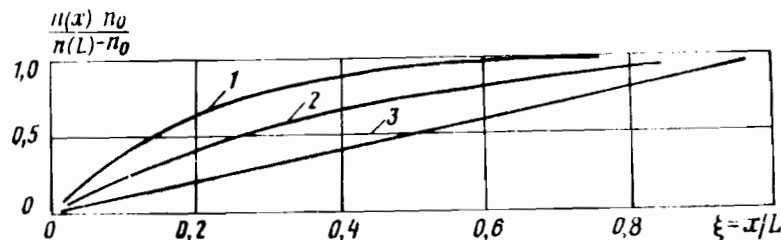


Рис. 2.8. Продольные профили функции распределения молекулярной концентрации в линейной вакуумной системе

2.3.2. Поперечные профили концентрации остаточного газа

Проведенное в предыдущем разделе одномерное рассмотрение формирования пространственного распределения молекулярной концентрации в вакуумной камере не позволяет оценить всей сложности процессов, происходящих при движении молекул вдоль вакуумного тракта, и перейти к трехмерной функции распределения концентрации.

С помощью математических моделей вакуумных систем и численных методов расчета можно решать задачу любой сложности и получать функции распределения концентраций, например, для случаев, подобных изображенному на рис. 2.6, когда поле молекулярных концентраций формируется за счет суперпозиции многих потоков.

Более простым для расчета является случай прохождения первоначально равномерно распределенного по сечению тракта молекулярного потока Q^{Φ} с удельной величиной потока Q_0^{Φ} . Функция пространственного распределения молекул (или концентраций) будет определяться только характером взаимодействия молекул и внутренних поверхностей стенок тракта. На рис. 2.9 в качестве примера даны результаты проведенных расчетов в предположении диффузного характера рассеяния молекул при столкновениях со стенкой, где на рис. 2.9, а изображены схемы элементов вакуумного тракта; на рис. 2.9, б — индикатрисы — двумерные функции распределения потока молекул по углам вылета из элементов, левые индикатрисы получены для потоков, формируемых в результате обратного рассеяния, правые для потоков на выходе элементов; на рис. 2.9, в — соответствующие этим индикатрисам профили молекулярных концентраций в поперечном сечении вакуумных систем, считая, что они подсоединены к входу и выходу элементов тракта и молекулы сохраняют направление начального движения. Для всех рисунков предполагается азимутальная симметрия.

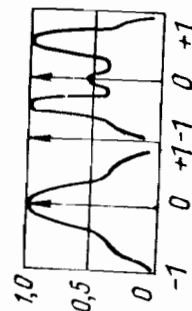
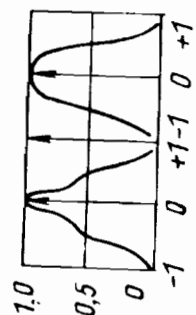
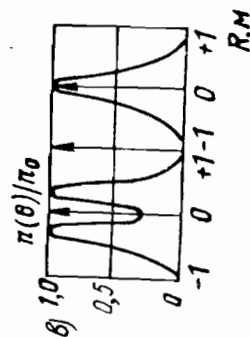
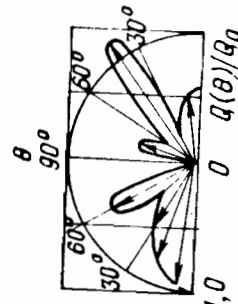
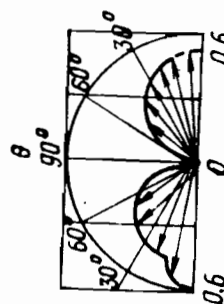
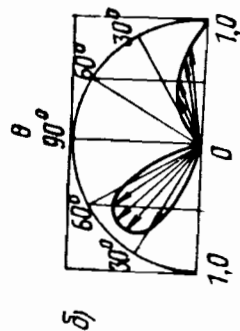
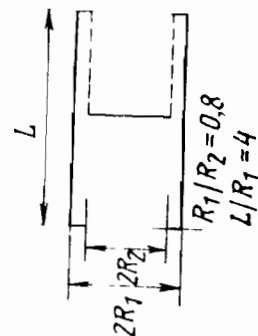
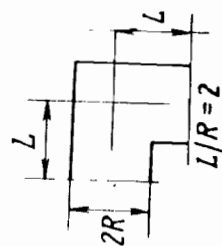
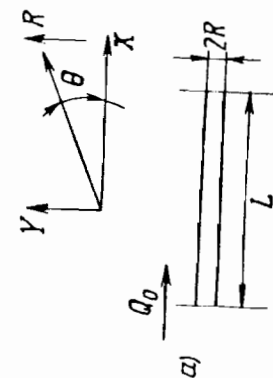


Рис. 2.9. Формирование полей молекулярной концентрации при прохождении потока через элементы вакуумных трактов

Приведенные результаты интересны с двух точек зрения. Во-первых, деформация распределения прямых и обратных потоков, проходящих даже простейшие элементы вакуумного тракта, настолько велика, что необходимо ее учитывать, например, при проведении вакуумного технологического процесса или при установке манометра. Во-вторых, при правильном выборе геометрии элементов вакуумного тракта, возможно формирование сфокусированных молекулярных пучков, что может быть использовано, например, при оптимизации средств откачки.

2.4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

2.4.1. Метод потока в сплошных средах

Основным назначением вакуумных систем является уменьшение количества молекул остаточного газа в рабочей камере. Для этого вакуумная система тем или иным способом должна привести находящиеся в равновесии молекулы в направленное движение, причем направление движения должно соответствовать направлению ко входу насоса или к средству откачки. Следовательно, анализ движения молекул позволяет провести расчет характеристик вакуумной системы и параметров, достигаемых в рабочей камере.

Очевидно, что пользователя вакуумной системы в первую очередь интересует вид «кривой откачки» (см. рис. 1.3), а именно предельно достижимый вакуум и время его получения, т. е. максимально достижимая в системе крутизна наклона «кривой откачки». Поскольку на оси ординат при построении зависимости $n(t)$ откладывается количество молекул остаточного газа для системы с фиксированным объемом, то крутизна наклона определяется величиной потока откачки $\frac{dN}{dt}$ (см. (1.4)), который в свою очередь определяется двумя величинами — перепадом молекулярных концентраций в насосе (или на его входе) и в вакуумной системе и пропускной способностью тракта, соединяющего насос и откачиваемую систему.

Для выбираемого насоса минимальная молекулярная концентрация, которую он может обеспечить на своем входе, является величиной паспортной («предельное давление насоса») и, следовательно, неизменной. Поэтому при традиционном расчете вакуумных систем одним из главных этапов является этап определения пропускной способности тракта, а точнее — величины эффективной скорости откачки системы (см. (1.13)).

Практически во всех фундаментальных работах, посвященных расчету вакуумных систем [1,15], содержатся либо эмпирические выражения для расчета пропускных способностей элементов вакуумных систем в зависимости от их геометрии, размеров, сте-

пени вакуума, температуры и рода газа, либо номограммы для их графического определения (например, см. приложение).

Алгоритм простейшего расчета вакуумной системы выглядит следующим образом:

выбор насоса по заданным параметрам вакуума и объему вакуумной системы;

составление предварительной схемы системы;

расчет пропускных способностей элементов системы;

расчет продольного профиля концентраций вдоль системы;

расчет времени откачки системы.

Для такого расчета нет нужды в подробном анализе движения молекул внутри откачиваемой вакуумной системы, так как в его основу положен принцип сохранения массы (молекул), используемый для анализа сплошных сред, для которого существенно знание функций распределения микросоставляющих частиц потока по координатам, скоростям и во времени.

Все параметры при этом берутся усредненными по поперечному сечению трактов (а часто и вдоль них). Обычно подобные расчеты проводятся для одномерных вакуумных систем с простой структурой.

2.4.2. Кинематический метод

Более сложным вариантом расчета является кинематический метод, т. е. метод, в котором анализируются траектории движения молекул без учета причин и факторов, приводящих к движению молекул.

П. Клаузинг в 1932 г. предложил рассмотреть элементы вакуумной системы как объекты, имеющие вход и выход, потоки молекул на которых связаны соотношением

$$Q_{\text{вых}} = k_k Q_{\text{вх}},$$

где k_k — коэффициент Клаузинга, имеющий смысл вероятности прохождения молекулами рассматриваемого объекта.

Значение коэффициента Клаузинга определяется геометрией канала, с которым взаимодействует молекула при своем движении, причем отражение молекул описывается «косинусным законом», т. е. носит диффузный характер. Таким образом, решается кинематическая задача по определению вероятности прохождения молекул сквозь элемент вакуумного тракта в результате их многократных отражений от стенок.

Поскольку коэффициент Клаузинга определяет уменьшение потока на выходе тракта, то, рассчитав его, легко определить пропускную способность тракта, используя выражение

$$C = k_k C_{\text{вх}} \quad (2.12)$$

где $C_{\text{вх}}$ — пропускная способность входного отверстия элемента тракта.

Следовательно, дополнительно к вышеприведенным результатам простейшего расчета расчет коэффициента Клаузинга, при котором необходимо проследить трехмерные траектории многих молекул, движущихся через тракт, позволяет определить функцию распределения молекул в трехмерном пространстве, т. е. получить картину поля молекулярной концентрации.

В настоящее время в вакуумной технике используются два метода, позволяющих вести численный расчет траекторий молекул [3,4]. Наиболее распространенным является метод Монте-Карло, называемый также методом статистических испытаний и состоящий в моделировании случайных событий, которые и определяются процессом движения отдельных молекул в общем потоке откачки.

Упрощенно реализация метода Монте-Карло для расчета вакуумных систем состоит в следующих операциях:

задается закон распределения молекул по скоростям и углам влета на входе элемента тракта;

задается аналитическая функция внутренней поверхности элемента;

задается вероятность сорбирования молекул на отдельных участках внутренней поверхности;

задается закон рассеяния молекул поверхностями (обычно «косинусный закон»);

выбирается направление полета молекулы;

определяется точка первого столкновения молекулы с поверхностью;

повторяется весь цикл действия до тех пор, пока молекула не пройдет либо выходное, либо входное сечение элемента тракта.

Вторым методом для вычисления траекторий молекул является метод угловых коэффициентов, суть которого состоит в том, что в отличие от метода Монте-Карло, где рассчитывается вероятность прохождения молекул сквозь элемент с заданной внутренней поверхностью, в нем рассчитывается вероятность непосредственного попадания на площадку dA_i молекул, вылетающих с площадки dA_j . Если площадок типа dA_j много, то, суммируя потоки с них, попадающие на площадку dA_i , можно определить полный поток на нее.

Доля потока, покидающего площадку dA_j в направлении площадки dA_i , определяется телесным углом $d\Omega_{ji}$, под которым площадка dA_i видна из центра площадки dA_j , и распределением по углам вылетающих молекул. При «косинусном законе» распределения молекул дифференциальный угловой коэффициент $d\phi_{ji}$ может быть выражен в виде:

$$d\varphi_{ji} = \frac{d\Omega_{ji}}{\pi} \cos \theta_{ji}, \quad (2.13)$$

где θ_{ji} — угол между нормалью к площадке dA_j и средней линией телесного угла.

Используя (2.13), получим:

$$d\theta_{ji} = d\varphi_{ji} dQ_j, \quad (2.14)$$

где dQ_j — поток молекул, попадающих на площадку dA_i при излучении (или отражении) потока молекул dQ_j площадкой dA_j .

Выражение (2.14) позволяет получить величину потока (например, потока молекулярного переноса в структурах достаточно сложных) путем детального разбиения этих структур на элементарные площадки. Несомненным преимуществом метода угловых коэффициентов является то, что он позволяет проводить прямой расчет потоков молекул, которыми обмениваются внутренние поверхности вакуумной системы и поверхности деталей и узлов, из которых собрана установка, введенная в вакуумную камеру для проведения вакуумного технологического процесса. Так, средние угловые коэффициенты (полагая $dQ = \text{const}$ и интегрируя поток по поверхностям) для двух длинных соосных цилиндров равны:

$$\varphi_{12} = 1, \quad \varphi_{21} = R_1/R_2,$$

где R — радиусы цилиндров, индексы 1 и 2 означают внешнюю поверхность внутреннего цилиндра и внутреннюю поверхность внешнего цилиндра соответственно.

Равенство углового коэффициента единице означает, что все молекулы, излученные или переотраженные от поверхности внутреннего цилиндра, попадут на внешний цилиндр.

2.4.3. Кинетический метод

Метод потока и кинетический метод в большинстве практических случаев удовлетворяют вакуумщиков. Достаточно сказать, что полученные методом Монте-Карло индикатрисы и рассчитанные по ним поперечные профили концентраций (см. рис. 2.9) не измерены экспериментально и не использованы при проектировании вакуумных систем (за исключением оптимизации входной геометрии насосов поверхностного действия [8]). Во многом такая ситуация объясняется традиционно-консервативной ориентацией вакуумной техники на термодинамические методы описания происходящих явлений. Молекулярно-кинетическая теория весьма редко используется в полном объеме, т. е. с анализом кинетики групп молекул. Чаще пользуются представлением о молекулярном строении газа и о существовании собственных траекторий у молекул, которые изменяются в зависимости от степени

вакуума: от хаотической «броуновской» до прямолинейных, ограниченных размерами камер. Однако количество молекул в единице объема даже при высоком вакууме так велико, что термодинамическое описание ближе к реальности, нежели кинематическое.

Но термодинамические параметры (давление, объем, температура) не имеют физического смысла в неравновесных вакуумных системах, в которых существуют условия для возникновения молекулярных потоков.

На рис. 2.10 показана схема, в которой отражена сложившаяся в вакуумной технике ситуация с анализом поведения остаточного газа в системах и проведением на его основе расчета вакуумных систем (элементов систем). Линия *a-a* соответствует кинематическому методу анализа, взаимосвязи остальных блоков схемы ясны из рисунка. Блок «Взаимодействие остаточного газа с поверхностями» введен в схему отдельно, так как представляется важным для вакуумной техники и неправильно умалчивается при описании вакуумных систем через осредненные величины. Неявно эти взаимодействия учтены при составлении полуэмпирических и эмпирических формул пропускной способности. Из рис. 2.10 также видно, что все результаты, получаемые при традиционном подходе, могут быть получены и при использовании статистической модели вакуума.

Используя кинетическое уравнение Больцмана, можно проводить анализ не только движения потоков молекул, но и причин, его вызвавших.

Для численных расчетов кинетики молекул используют интегрально-кинетический метод, название которого связано с тем, что в нем применяется интегральная форма записи кинетического уравнения.

Предположим, что функция распределения $f_1(\vec{r}_1, \vec{v}_1, t)$ после взаимодействия с площадкой поверхности dA трансформировалась в функцию $f_2(\vec{r}_2, \vec{v}_2, t)$. Вероятность перехода молекул из состояния $\vec{v}_1$ в состояние $\vec{v}_2$ равна W и определяется потенциалом взаимодействия молекул и поверхности, температурой поверхности и т. п.

В этом случае можно записать:

$$f_2(\vec{r}_2, \vec{v}_2, t) = \gamma(\vec{r}_1, t) \iiint |\langle \vec{v}_{\text{норм}} \rangle| f_1(\vec{r}_1, \vec{v}_1, t) W d\vec{v}_1,$$

где $\langle \vec{v}_{\text{норм}} \rangle$ — нормальный к поверхности компонент средней скорости; γ — коэффициент сорбции.

Векторы $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ взаимно независимы, тогда согласно работе [3] можно определить плотность потока молекул после взаимо-

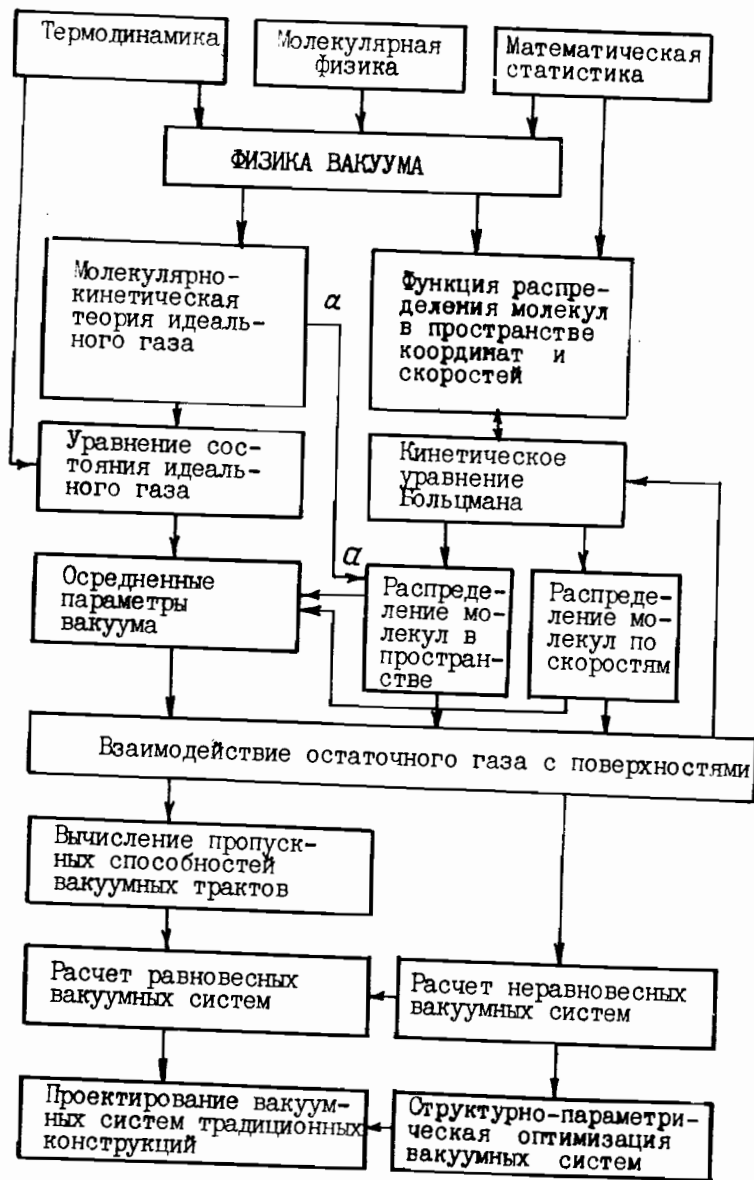


Рис. 2.10. Схема альтернативных методов анализа и расчета вакуумных систем

Таблица 2.1

Методы анализа и расчета параметров вакуума в характеристике вакуумных систем

Подход	Метод рассмотрения	Основное уравнение	Взаимосвязь с поверхностью	Результат расчета	Метод расчета	Рекомендации по применению
Термодинамический	Потоки в сплошных средах	Сохранение количества молекул в системе «камера — насос» $Q^{\Phi}(\xi) = Q_{\text{вх}}^{\Phi} - Q_{\text{вых}}^{\Phi}(\xi),$ где $Q^{\Phi}(\xi) = \frac{dN}{dt} \Big _{\xi}$; ξ — направление потока, $Q_{\text{вых}}^{\Phi}(\xi) = n(\xi) s(\xi)$ — поток отдачи в сечении x вдоль направления	Косвенно через C	Определение $n(\xi)$, определение $C(\xi)$ по эмпирическим формулам, номограммам для типовых структур, определение $S(\xi)$	Аналитический расчет, решение дифференциальных уравнений	Для равновесных и квазиравновесных систем, одномерных при получении усредненных характеристик
Статистический (вероятностный)	Кинематика молекул	$\left\{ \begin{aligned} \int V_{\text{вых}} dA_{\text{вых}} &= k_{\text{в}} \int V_{\text{вх}} dA_{\text{вх}} \\ A(\vec{r}) &= 0 \text{ — ур-ние поверхн.} \\ \vec{r} &= \vec{r}_0 + \vec{v} \cdot t \\ k_{\text{в}} &= \frac{N_{\text{вых}}}{N_{\text{вх}}} \end{aligned} \right.$	Диффузное рассеяние, сорбция	Нахождение пространственного распределения молекул (поля молекулярных концентраций). Определенные усредненные параметров	Численный расчет: метод Монте-Карло, метод угловых коэффициентов (лучистый обмен)	При вычислении полей молекулярной концентрации в простых трехмерных вакуумных системах
Кинетика (динамика) молекул	Кинетика (динамика) молекул	$\frac{d f(\vec{r}, \vec{v}, t)}{dt} = I_{\text{ст}} - \text{изменение } f$ $(f^{*'} - f^{*}) \neq 0$	Потенциальное взаимодействие, любое вида, сорбция — десорбция	Нахождение пространственного скоростного распределения. Определение осредненных параметров	Решение кинетического уравнения Больцмана (интегрально-кинетический метод)	При вычислениях характеристик систем с повышенной гео-метрической сложностью и с учетом влияния РТГ

действия первичного потока с поверхностью, чьи параметры заданы:

$$I(\vec{r}_2, \vec{v}_2, t) = \gamma(\vec{r}_1, t) W I(\vec{r}_1, t_1), \quad (2.15)$$

где $I(\vec{r}_1, t_1)$ — плотность потока, падающего на поверхность в момент времени t_1 .

Из (2.15) следует, что в области пространства вакуумной системы вокруг точки $\vec{r}_2$ известна плотность потока молекул, имеющих в момент времени t скорость $\vec{v}_2$. Ясно, что для анализа поведения остаточных газов в вакуумных системах подобная информация исчерпывающая.

В табл. 2.1 все рассмотренные методы анализа систематизированы согласно физическому подходу и получаемым результатам. Следует отметить, что математический аппарат для проведения численных расчетов характеристик вакуумных систем развит недостаточно, не существует инженерной дисциплины «Теоретические основы проектирования и оптимизации вакуумных систем», средства вакуумной метрологии не позволяют проводить векторные и локальные измерения параметров вакуума. Вышеперечисленные причины тормозят развитие и использование в физике вакуума статистических методов исследования — наиболее корректных и информационно полных.

3. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

3.1.1. Структурная схема вакуумной системы

Простейшая вакуумная система, схема которой изображена на рис. 1.2, часто может удовлетворить потребности разового эксперимента. Однако если речь идет о вакуумном технологическом процессе, то вакуумная система должна отвечать определенным требованиям, например:

иметь возможность многократного введения в вакуумную (рабочую) камеру объекта исследования (или технологического объекта);

после разгерметизации камеры иметь минимальное время восстановления рабочего вакуума;

оказывать минимальное влияние на объект исследования;

быть надежной, например, не терять работоспособность при кратковременном отключении электроэнергии;

быть достаточно гибкой, чтобы адаптироваться к новым условиям технологического процесса.

На рис. 3.1 изображена структура, согласно которой организуется любая вакуумная система.

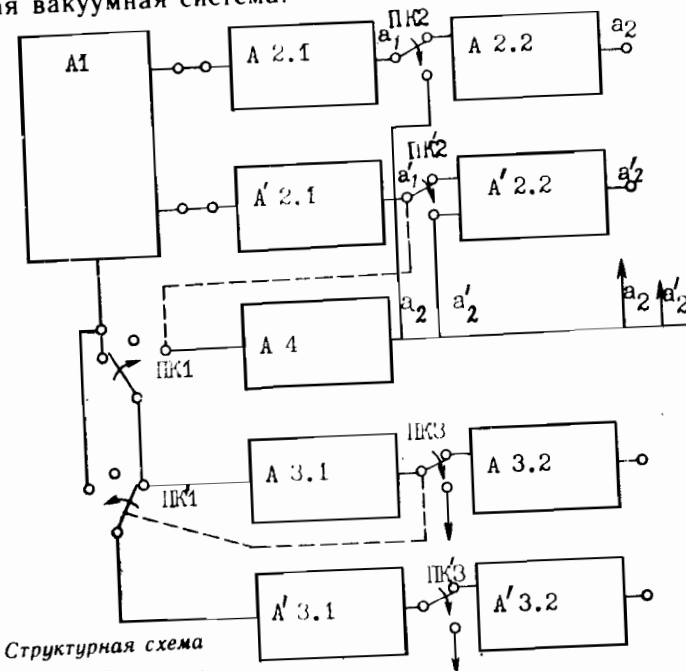


Рис. 3.1. Структурная схема высоковакуумной системы

Устройство A1 по существу — вакуумная камера, в которой производится рабочий технологический процесс, определяющий главное для вакуумной системы — требования к «рабочему вакууму». В частности, задаются $p_{\text{раб}}(\vec{r})$, парциальный состав остаточного газа, объем камеры, $Q_{\text{вх}}^{\Phi}$, температурные условия, условия процесса, ведущие к возникновению молекулярных потоков, например, движение частей конструкции, динамика процесса откачки или требования к временным параметрам системы.

Современные вакуумные технологические процессы очень разнообразны, и часто их требования почти невыполнимы для вакуумной техники. Например, проект ускорителя на встречных пучках (суперколлайдера, США) предполагает, что вакуумная камера должна быть длиной до 100 км при диаметре менее 10 мм. Низкая пропускная способность камеры ($< 0,1 \frac{\text{м}^3 \cdot \text{м}}{\text{с}}$) предполагает использование многих насосов с малой S_0 , распределенных по длине камеры. Это вызывает два осложнения: во-первых, трудный доступ к оборудованию

и, во-вторых, низкую надежность, что связано с огромным количеством элементов (более 20000 фланцевых соединений, 8000 проходных электроизоляторов для подачи питания к насосам и подключения систем диагностики пучка ускорителя).

Из этого следует, что устройство А1 является, с одной стороны, вакуумной камерой для вакуумной системы, с другой — главным элементом конструкции, обеспечивающей проведение технологического процесса, и поскольку это так, то и требования, предъявляемые к нему, двойные. Необходимо достигнуть компромисса при их удовлетворении, что требует не только конструкторского мастерства, но и знания процессов, происходящих при откачке систем.

Основным узлом устройства А2 является высоковакуумный насос. Известно два типа физических явлений [21], приводящих к уменьшению количества молекул в камере: захват молекул в высоком вакууме в камере и перемещение их сквозь насос в область низкого вакуума, т. е. работа в компрессорном режиме, что требует не превышения определенного уровня концентрации молекул на выходе насоса, так как он рассчитывается на определенный перепад концентраций на его входе и выходе (рабочий диапазон действия насоса). Следовательно, к выходу насоса «компримирующего» (компрессорного) типа (или насоса «объемного действия») необходимо подключать **вспомогательный насос** того или иного типа, удаляющий избыточные молекулы.

В структурной схеме рис. 3.1 вышесказанное учтено в цепочке последовательно соединенных устройств А2.1, А2.2 (или А'2.1, А'2.2) и т. д., или в возможности подключения к выходу этих устройств трактов откачки a_2 , a'_2 и т. д.

Кроме того, возможно параллельное подключение устройств А2 к камере, что приводит к увеличению скорости ее откачки в 2, 3 и более раз в зависимости от их количества. Такое подключение часто используется в протяженных камерах с малой пропускной способностью и приводит к выравниванию продольного профиля концентраций вдоль камеры.

Вторым физическим явлением, приводящим к уменьшению количества молекул в камере, является сорбция молекул газа, т. е. перевод молекул, находящихся в камере, из свободного состояния в связанное. Эти насосы, называемые электрофизическими насосами или насосами «поверхностного действия», не нуждаются во вспомогательных насосах и не имеют выхода вообще. Последовательное их соединение невозможно. Количество сорбируемых этими насосами молекул всегда ограничено, а начать работу они могут только при определенном вакууме. Эти обстоятельства приводят к необходимости использовать **насосы предварительного разрежения**, которые могут и не отличаться конструктивно от насосов вспомогательной откачки, но выполняют

иную функцию, предварительно удаляя основное количество молекул из камеры и создавая начальный вакуум, требующийся, например, для напыления пленок геттеров (сорбентов), зажигания разряда, накаливания термокатодов и т. п.

Насосы предварительного разрежения всегда подключаются параллельно с высоковакуумными насосами и на рис. 3.1 входят в устройство А3.

Из схемы видно, что эти насосы также могут включаться последовательно и параллельно, осуществляя либо прямую, либо байпасную откачку вакуумной камеры. Последнее достигается в том случае, если вход устройства А3.1 (А'3.1), первоначально подключенный к камере, переключается на выход устройства А4, устанавливаемое между выходом устройства А2 и входом устройства А3, замыкая, таким образом, тракт откачки. Устройство А4 представляет собой балластный объем, в котором создается разрежение, достаточное для того, чтобы в случае аварии высоковакуумный насос определенное время «не заметил отсутствия» вспомогательного насоса.

Последовательное включение насосов используют для расширения динамических рабочих диапазонов перепадов концентраций. Функции переключателей ПК могут выполнять два независимых клапана (крана), по выбору подключающие тракты откачки.

3.1.2. Принципиальная схема типовой вакуумной системы

Принципиальная схема устройства А1 приведена на рис. 3.2, а. Состав компонентов и их размещение может быть и другим. Например, через клапаны тарельчатые (шиберные) могут соединяться две, три и т. д. типа камеры С1 (секционирование камеры). Клапаны-накататели применяют для плавного увеличения концентрации газа, например, при необходимости разгерметизировать камеру (или отключить насос), клапан V3 используют для того, чтобы операции, проводимые в камере С1 и связанные с увеличением концентрации, не нарушали работы систем откачки, подключаемых к фланцу «в». Фланцы «а» и «б» служат для подключения **байпасной** линии откачки и **течеискателя** соответственно. (Байпасной называется линия откачки, позволяющая подключать низковакуумный насос к камере через тракт с высокой пропускной способностью, что снижает время откачки основного количества газа в камере; течеискатель — специальный прибор для проверки герметичности камеры, иногда заменяется на масс-спектрометр.)

К фланцу «в» подключается высоковакуумная часть системы — устройство А2 с высоковакуумным насосом N1. На рис. 3.2, б изображен насос «объемного действия» с выходным фланцем

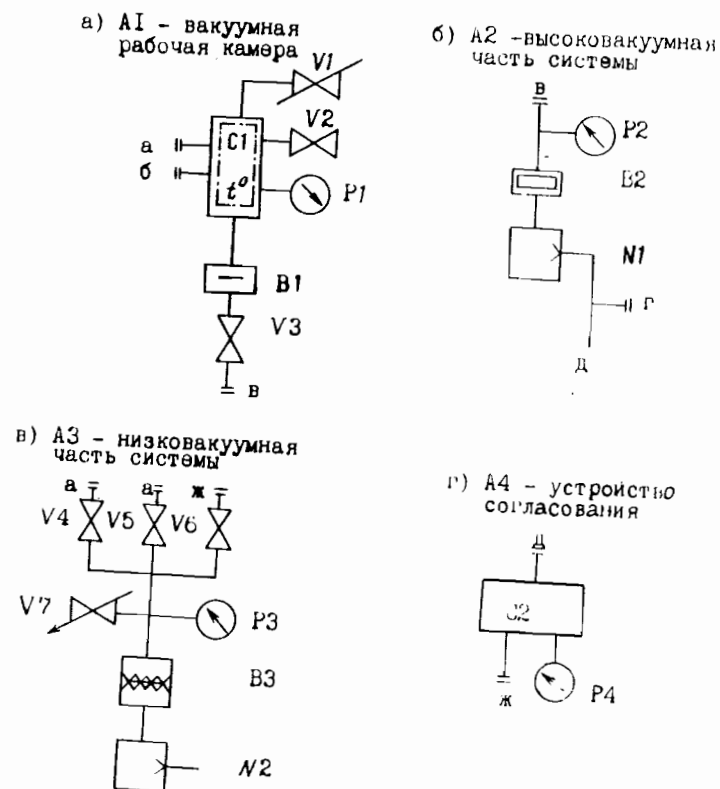


Рис. 3.2. Типовая принципиальная схема высоковакуумной системы (обозначения соответствуют ГОСТам 2.796—81 и 2.797—81): N1 — высоковакуумный насос; N2 — низковакуумный насос; C1 — секционная камера; C2 — балластный объем; ловушки: B1 — термоэлектрическая, B2 — охлаждаемая (77 K), B3 — сорбционная; манометры: P1, P2 — высоковакуумные, P3, P4 — низковакуумные; клапаны: V1, V7 — дозирующий, V4, V5 — байпасной линии откачки камеры; V2, V6 — тарельчатый шлюзовой, V3, V8 — тарельчатый шлюзовой; V9 — тарельчатый шлюзовой; V10 — тарельчатый шлюзовой; V11 — тарельчатый шлюзовой; V12 — тарельчатый шлюзовой; V13 — тарельчатый шлюзовой; V14 — тарельчатый шлюзовой; V15 — тарельчатый шлюзовой; V16 — тарельчатый шлюзовой; V17 — тарельчатый шлюзовой; V18 — тарельчатый шлюзовой; V19 — тарельчатый шлюзовой; V20 — тарельчатый шлюзовой; V21 — тарельчатый шлюзовой; V22 — тарельчатый шлюзовой; V23 — тарельчатый шлюзовой; V24 — тарельчатый шлюзовой; V25 — тарельчатый шлюзовой; V26 — тарельчатый шлюзовой; V27 — тарельчатый шлюзовой; V28 — тарельчатый шлюзовой; V29 — тарельчатый шлюзовой; V30 — тарельчатый шлюзовой; V31 — тарельчатый шлюзовой; V32 — тарельчатый шлюзовой; V33 — тарельчатый шлюзовой; V34 — тарельчатый шлюзовой; V35 — тарельчатый шлюзовой; V36 — тарельчатый шлюзовой; V37 — тарельчатый шлюзовой; V38 — тарельчатый шлюзовой; V39 — тарельчатый шлюзовой; V40 — тарельчатый шлюзовой; V41 — тарельчатый шлюзовой; V42 — тарельчатый шлюзовой; V43 — тарельчатый шлюзовой; V44 — тарельчатый шлюзовой; V45 — тарельчатый шлюзовой; V46 — тарельчатый шлюзовой; V47 — тарельчатый шлюзовой; V48 — тарельчатый шлюзовой; V49 — тарельчатый шлюзовой; V50 — тарельчатый шлюзовой; V51 — тарельчатый шлюзовой; V52 — тарельчатый шлюзовой; V53 — тарельчатый шлюзовой; V54 — тарельчатый шлюзовой; V55 — тарельчатый шлюзовой; V56 — тарельчатый шлюзовой; V57 — тарельчатый шлюзовой; V58 — тарельчатый шлюзовой; V59 — тарельчатый шлюзовой; V60 — тарельчатый шлюзовой; V61 — тарельчатый шлюзовой; V62 — тарельчатый шлюзовой; V63 — тарельчатый шлюзовой; V64 — тарельчатый шлюзовой; V65 — тарельчатый шлюзовой; V66 — тарельчатый шлюзовой; V67 — тарельчатый шлюзовой; V68 — тарельчатый шлюзовой; V69 — тарельчатый шлюзовой; V70 — тарельчатый шлюзовой; V71 — тарельчатый шлюзовой; V72 — тарельчатый шлюзовой; V73 — тарельчатый шлюзовой; V74 — тарельчатый шлюзовой; V75 — тарельчатый шлюзовой; V76 — тарельчатый шлюзовой; V77 — тарельчатый шлюзовой; V78 — тарельчатый шлюзовой; V79 — тарельчатый шлюзовой; V80 — тарельчатый шлюзовой; V81 — тарельчатый шлюзовой; V82 — тарельчатый шлюзовой; V83 — тарельчатый шлюзовой; V84 — тарельчатый шлюзовой; V85 — тарельчатый шлюзовой; V86 — тарельчатый шлюзовой; V87 — тарельчатый шлюзовой; V88 — тарельчатый шлюзовой; V89 — тарельчатый шлюзовой; V90 — тарельчатый шлюзовой; V91 — тарельчатый шлюзовой; V92 — тарельчатый шлюзовой; V93 — тарельчатый шлюзовой; V94 — тарельчатый шлюзовой; V95 — тарельчатый шлюзовой; V96 — тарельчатый шлюзовой; V97 — тарельчатый шлюзовой; V98 — тарельчатый шлюзовой; V99 — тарельчатый шлюзовой; V100 — тарельчатый шлюзовой.

«д». Фланец «г» служит для подключения теченскателя, в этом месте схемы его эффективность выше, чем в случае подсоединения к фланцу «б» в устройстве А1. При очень малых потоках натекания (течах) вакуумная система теченскателя может выполнять функции по дополнительной откачке насоса N1. В этом случае устройства, подсоединенные к фланцу «д», отключаются. Показания манометров P1 и P2 находятся в определенном соотношении. Если оно стабильно, то они работоспособны и не нуждаются в калибровке. В случае использования сорбционных

насосов, у которых нет выходных фланцев, тракт откачки обрывается на насосе.

Низковакуумная часть системы (А3) (рис. 3.2, в) включает насос N2, который с помощью независимо работающих клапанов V4 и V6 может подключаться либо к фланцу «а» (А1), либо к фланцу «д» (А2) через устройство А4 (рис. 3.2, г) — балластный объем C2. Клапан V5 имеет меньшую пропускную способность, чем V4 и позволяет, например, уменьшить нагрузку на насос N2 при откачке объема непосредственно после разгерметизации. При одновременном открытии клапанов V4 и V6 осуществляется режим байпасной откачки камеры C1.

Манометры P1, P2, P3, P4 позволяют судить о работоспособности отдельных частей вакуумной системы. Ловушки B1, B2, B3 защищают вакуум в камере C1 от влияния вакуумной системы.

В случае применения на месте N1 насоса сорбционного типа необходимость в устройстве А4 и вентиле V6 отпадает, и насос N2 вместо функций вспомогательного насоса выполняет функции насоса предварительного разрежения.

В схеме, приведенной на рис. 3.2, есть избыточность по компонентам, возможны варианты по ее упрощению, но суть сохраняется в любом случае. Иногда конкретные условия требуют изменения конфигурации схемы, например, нельзя использовать криогенный насос в качестве насоса N1 вместе с манометром P2 с накаливаемым катодом, так как при регенерации насоса испаряющиеся газы могут достигнуть концентрации, достаточной для взрыва.

3.1.3. Алгоритмы проектирования и расчета

На основании знаний о вакуумном технологическом процессе, структурно-принципиальных схемах вакуумных систем, процессах, происходящих с газом при откачке может быть выполнена разработка вакуумной системы, которая в соответствии с ГОСТ 2.103—68 включает в себя ряд стадий, начальными из них являются разработки технического задания, технического предложения, эскизного проекта и изготовление макета. При проведении экспериментальных исследований макет является конечной целью разработки.

Техническое задание разрабатывается на основе требований процесса к вакууму. Исходя из этих требований формируются требования к системе, обеспечивающей этот вакуум, т. е. техническое предложение по вакуумной системе. В нем предлагается начальная компоновка вакуумной системы, позволяющая начать расчет параметров и рабочих характеристик системы, который учитывает не только характеристики отдельных элементов системы, но и их взаимодействие в составе системы. Например, для соединения в едином вакуумном тракте камеры, арматуры и насосов определяется фактическая (эффективная) скорость от-

качки камеры и профили функции распределения молекул по внутреннему пространству системы; для комплекса «вакуумный технологический процесс — вакуумная система» определяется уровень «чистоты» вакуума, т.е. количество присутствующих неорганических соединений (углеводородов) в камере, уровень вибрации в камере от работающих механических элементов вакуумной системы, величину стимулированной технологическим процессом десорбции молекул, взаимовлияние магнитных полей, плазмы разрядов и т.д. на вакуумную систему и технологический процесс. В результате расчета определяется предельно достижимая концентрация молекул и конфигурация полей молекулярной концентрации, время достижения рабочего вакуума, динамические характеристики комплекса.

По результатам проведенного расчета проводится уточнение начальной компоновки системы, например, перемещение насосов, манометров, замена выбранных элементов, вакуумной системы. Затем проводят повторный расчет с целью уточнения полученных параметров вакуума.

На рис. 3.3 и 3.4 приведены алгоритмы проектирования и расчета вакуумных систем, составленные в соответствии с вышеизложенной логикой.

Первый и второй этапы проектирования (рис. 3.3) связаны с определением требуемого вакуума без рассмотрения возможностей реальных вакуумных систем. На этих этапах считают, что вакуумная техника всегда может обеспечить любые требования по создаваемому вакууму.

Третий этап — наиболее ответственный, так как определяют: выбор размера насоса (или насосов) и время откачки системы; источники газовой нагрузки, т.е. источники поступления молекул в вакуумную систему, их параметры, координаты и характеристики. Именно на этом этапе возникает вопрос о выборе материалов и деталей вакуумной системы с точки зрения их вакуумных свойств, определяется парциальный состав газовой нагрузки, т.е. количество и вид различных газов, которые откачиваются в вакуумной системе, и, в конечном счете, определяют парциальный состав остаточного газа после откачки.

На **четвертом этапе** классифицируются технологические процессы, требующие вакуума, на основе их характеристик, которые могут влиять на параметры вакуума, на работу насосов, манометров и т.д. Например, если откачиваются агрессивные (радиоактивные) газы, то, во-первых, невозможен их выброс в атмосферу, и, во-вторых, элементы вакуумной системы должны обладать устойчивостью к их воздействию. В случае проводки пучка частиц в вакууме следует учесть взаимодействие этих частиц и их излучений со стенками вакуумной камеры, с манометрами. Таким образом, на четвертом этапе проводится тщательный анализ технологического процесса, в результате которого выявляются его

специфические «антивакуумные» свойства, что необходимо для принятия мер предохранения вакуумной системы от их влияния или, по крайней мере, снижения эффективности этого влияния. Эти меры обычно комплексные и состоят в подборе материалов вакуумной системы, выборе правильной схемы ее компоновки, подборе определенных типов насосов и манометров, введении в камеру экранов и т.п.

Основным недостатком современных вакуумных систем является то, что из них в рабочую камеру попадают углеводороды (что приводит к «замасливанию» поверхностей камеры). Причем если при использовании механических и масляных насосов это в основном пары масел, то даже при работе с так называемыми «чистыми» вакуумными системами (или «безмасляными») легкий углеводород метан CH_4 синтезируется на активной пленке сорбента — титана. Поэтому на **пятом этапе** проектирования учитываются «паразитные» характеристики вакуумной системы, которые могут помешать или сделать невозможным технологический процесс. Помимо «замасливания» к таким характеристикам можно отнести малый рабочий ресурс средств откачки, существенное отличие рабочих температур средств откачки и технологического процесса (например, термоядерные исследования и криогенные насосы, существование в вакуумной системе различных форм газовых разрядов

и процессов ионизации), что приводит к проникновению в рабочую камеру посторонних заряженных частиц; использование в ряде вакуумных элементов сильных электрических и магнитных полей, что может привести к возмущениям процесса в рабочей камере и т.п.

Шестой и седьмой этапы можно объединить, так как их суть состоит в поиске приемлемого компромисса между желательным

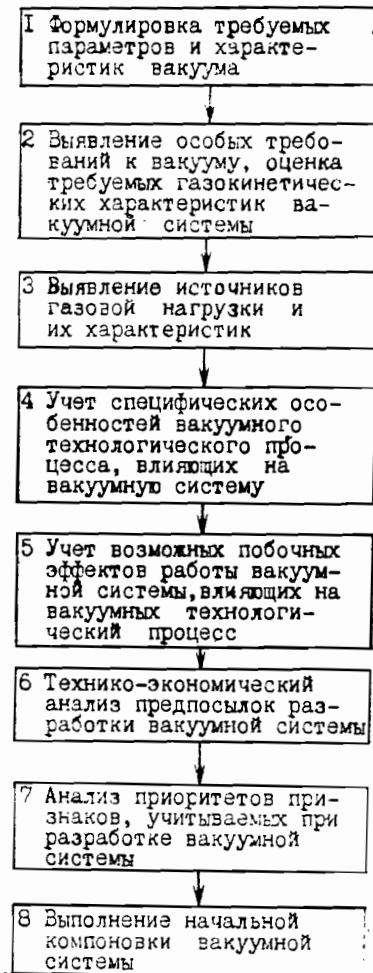


Рис. 3.3. Алгоритм проектирования вакуумной системы

решением и возможностями по его обеспечению. Как сказано в п. 1.1, мировой уровень современной вакуумной техники таков, что с достаточной гибкостью может обеспечить практически любое требование к вакууму (или вакуумной системе). Однако цена, которую при этом придется платить, не всегда согласуется со стоимостью всего процесса, для которого создается вакуум. Стоимость современных вакуумных систем электрофизических установок составляет от 10 до 40 % общей стоимости установок, что заставляет уделять повышенное внимание разработке вакуумных частей установок. Выбор главного критерия при проектировании вакуумной системы зависит от конкретных условий и может быть неожиданным, например: обеспечение минимального шума, минимального веса, радиационной стойкости, высокий уровень взаимозаменяемости элементов, быстрая сборка — разборка системы и т. п. Следует, впрочем, отметить, что обычно главным критерием является величина минимально достижимой концентрации остаточного газа и время его достижения.

На основании рассмотренных этапов производится начальная компоновка вакуумной системы или выбор варианта ее принципиальной схемы и разработка эскиза сборочного чертежа, из которых следует не только выбор различных компонентов системы, но и их взаимное расположение. При этом следует учесть размещение в рабочей камере конструкций, обеспечивающих проведение вакуумного технологического процесса. Эти конструкции подчиняются определенным правилам. Например, имеют минимальную «металлоемкость», т. е. минимальную площадь поверхностей, обращенных в вакуум, максимальную пропускную способность, т. е. представляют минимальное препятствие для молекулярных потоков, существующих в камере, не допускают образования «карманов», т. е. закрытых для прямой откачки полостей, типичными из которых являются полости, остающиеся под ввернутыми винтами и болтами, так как резьба в просверленных не насквозь отверстиях не доходит до их дна. Иными словами, конструкция должна быть сварной и выполнена из проволоки.

После проведения начального проектирования вакуумной системы, в результате которого разрабатывается предположение по ее компоновке, приступают к уточнению этой компоновки с помощью расчета вакуумной системы.

Алгоритм расчета, приведенный на рис. 3.4, состоит из двух частей. Первая часть — традиционная и базируется на расчете интегральных параметров вакуумных систем (см. п. 2.4.1). Средняя по системе рабочая молекулярная концентрация на порядок меньше заданной по условиям процесса, следовательно, предельно достижимая концентрация должна быть примерно на порядок ниже рабочей концентрации, при которой работает вакуумная система (или на два порядка ниже заданной). Эти условия очень жесткие, но определяют общую надежность вакуумной системы.

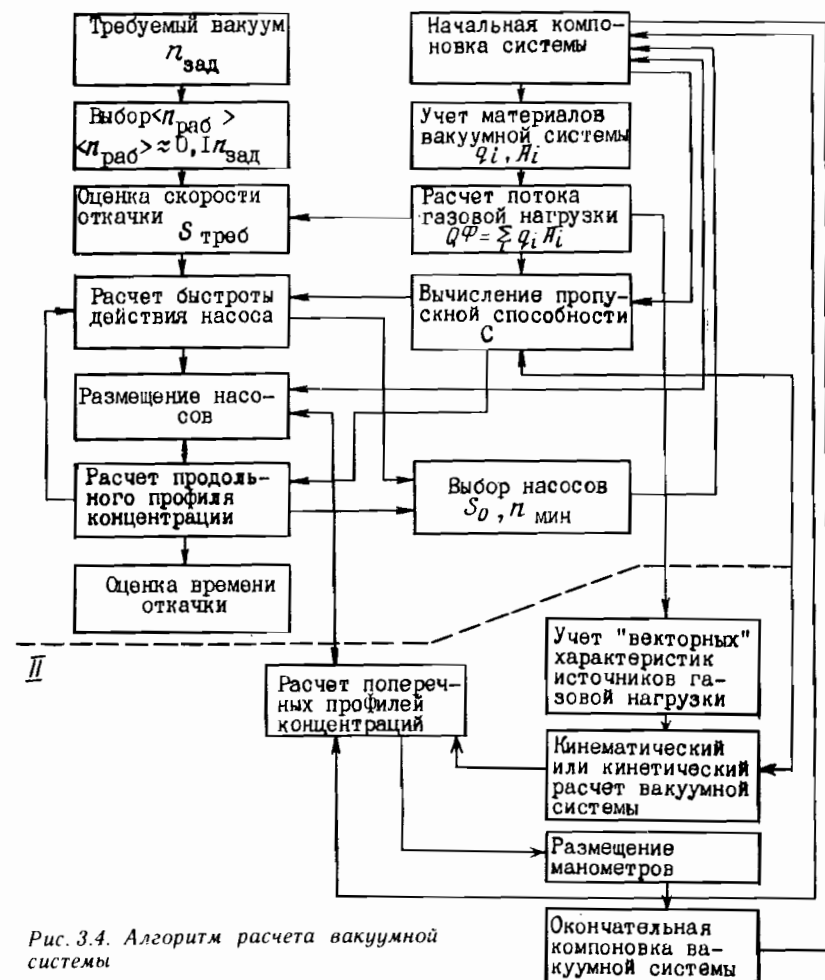


Рис. 3.4. Алгоритм расчета вакуумной системы

Из алгоритма видно, что начальная компоновка подвергается корректировке, в частности, путем перемещения насосов. Время откачки высоковакуумной системы рассчитать практически невозможно из-за неопределенности временной зависимости потоков газовой нагрузки, и поэтому проводится только его оценка.

Вторая часть алгоритма базируется на расчете либо траекторий молекул, либо функции их распределения (см. пп. 2.4.2 и 2.4.3). Такой расчет позволяет получить полную картину полей молекулярной концентрации и провести уточнение величин локальных концентраций непосредственно в зонах вакуумной ка-

меры, в которых осуществляется технологический процесс, и провести окончательную корректировку компоновки вакуумной системы, включая определение мест расположения диагностических приборов.

3.2. УЧЕТ ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ

3.2.1. Компоненты нагрузки

Уравнение откачки (1.14) может быть записано в векторном виде:

$$\bar{Q}_{\text{отк}}(\vec{r}, t) = \bar{Q}_1(\vec{r}, t) + \bar{Q}_2(\vec{r}, t) + \bar{Q}_3(\vec{r}, t) + \dots, \quad (3.1)$$

где $|\bar{Q}_{\text{отк}}(\vec{r}, t)| \equiv -\frac{dN}{dt}|_{\vec{r}}$ — поток откачки в вакуумной системе в данной координате $\vec{r}$; $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2$ и т. д. — потоки молекул, чье направление определяет либо уход молекул из системы, либо приход молекул в систему.

Работающий насос удаляет молекулы из вакуумной системы или, по крайней мере, лишает их возможности свободного перемещения в ней путем перевода из свободного в связанное состояние. Если бы в системе существовал только поток, создаваемый насосом, скажем $\bar{Q}_1$, то поток откачки никогда не был бы равен нулю, он был бы одинаков во всей вакуумной системе, и в ней достигался бы абсолютный вакуум.

Однако в реальных системах, как было показано в п. 2.3 и на рис. 2.6, в каждой точке пространства вакуумной системы всегда можно определить векторную сумму многих потоков молекул, имеющих разную природу. При условии относительного равновесия величин этих потоков внутри системы возникает определенная структура распределения молекулярной концентрации $n(\vec{r}, t)$ — «поле молекулярных концентраций», нахождение вида которого и является основной целью расчета вакуумных систем.

Условие относительного равенства величин потоков разной природы позволяет пренебрегать некоторыми явлениями, происходящими внутри вакуумной системы на фоне больших потоков откачки, натекания извне и т. п. Именно такой подход используется в вакуумной технике при разделении процесса откачки систем на два этапа: предварительную (форвакуумную) и высоковакуумную (вакуумную).

Предварительная откачка характерна тем, что в системе находится количество молекул $N_0 = 2,7 \cdot 10^{25} \cdot V_0$ (где V_0 — объем системы, м^3), соответствующее атмосферному давлению, причем парциальный состав газа в вакуумной системе повторяет состав

воздуха. В начальный момент времени эти молекулы распределены изотропно по вакуумной системе и находятся в хаотическом движении с нулевой скоростью направленного переноса. При включении вакуумного насоса, например, с быстротой действия $1 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} (10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1})$ в системе устанавливается молекулярный поток $2,7 \cdot 10^{22} \text{ мол} \cdot \text{с}^{-1}$, величина которого постоянно падает в соответствии со снижением величины молекулярной концентрации газа в системе. Естественно, при столь большом потоке, создаваемом насосом, можно считать, что поток откачки в системе равен ему, т. е. можно пренебречь практически всеми факторами, определяющими проблемы высоковакуумной техники: течениями (кроме грубых), газовой выделением, десорбцией, наличием малых пропускных способностей и полей молекулярной концентрации, существованием парциального состава газа.

Спустя некоторое время с начала откачки (обычно десятки или сотни секунд), возникает ситуация, когда поток откачки заметно уменьшается, происходит это за счет уменьшения (вплоть до нулевого) потока, выходящего из системы и образуемого насосом. Момент, когда это происходит, определяется основной рабочей характеристикой насоса: зависимостью быстроты действия насоса S_0 от величины молекулярной концентрации n_0 (давления) на его входе. Чем шире динамический диапазон работы насоса, тем при лучшем вакууме наступает равновесие потоков в системе (при условии одинаковости прочих факторов). Обычно считают, что этап предварительной откачки заканчивается при снижении количества молекул на четыре порядка (соответствует давлению 10 Па). Считают также, что при этом удалено основное количество газа (или теплоты газа) (99,99 %) и наступают молекулярные условия существования остаточного газа в вакуумной системе, при которых пренебрежимо их взаимодействие между собой. Молекулы двигаются по отрезкам прямых траекторий, концы которых находятся на внутренних поверхностях (точнее вблизи их) вакуумной системы, перемещение молекул в каком-либо направлении носит вероятностный характер (молекула «не знает», где находится насос, а попадает в него «случайно»); термодинамическое описание остаточного газа некорректно; потоки, создаваемые насосами, относительно малы (от 10^{19} до $10^9 \text{ мол} \cdot \text{с}^{-1}$ или от 10^{-2} до 10^{-12} Вт при 300 К).

Можно считать, что именно с наступлением молекулярных условий в системе, систему можно рассматривать как **вакуумную**. Именно при таких условиях проявляются те специфические подробности, которые выделяют вакуумные проблемы в самостоятельную область науки и техники.

На рис. 3.5 первый этап откачки расположен в интервале времени $(t_0 - t_2)$. Согласно рис. 1.3 предел откачки достигается за $(6 \div 12) \text{ с}$. Величина $N_{\text{пред}}$, согласно выражениям (1.18) и (3.1)

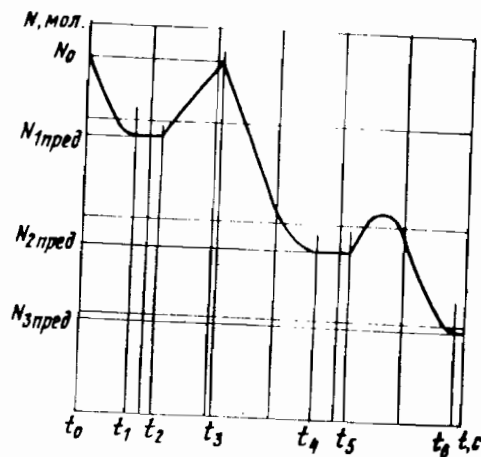


Рис. 3.5. Влияние различных компонентов газовой нагрузки на получаемый вакуум

определяется как:

$$N_{1\text{пред}} = V_0 \frac{\sum |\bar{Q}_i|}{\sum S_i},$$

где V_0 — объем системы; $\sum S_i$ — суммарная скорость откачки системы при величине концентрации $N_{1\text{пред}}/V_0$, $\sum |\bar{Q}_i|$ — сумма входящих в систему потоков, увеличивающих количество молекул в системе.

Таким образом, состояние квазиравновесия по потокам молекул, входящих и выходящих из системы, определяет достижимый уровень вакуума. После удаления основного количества молекул насос начинает работать на удаление молекул, попадающих в систему в виде дополнительной газовой нагрузки, состав которой определяется конкретными обстоятельствами, но обычно содержит два основных компонента:

потоки натекания молекул извне через течи, щели и другие отверстия в стенках камеры, во фланцевых соединениях, в местах сварки; величина этих потоков не зависит от степени вакуума в системе и определяется размерами отверстий, расположением которых чаще всего случайно, направлены потоки натекания обычно нормально ко внутренней поверхности стенки, имеющей это отверстие [13];

потоки газовой выделения, общей характеристикой которых является то, что распределение векторов скоростей молекул в них по направлениям подчиняется «косинусному закону», а название этих потоков указывает на то, что внутренние поверхности вакуумной системы как бы «выделяют» эти молекулы из себя; величина этих потоков, состав которых будет рассмотрен ниже, зави-

сит от многих факторов и, в частности, от степени вакуума в системе — при низком и среднем вакууме они относительно малы, при высоком вакууме являются определяющими.

В интервале времени $(t - t_3)$ (см. рис. 3.5) отключают насос, линейное увеличение количества молекул в системе (интервал времени $t_3 - t_4$) соответствует потоку натекания молекул из окружающего систему атмосферного воздуха. Увеличение продолжается до тех пор, пока либо не включат насос, либо молекулярные концентрации внутри и вне системы не выравняются. В момент времени t_4 устраняют течь и включают насос, естественно, что $N_{2\text{пред}}$ будет меньше $N_{1\text{пред}}$ и будет определяться суммой входящих в систему потоков «без потока натекания» (это утверждение условно, так как не существует систем без течей — абсолютно герметичных систем).

По достижении $N_{2\text{пред}}$ в момент времени t_5 , например, повышают температуру систем без отключения насоса (так называемый режим «вакуумной температурной тренировки»). Температура усиливает газовыделение, количество молекул растет, но так как стенка не может «выделять» много молекул бесконечно, то их количество вновь начинает уменьшаться, и к моменту времени t_6 система приходит в состояние квазиравновесия при количестве молекул в системе $N_{3\text{пред}}$.

Таким образом, зависимость, изображенная на рис. 3.5, иллюстрирует не только процесс откачки вакуумной системы и «борьбу» за улучшение вакуума, но и влияние отдельных компонентов газовой нагрузки на характеристики вакуумной системы. На рис. 3.6 приведен результат структурного анализа газовой нагрузки в вакуумной системе в соответствии с вышеизложенным.

3.2.2. Сорбция — десорбция молекул

В работе [13] подробно излагаются причины возникновения, параметры и характеристики потоков натекания. Эти сведения составляют основу **техники течения** — составной части вакуумной техники и в данном пособии не рассматриваются, так как относятся скорее к вопросам технологии изготовления вакуумных систем, а не к их физическому описанию.

Основное значение в высоковакуумных системах имеют **потоки десорбции**, т. е. уход молекул от стенки, где они находились в связанном состоянии, и потоки «истинного» газовой выделения из толщины стенок вакуумной системы молекул газов, ранее попавших в материал, из которого сделана стенка, и диффундирующих из нее в вакуум под действием градиента концентраций.

Процессы, происходящие на внутренних поверхностях стенок вакуумной системы, изучаются в курсах физики твердого тела,

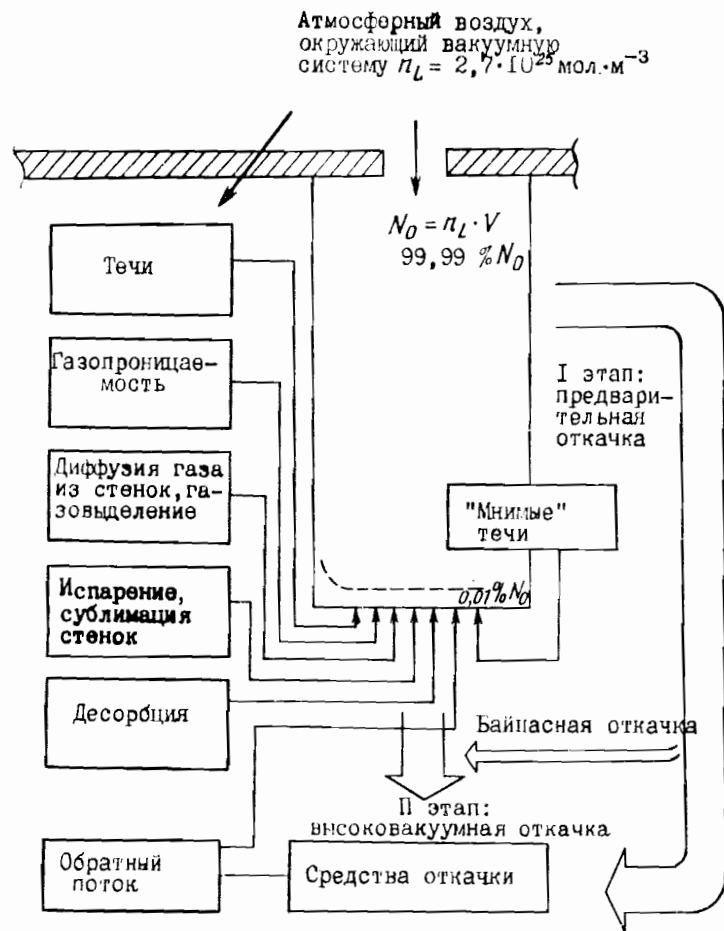


Рис. 3.6. Структура газовой нагрузки (без учета вклада вакуумного технологического процесса)

в разделе «Исследование поверхности», так как они являются помехой при изучении свойств поверхности на атомном уровне [5]. Развитие исследований этих процессов привело к возникновению дисциплины «Физика сорбции» [14], изучающей теорию и закономерности сорбционных явлений, в основе которых лежит способность атомов к слипанию.

Слипание атомов объясняется существованием сил электростатического взаимодействия заряженных тел (кулоновских сил), причем считается, что любой атом за счет колебаний элек-

тронного облака относительно ядра может превратиться в электрический диполь с периодически меняющейся полярностью. Возбуждаемое таким диполем электрическое поле может вызвать образование синхронного диполя у соседнего атома и т. д. Диполи притянутся и система двух атомов попадет в состояние с минимальной энергией — устойчивое с точки зрения термодинамики. Описанный эффект носит название дисперсионного. Естественно предположить, что для полярных структур диполи ориентируются относительно друг друга, обеспечивая притяжение — ориентационный эффект. Если одна структура полярна (например, кристаллическая решетка), а другая (молекула) неполярна, то в молекуле индуцируется диполь — индукционный эффект. Все перечисленные эффекты объясняют механизм возникновения сил Ван-дер-Ваальса, «проявляющихся» при взаимодействиях между молекулами в газе и между молекулами и поверхностями.

Энергия взаимодействия U при таких взаимодействиях невелика ($\sim 0,43$ эВ·мол⁻¹) и выражается следующей зависимостью:

$$U = -\alpha \frac{\xi_1 \xi_2}{r^6},$$

где α — коэффициент пропорциональности, минус указывает на то, что между атомами возникают силы притяжения; ξ_1 и ξ_2 — коэффициенты поляризуемости атомов; r — расстояние между атомами.

Коэффициенты поляризуемости увеличиваются при увеличении диаметра электронной оболочки и числа электронов, находящихся во внешнем поле (поляризуемость ксенона в 20 раз больше, чем у гелия).

Поскольку потенциальная энергия взаимодействия между атомами обратно пропорциональна r^6 , уже на расстояниях, равных 2—3 диаметров атомов ($\sim 5\text{Å}$), силы взаимодействия между ними становятся равными нулю, т. е. атом взаимодействует только с соседними атомами. Это обстоятельство объясняет, почему на поверхностях даже очень активных тел сорбируются преимущественно монослои газовых молекул.

При сближении взаимодействующих атомов дипольное притяжение атомов сменяется отталкиванием ядер атомов. На рис. 3.7 приведена схема взаимодействия атомов аргона, из которой видно, что при столкновении (сближении) атомы проходят ряд стадий взаимодействия, но в результате «излишнего» сближения разлетаются подобно бильiardным шарам после лобового столкновения, что обусловлено ядерным отталкиванием. Если начальная энергия атомов невелика, то они будут захвачены в связанное состояние на дне потенциальной ямы.

Описанное взаимодействие относится к «слабым» (физиче-

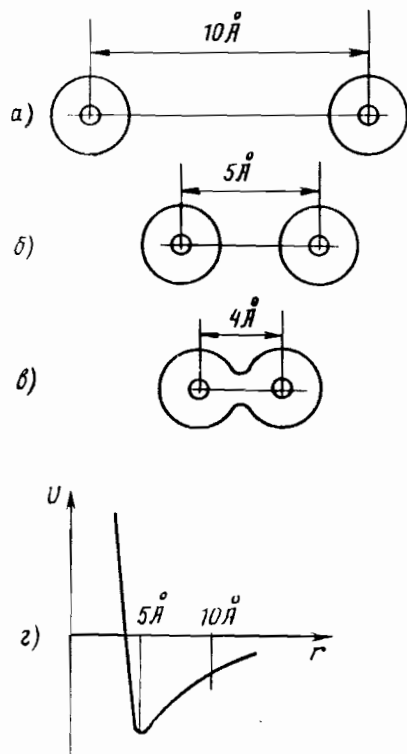


Рис. 3.7. Взаимодействие атомов аргона:

- а — слабое притяжение;
- б — максимум притяжения;
- в — отталкивание;
- г — потенциальная диаграмма

ляет сетку регулярно расположенных ионов, как бы «погруженных» в «ванну», наполненную валентными электронами. Решение вопроса о переходе электронов от атома к поверхности и наоборот зависит от величины уровня Ферми металла-сорбента [19, с. 413], потенциала ионизации сорбируемого атома и, т.е. в основном, определяется выбором материала сорбента (титан, тантал, цирконий), что и приводит к сильной селективности при откачке молекул (атомов) разных газов.

Рассмотренные явления получили название **физическая адсорбция** и **хемосорбция**. Основные остаточные газы в вакуумной системе состоят не из атомов, а из молекул и валентные связи у этих молекул уже насыщены, т.е. эти газы при нормальных температурах способны только к физической адсорбции на внут-

ским), оно характерно для атомов инертных газов (He, Ar, Ne), для двухатомных молекул (H_2 , O_2 , N_2 , Cl_2). Силы взаимодействия определяют физическую сорбцию молекул поверхностями (прилипание) и уменьшаются с повышением температуры как поверхности, так и молекулы (и наоборот, что используется в низкотемпературной сорбции при криогенных температурах).

Взаимодействие атомов в двухатомных молекулах относится к «сильным» (химическим) и определяется ковалентными связями, возникающими при перестройке электронных оболочек, которые в результате как бы «опоясывают» оба ядра, объединяя атомы в молекулу с энергией связи около $4,3 \text{ эВ} \cdot \text{мол.}^{-1}$.

Химические взаимодействия в вакуумной технике широко используются в сорбционных насосах, где специально генерируется активный сорбент, имеющий валентные электроны, и кристаллическая структура сорбирующей поверхности в насосе представ-

ренных поверхностях стенок вакуумной системы. При увеличении температуры (энергии молекул) физическая адсорбция является лишь начальной стадией сорбции, переходя затем в хемосорбцию.

На рис. 3.8 рассмотрен процесс падения двухатомной молекулы на поверхность. Вначале молекула притягивается силами Ван-дер-Ваальса и попадает в положение равновесия на расстоянии r_M , выделяя при этом энергию U_M , если часть этой энергии каким-либо способом отбирается у молекулы, то молекула совершает колебания на дне или вблизи потенциальной ямы, относительно положения равновесия с амплитудой, зависящей от температуры молекулы (ее энергии).

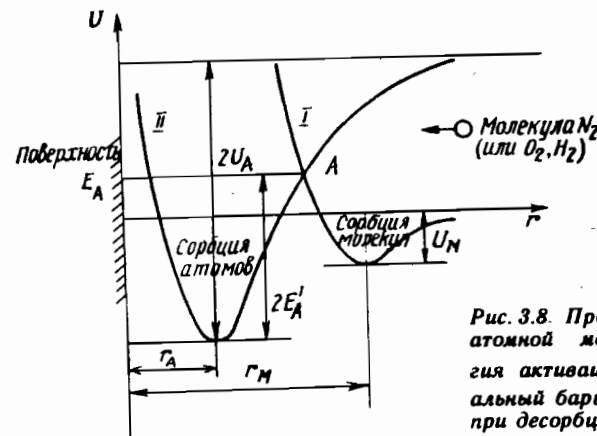


Рис. 3.8. Процесс сорбции двухатомной молекулы (E_A — энергия активации, $2E'_A$ — потенциальный барьер для двух атомов при десорбции)

Если адсорбируются атомы, из которых состоит молекула, то, во-первых, начальная потенциальная энергия двух отдельных атомов (до десорбции) больше потенциальной энергии молекулы на величину, необходимую для диссоциации молекулы на эти атомы, поэтому зависимость энергии взаимодействия от расстояния должна располагаться выше зависимости для молекулы на величину энергии диссоциации U_d ; во-вторых, размер атома меньше размера молекулы и, следовательно, он может больше приблизиться к поверхности (r_A); в-третьих, валентные электроны атома способны к более сильному взаимодействию с сорбентом, т.е. глубина потенциальной ямы для атомов больше ($2U_A$).

Таким образом, если удерживаемой на расстоянии r_M от поверхности молекуле сообщить энергию $U_M + E_A$, есть вероятность того, что она диссоциирует на атомы, сорбционный процесс будет развиваться дальше, и его можно описывать объединенной в точ-

ке А (см. рис. 3.8) для молекул и атомов зависимостью потенциальной энергии от их расстояния до поверхности.

Десорбция сорбированных атомов и молекул происходит в обратной последовательности. При объединении атомов в молекулу за счет передачи им энергии их связь с поверхностью ослабевает и вновь образованная молекула удаляется от поверхности, перемещаясь в потенциальную яму на расстоянии r_0 ; далее, если энергии молекулы достаточно для преодоления потенциального барьера U_0 , она может «уйти» в свободное пространство вакуумной системы — десорбироваться.

Поскольку в свободном пространстве потенциальная энергия двух атомов больше потенциальной энергии молекулы (примерно в десять раз), то при обезгаживании поверхностей обычно наблюдается выделение молекулярного, а не атомарного газа.

Следует помнить, что кривые, приведенные на рис. 3.8, лишь условно можно рассматривать как единую потенциальную диаграмму взаимодействия молекул с молекулами (или с поверхностями), так как они относятся к различным электронным состояниям системы: сорбат (сорбируемый газ) — сорбент.

В условиях равновесия процессов сорбции — десорбции число молекул, находящихся на поверхности единичной площади, определяется выражением:

$$N_c = v_{\text{сорб}} \tau,$$

где $v_{\text{сорб}}$ — скорость сорбции, $v_{\text{сорб}} = \eta n \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}$, η — коэффициент прилипания, n — концентрация газа над поверхностью, m — масса молекул газа; τ — время пребывания молекул на поверхности, $\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W_{\text{связи}}}{RT}\right)$ — уравнение Френкеля, где τ_0 — период колебания молекул в нормальном направлении поверхности, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с; $W_{\text{связи}}$ — энергия связи молекулы и поверхности.

За время τ все молекулы, ранее сорбированные поверхностью, будут заменены новыми, т. е. процессы сорбции — десорбции на поверхности идут непрерывно и практически мгновенно, можно считать, что внутренние поверхности высоковакуумных систем всегда покрыты, по крайней мере, монослоем сорбированных молекул (плотность покрытия $\sim 10^{21}$ мол. · м⁻²).

Для молекул, приходящих к поверхности после образования на ней монослоя (см. время образования в табл. 1.2), число вакансий равно нулю, коэффициент прилипания стремится к нулю, энергия связи уменьшается обратно пропорционально r^6 ; это приводит к тому, что второй и последующие слои прилипших молекул не сорбируются на поверхности, а **конденсируются** на монослое (частично сорбируются на молекулах других газов). Коэф-

фициент конденсации всегда меньше коэффициента прилипания, т. е. общая скорость сорбции уменьшается, но количество сорбированных (связанных) молекул на поверхности продолжает расти.

В учебнике проф. Л. Н. Розанова [1, с. 23—37] подробно рассмотрены температурные зависимости процессов сорбции — десорбции. Можно отметить их двойственность: при желании интенсифицировать процесс десорбции температуру системы «молекула — поверхность» необходимо увеличивать, при этом молекула приобретает дополнительную энергию для преодоления потенциального барьера связи и перехода в свободное состояние — этим пользуются для удаления «избыточных» молекул при очистке стенок и элементов вакуумных систем; для «чистых» откаченных систем температура должна быть минимальна (лучше криогенная (4—77) К), чтобы уменьшить амплитуду колебаний в системе «молекула — поверхность» и этим снизить вероятность выхода молекулы в свободное состояние.

Рассмотренные процессы сорбции не учитывали кинетическую энергию падающей на поверхность молекулы. Поскольку энергия связи даже в максимуме мала, то сорбироваться могут лишь молекулы, энергия которых меньше определенной величины. Если энергия больше, то молекула отразится от поверхности, приведя в колебание кристаллическую решетку поверхности, что, в свою очередь, может привести к разрыву связей с предварительно сорбированными молекулами и к их десорбции.

Сорбированные молекулы и атомы не находятся в состоянии покоя. Во-первых, они колеблются перпендикулярно поверхности; во-вторых, они мигрируют по поверхности аналогично тому, как они мигрируют в свободном состоянии по объему. При этом молекулы «ищут» связь с максимальной энергией, порой вытесняя из связей ранее сорбированные молекулы. Иначе, возможна ситуация, когда при вводе в вакуумную систему чистого газа произойдет резкое увеличение скорости десорбции молекул ранее сорбированного другого газа за счет **конкуренции** молекул разных газов за место в сорбированном состоянии: молекула с большей энергией связи заместит молекулу с меньшей энергией связи, передав ей энергию, выделившуюся при сорбции, заставит ее десорбироваться. На практике этот эффект сказывается, например, в **масс-спектрометрии разреженных газов** (раздел вакуумной техники). При подключении масс-спектрометра к вакуумной системе через патрубок с пониженной пропускной способностью в масс-спектре относительно реального состава будет завышено содержание инертных газов и молекулярного водорода и занижено содержание молекулярного кислорода и паров воды.

За счет миграции сорбированных молекул возможно перемещение налипших слоев по поверхности стенки, что иногда приводит к эффекту «загрязнения» очищенной поверхности за счет

введения в вакуумную систему источника «грязи», т. е. источника «нежелательных молекул».

В условиях высокого вакуума над твердым телом или жидкостью всегда будет находиться некоторое количество освободившихся из них (испарившихся или сублимировавшихся) молекул. Часть этих молекул переходит в свободное состояние и их нужно складывать с молекулами остаточных газов, другая часть сорбируется поверхностью и находится с ней в состоянии динамического равновесия. При установлении такого равновесия считают, что в вакууме под поверхностью находится **насыщенный пар** материала поверхности, концентрация которого зависит от характеристик материалов (включая жидкости и газы) и температуры [10, с. 318]. Значение паров в вакуумной технике трудно переоценить, известная «торричеллева пустота», полученная над ртутью, при 300 К имела молекулярную концентрацию пара ртути 10^{19} мол.·м⁻³, концентрация паров воды при такой температуре — 10^{23} мол.·м⁻³, т. е. до тех пор пока весь материал не превратится в пар, который не будет откачен насосом, вакуум в системе будет определяться концентрацией молекул паров в равной степени с концентрацией молекул остаточных газов.

Следует помнить, что нет неиспаряющихся материалов, материалы отличаются только концентрациями насыщенных паров. Человеческое обоняние чувствует концентрации около (10^{14} — 10^{15}) мол.·м⁻³, что находится на уровне чувствительности многих современных масс-спектрометров, измеряющих парциальные составы остаточного газа [2, с. 321]. Значит, если увеличить чувствительность, окажется, что все материалы «пахнут», и над их поверхностями на расстояниях, соответствующих молекулярной или атомарной адсорбции, «висит», по крайней мере, монослой сорбированных молекул пара. При достижении состояния насыщения наступает равновесие по числу испаряющихся (сублимирующихся) и конденсирующихся в монослой (десублимирующихся) молекул.

Зависимость величины молекулярной концентрации газов и насыщенных паров от температуры описывается термодинамическим уравнением Клапейрона—Клаузинга [1, с. 23], и она лежит в основе действия всех **криогенных насосов**, т. е. при температуре 20 К концентрации всех основных газов и паров в вакуумных системах соответствуют условиям высокого и сверхвысокого вакуума (см. приложение).

Возвращаясь к температурной зависимости процессов сорбции—десорбции, следует добавить, что при повышении температуры вакуумной системы растет не только скорость десорбции, но и скорость испарения, что увеличивает газовую нагрузку средств откачки дополнительно. Снижение температуры снижает и скорость испарения, что смещает условия равновесия над по-

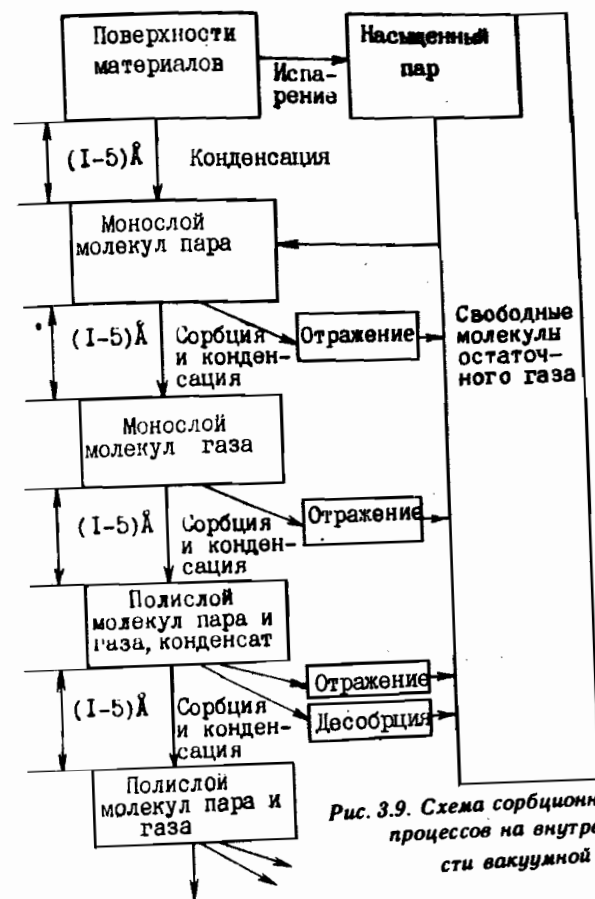


Рис. 3.9. Схема сорбционно-десорбционных процессов на внутренней поверхности вакуумной системы

верхностью в область пониженных концентраций паров материала поверхности и, следовательно, улучшает степень получаемого вакуума.

Общая схема процессов, происходящих на внутренней поверхности вакуумной системы, изображена на рис. 3.9. Видно, что над поверхностью расположены разделенные зазорами (1—5) Å слои сорбированных молекул и атомов газов и паров, находящихся в упругих связях с верхними и нижними слоями и колеблющихся между собой. Все эти слои, отдельные молекулы и атомы колеблются и, в принципе, готовы перейти как в нижний слой при возникновении вакансии или в результате диффузии из-за разности в концентрациях, так и в верхний слой, разрывая сложившиеся связи (десорбируясь).

3.2.3. Газовыделение материалов

В учебном пособии проф. Е. К. Малышева [22] рассматриваются свойства материалов растворять в себе различные газы, которые затем могут диффундировать из толщи материала к его поверхности и десорбироваться с ней. С точки зрения наблюдателя, «находящегося» в вакууме, десорбция газов с поверхности не имеет никаких особенностей, связанных с предысторией этих молекул в сорбированном состоянии. Все они, переходя в свободное состояние, являются компонентами газовой нагрузки для насоса, а их количество определяет степень достигаемого вакуума, что и отражено на рис. 3.6.

При проектировании вакуумной системы вопросы учета и уменьшения десорбционной газовой нагрузки можно разделить на следующие группы:

- 1) выбор «вакуумных материалов», обладающих минимальными величинами газосодержания и концентрациями насыщенных паров в диапазоне заданных температур;
- 2) обеспечение условий **очистки** поверхностей вакуумной системы любым известным [22] способом;
- 3) учет парциального состава газовыделений на разных стадиях откачки;
- 4) уменьшение потока газопроницаемости сквозь стенки, особенно при учете температуры прогрева вакуумной системы;
- 5) обеспечение специальных **условий хранения** (транспортировки) элементов вакуумной системы до ее сборки и откачки (технология изготовления).

Явление растворения газов в материалах называется **абсорбцией**, а материалы с высокой способностью растворять газы — **абсорбентами**. Известны абсорбционные насосы, в которых это явление находит положительное практическое применение, но при откачке вакуумной системы десорбция ранее адсорбированных молекул значительно увеличит время откачки, так как процессы диффузии газа из толщи материала медленные [15, с. 63—77].

На рис. 3.10 изображена полученная Г. Л. Саксаганским кинетическая кривая удельного потока газовыделения при длительной откачке материала, помещенного в вакуумную систему. Кривая состоит из трех характерных участков.

I участок — его можно аппроксимировать функцией вида

$$q(t) = q_{\text{нач}} \left(1 - (1 - q_0/q_{\text{нач}}) t/t_0 \right),$$

где q — удельный поток молекул с поверхности материала, ранее адсорбированных в полислоях, определяемый условиями хранения материала или длительностью экспонирования материала на атмосферном воздухе; парциальный состав этого потока — в основном пары воды (90 %);

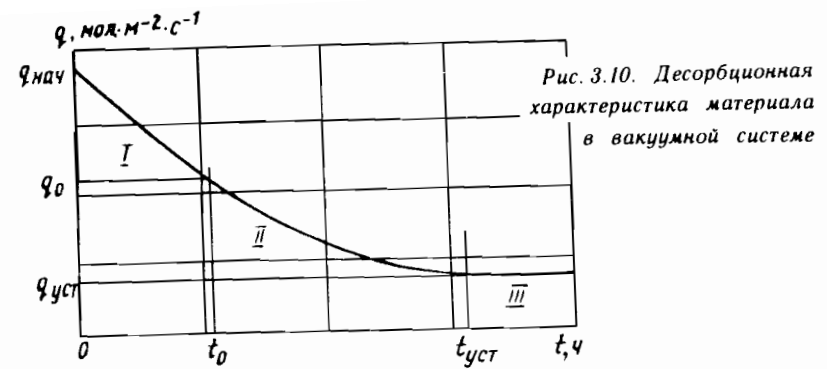


Рис. 3.10. Десорбционная характеристика материала в вакуумной системе

q_0 — табличное значение начального удельного значения потока, десорбирующегося с поверхности материала [15, с. 466], для необработанной нержавеющей стали $q_0 \approx 10^{18}$ мол./($\text{с} \cdot \text{м}^2$), парциальный состав: пары воды, водород и основные газы, составляющие атмосферный воздух; длительность интервала $(0 - t_0) \sim 10$ ч.

II участок — аппроксимируется степенной функцией вида:

$$q(t) = q_0 t^{-\alpha},$$

где $\alpha = \frac{\ln(q_0/q_{\text{уст}})}{\ln t_0}$ — характеристика материала;

$q_{\text{уст}}$ — установившийся удельный поток газовыделения материала после длительной вакуумной температурной тренировки; (для нержавеющей стали $q_{\text{уст}} \approx 10^{14}$ мол./($\text{с} \cdot \text{м}^2$); парциальный состав — водород 98 %); длительность интервала $(t_0 - t_{\text{уст}}) \sim 100$ ч.

III участок — стационарное газовыделение с практически неизменяющимся во времени удельным потоком $q_{\text{уст}}$.

Зависимость, изображенная на рис. 3.10, и данные табл. 3.1 позволяют сделать следующий вывод:

на первом этапе вакуумной откачки удаляются молекулы, **адсорбированные** в слоях, сильно удаленных от поверхности, и имеющие малую энергию связи с ней;

на втором этапе вакуумной откачки (возможно с дополнительным прогревом системы) удаляются диссоциирующие на атомы молекулы, находящиеся в **хемосорбированном состоянии**;

на третьем этапе вакуумной откачки происходит удаление ранее **абсорбированных** в толще материала молекул и молекул, проникающих сквозь стенки вакуумных камер.

Для непрогретых вакуумных систем характерно преоблада-

Таблица 3.1

Результаты вакуумной температурной тренировки системы,
изготовленной из нержавеющей стали

Режим откачки	Время, ч	p_z	p_{H_2}	p_{H_2O}	p_{CO}
		мол · м ⁻³			
Перед прогревом	1	7,8E + 4	5E + 3	4E + 14	4E + 13
	5	2E + 14	1,5E + 13	6,5E + 13	1E + 13
	10	7,3E + 13	8E + 12	3,5E + 13	4E + 12
	20	3,5E + 13	4,6E + 12	2E + 13	3E + 12
Прогрев (773 K)	1	9,5E + 15	6,8E + 15	1E + 14	2,2E + 15
	5	2E + 15	1,8E + 15	—	2E + 14
	10	1E + 15	7,3E + 14	—	6E + 13
	50	6E + 13	5E + 13	—	1E + 13
После прогрева	1	2,4E + 12	2,3E + 12	4,6E + 10	4E + 10
	5	6,8E + 11	5,4E + 11	—	9E + 9
	10	3,5E + 11	2,5E + 11	—	—
	20	1,8E + 10	—	—	—

ние в спектре остаточных газов паров воды, для сверхвысоковакуумных систем — водорода и продуктов синтеза новых элементов на различных катализаторах, накаливаемых катодах (CO, CH₄).

Все рассмотренные выше процессы десорбции могут быть интенсифицированы путем прямой передачи энергии сорбированным молекулам вместо косвенной передачи тепла через материал поверхности, при этом можно снизить общее время получения требуемого вакуума в системе. В этом случае процесс очистки поверхностей будет напоминать процесс вытрясывания и выбивания пыли.

Для систем с экстремально высоким вакуумом применяют алюминиевые сплавы в качестве материала для стенок камер. Хотя они и не могут прогреваться до столь высоких температур, как нержавеющая сталь, но значение q_0 у алюминиевых сплавов значительно ниже, чем у стали (ориентировочно равны $q_{уст}$ стали).

Очевидно, что при длительной откачке вакуумной системы именно величина $\sum q_{уст,i} A_i$ (где i — количество материалов, обращенных в вакуум, A_i — площадь поверхности этих материалов) и определит предельную степень достигаемого вакуума при заданных характеристиках средств откачки. Это объясняется тем,

что все прочие источники газовой нагрузки будут исчерпаны, и медленная диффузия молекул водорода из толщи материала явится основным поставщиком молекул, поступающих в вакуумную систему (не учитывая молекул паров самих материалов).

3.3. ОТКАЧНЫЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДУЛИ

3.3.1. Совместная работа средств откачки

Можно рассматривать насос (средство откачки) как «черный ящик», имеющий вход и выход, на которых практически одновременно исчезают и появляются молекулы остаточного газа. Поскольку исчезают и появляются молекулы в единицу времени определенное количество молекул, то следует говорить об обеспечении постоянного потока молекул, то есть при последовательном движении потока во всем тракте откачки, т. е. при последовательном соединении насосов компримирующего действия (насосов, работающих по принципу компрессора, в которых поток формируется в направлении более высокой концентрации) следует согласовать в направлении более высокой концентрации молекул, приватив их по величинам потоков или по количеству молекул, присутствующих в данный момент времени на выходе первого и на входе последующего насосов. Это означает, что насос как «черный ящик», кроме параметра «величина пропускаемого потока» (производительность насоса), обладает важной характеристикой — коэффициентом компрессии или способностью противостоять обратному направленному потоку диффузии, возникающим из-за перепада концентрации на входе и выходе насоса. По существу, коэффициент компрессии определяет возможность насоса служить разделительно-согласующим устройством для разных степеней вакуума. Чем шире диапазон концентраций, в котором работает насос, тем проще система откачки. Современные насосы имеют рабочий диапазон около 70 дБ (коэффициент компрессии при нулевом потоке около 10^7), что примерно в два раза уже, чем необходимо для получения сверхвысокого вакуума одним насосом. Общий коэффициент компрессии цепочки последовательно соединенных насосов определяется как произведение их коэффициентов компрессии.

Схематическое изображение ступенчатой откачки с помощью m насосов (или ступеней откачки) приведено на рис. 3.11. Поскольку величина концентрации растет по мере удаления от объема V_m , а количество молекул, проходящих насосом N в единицу времени, постоянно, то объемы должны удовлетворять условию: $V_m > V_{m-1} > \dots > V_2 > V_1$; что нашло отражение, во-первых, во всех конструкциях многоступенчатых насосов и, во-вторых, в размерах входных отверстий насосов, рассчитанных на работу при разном вакууме — размер тем больше, чем лучше вакуум.

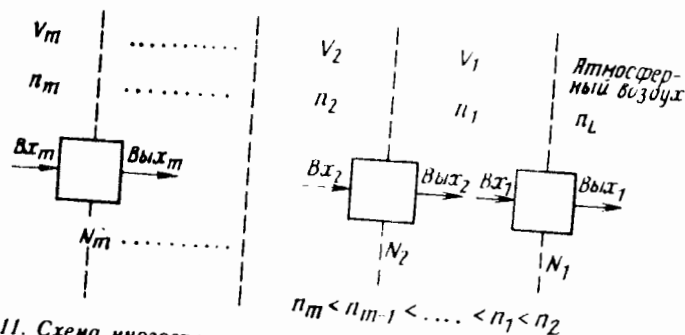


Рис. 3.11. Схема многоступенчатой системы откачки объема V_m до предельной концентрации p_m

Применение насосов, удаляющих молекулы из вакуумной системы в атмосферу (объемных), всегда оставляет некую долю риска «обратного прорыва» молекул из области с высокой молекулярной концентрацией в область с низкой концентрацией (существует вероятность возникновения диффузионного потока, направленного обратно потоку откачки). Кроме того, они более сложны в сравнении с насосами, сорбирующими молекулы, и, следовательно, имеют большее количество материалов, выделяющих пары. Это привело к тому, что в сверхвысоковакуумных системах объемные насосы используются только для предварительной откачки и подключаются параллельно сорбционным насосам.

При одновременном параллельном подключении насосов качество получаемого вакуума всегда определяется «худшим» из насосов, т. е. следует согласовывать насосы по величинам предельно достижимых на их входах концентраций, в противном случае «лучший» из насосов будет откачивать «худшие» и целесообразность их установки может состоять лишь в уменьшении общего времени откачки, но не в достижении лучшего вакуума.

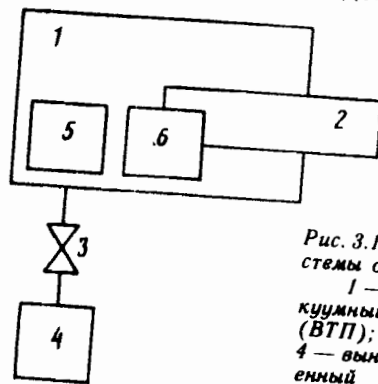


Рис. 3.12. Схема оптимизации системы откачки:
1 — вакуумная камера; 2 — вакуумный технологический процесс (ВТП); 3 — вакуумная арматура; 4 — вынесенный насос; 5 — встроенный насос; 6 — насос, функционально интегрированный с ВТП

Рис. 3.12 иллюстрирует различные варианты организации системы откачки. С точки зрения характеристик вакуумной системы, наилучшим является вариант 6, в котором насос не только встроен в камеру, что обеспечивает высокую скорость ее откачки, но и использует какие-то элементы технологического процесса для своей работы (например, магнитные или электрические поля, систему охлаждения и т. п.).

3.3.2. Измерения в вакуумных системах

К 1985 г. было известно 30 типов различных манометров, измеряющих «полное давление» остаточного газа. Реально все высоковакуумные манометры измеряют молекулярную концентрацию газа. Причем при наличии в вакуумной системе молекулярных потоков и полей молекулярных концентраций показания манометра зависят, во-первых, от координаты его установки, во-вторых, от способа его подключения к установке, так как в трубке может устанавливаться собственное распределение молекул, и, в-третьих, от его ориентации, например, относительно суммарного потока переноса молекул.

Из сказанного вытекает, что очень трудно, используя известные манометры, рассчитанные на измерения неких средних по системе параметров вакуума, измерить реальную ситуацию в вакуумной системе. Идеально было бы иметь миниатюрный манометр ненаправленного типа, который с помощью какого-либо манипулятора мог бы сканировать внутреннее пространство вакуумной системы, измеряя при этом не только количество молекул в зоне своего действия, но и направление вектора средней скорости этих молекул. Подобный этому векторный манометр был изобретен в Японии*, но использование его на практике очень затруднительно и свелось к поиску места течей.

В сверхвысоковакуумных системах без криогенных средств откачки, где направленные потоки молекул очень малы при достижении в них квазиравновесия, применяются ионизационные манометры Байярда—Альперта — единственный тип манометров, работающих в таком вакууме (измеряемый ионный ток около 0,5 пА).

В настоящее время промышленные манометры позволяют измерять молекулярные концентрации вплоть до 10^{10} мол.·м⁻³ и, к сожалению, имея в своей конструкции нагретый катод, приводят к увеличению десорбции Н₂ синтезу метана и окиси углерода, к откачке кислорода и водорода, диссоциирующих на катоде, т. е. манометры оказывают воздействие на параметры ва-

* Аракава, Цудзи. «Направленный вакуумметр», J. Vac. Soc. of Japan, 1983, V. 26, 12.

куумной системы, а результаты измерений, проведенных с их помощью, очень неточны.

Очевидно, что методика измерений, связанная с ионизацией нейтральных молекул, последующим сбором образованных ионов на коллекторе и измерении тока во внешней цепи при нейтрализации заряда собранных ионов, ведет к потере информации о направлении движения молекул до их ионизации.

Как сказано в работе [9], в основу измерения параметров и характеристик остаточного газа могут быть положены явления молекулярного переноса в вакуумных системах, возникающие при введении в вакуумную систему некоторого возмущения: по концентрациям молекул, температурам или скоростям. Согласно второму закону термодинамики система молекул будет стремиться «уничтожить» эти возмущения — выровнять условия в системе (приобрести максимум энтропии), для чего в системе возникнут направленные молекулярные потоки, причем скорость переноса в этих потоках может быть контролируема и независима от средней скорости переноса в системе.

Манометр вязкостного типа, имеющий вращающийся ротор в виде подвешенного в магнитном поле шарика, который тормозится за счет бомбардировки молекулами остаточного газа, позволяет измерять концентрации вплоть до 10^{13} мол. · м⁻³ и считается наиболее перспективными для сверхвысоковакуумных систем [6, с. 187], но не удовлетворяет требованиям, сформулированным для идеального манометра.

В принципе вакуум можно контролировать и без манометров, используя для этого определенные параметры (или характеристики) вакуумного технологического процесса. Например, в ускорителях таким параметром может быть качество ускоряемого пучка заряженных частиц, в напылительных установках и в установках для исследования поверхностей — чистота поверхностей или время образования монослоев сорбированного газа.

Нерешенной проблемой в современной вакуумной технике является градуировка манометров. Дело в том, что существующие градуировочные установки требуют демонтажа манометров с вакуумной системы, и тем самым изменяются условия, в которых работает манометр. Иначе, если в системе существуют молекулярные потоки, что всегда происходит на практике, результат градуировки лишь очень условно можно отнести к манометру в конкретном месте конкретной вакуумной системы. Кроме того, невозможно регулярно демонтировать манометры на огромных вакуумных системах, используемых, например, в физических исследованиях, для их градуировки.

Все сказанное выше в равной степени относится к измерителям парциального состава остаточного газа, в качестве которых обычно используются различные масс-спектрометры.

1. Пропускная способность элементов вакуумного тракта

1. При высоковакуумной откачке прямых длинных цилиндрических трубопроводов:

$$C = \frac{1}{6} \sqrt{2\pi \frac{RT}{M} \frac{D^3}{L}},$$

где C — пропускная способность; D — диаметр; L — длина трубопроводов;

для воздуха при 293 К:

$$C_0 = 12,1 D^2 \frac{D}{L},$$

где $[C] = \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$, $[D] = \text{см}$, $[L] = \text{см}$.

При $\frac{L}{D} \leq 20$

$$C_0 = \alpha 12,1 D^2 \frac{D}{L},$$

где α — фактор коррекции Клаузинга, зависимость которого от отношения L/D приведена на рис. П.1.

2. При высоковакуумной откачке диафрагмы с диаметром отверстия D_0 :

$$C = 9,1 D_0^2,$$

где $[C] = \text{л} \cdot \text{с}^{-1}$, $[D] = \text{см}$.

При откачке диафрагмы с установленным перед ней отрезком цилиндрического трубопровода, диаметр которого D больше диаметра диафрагмы D_0 :

$$C = 9,1 D_0^2 \frac{1}{1 - D_0^3/D^3}, \quad \text{л} \cdot \text{с}^{-1}, \text{ см},$$

т. е. получаем увеличение пропускной способности диафрагмы за счет фокусировки молекулярного потока.

3. При откачке последовательно соединенных элементов с пропускными способностями C_1 , C_2 , C_3 и т. д.:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots$$

При откачке параллельно соединенных элементов:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

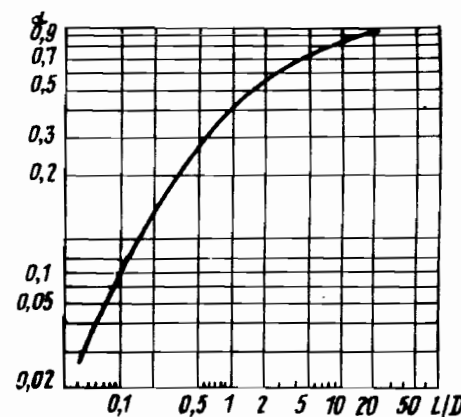


Рис. П.1. Зависимость фактора коррекции Клаузинга от длины трубопровода

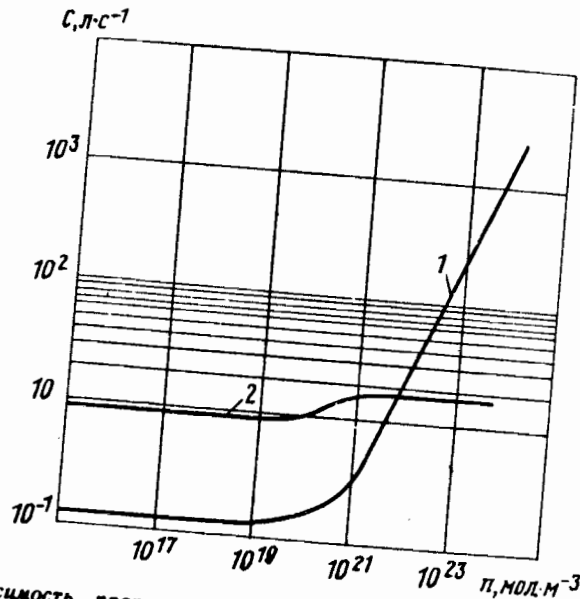


Рис. П.2. Зависимость пропускной способности от величины молекулярной концентрации для воздуха при 293 К: 1) $L=10$ см, $D=1$ см; 2) $D=1$ см

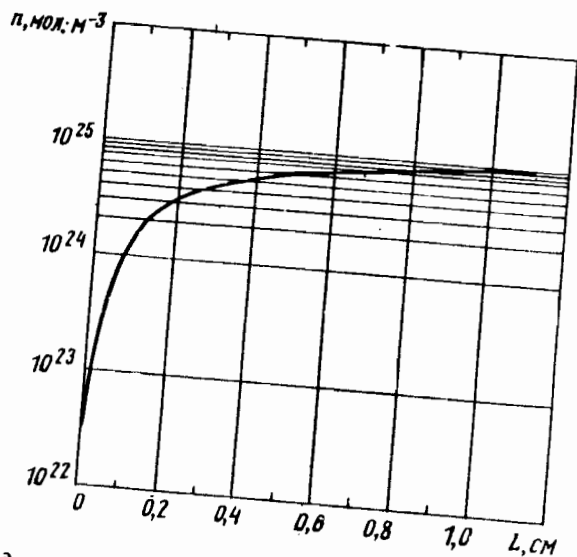


Рис. П.3. Продольный профиль молекулярной концентрации газа в капилляре (длина L , диаметр 10^{-3} см; воздух, 293 К)

4. Зависимость пропускной способности от величины молекулярной концентрации или от степени вакуума приведена на рис. П.2, где кривая 1 рассчитана для цилиндрического прямого трубопровода, кривая 2 — для диафрагмы.

В области низкого вакуума пропускная способность трубопровода зависит от некой средней концентрации молекул газа в нем. На рис. П.3 приведен продольный профиль концентрации в капиллярном канале. Видно, что средняя концентрация в основном определяется величиной максимальной концентрации на одном из концов капилляра. В примере рассмотрена течь, открытая на атмосферный воздух.

Пропускная способность диафрагмы при низком вакууме не зависит от концентрации газа и от перепада концентраций в случае, если $n_1/n_2 \ll 0,53$, где n_1 и n_2 — концентрации по обеим сторонам диафрагмы.

2. Состав атмосферного воздуха

Атмосферный воздух представляет собой смесь газов и паров. Ориентировочное представление о составе воздуха на уровне моря дает табл. П.1. До высоты ~ 100 км состав атмосферного воздуха изменяется незначительно. На высоте 100 км молекулярные азот и кислород переходят в атомарное состояние. На высоте свыше 10000 км воздух состоит главным образом из молекулярного водорода и гелия. Еще выше увеличивается содержание ионов.

Таблица П.1

Газ (пар)	Символ	Молекулярная масса	Процентное содержание, %	Парциальная концентрация мол. · м ⁻³	Масса, × 10 ²⁴ г	Диаметр молекул, нм
Азот	N ₂	28	78,1	$2,1 \cdot 10^{25}$	46,5	0,38
Кислород	O ₂	32	21	$5,6 \cdot 10^{24}$	53,1	0,365
Аргон	Ar	40	0,93	$2,5 \cdot 10^{23}$	66,3	0,36
Двуокись углерода	CO ₂	44	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{22}$	73,1	0,46
Неон	Ne	20	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{20}$	33,5	0,27
Водород	H ₂	2	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{20}$	2,35	0,27
Гелий	He	4	$5,10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{20}$	6,65	0,22
Метан	CH ₄	16	$2,10^{-4}$	$5 \cdot 10^{19}$		
Криптон	Kr	84	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	139	0,42
Закись азота	N ₂ O	44	$5,10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{19}$		
Ксенон	Xe	131	$9,10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{18}$	248	0,49
Озон	O ₃	48	$7,10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{18}$		
Водяной пар	H ₂ O	18	1,6	$4,3 \cdot 10^{23}$	29,9	0,465

Содержание водяных паров переменнo и зависит от места и времени. В таблице приведены параметры пара при 50 % влажности. Парциальный вклад концентрации паров воды добавляется к сумме компонентов воздуха.

3. Конденсация паров и газов

Зависимости величин молекулярной концентрации газов и насыщенных паров от температуры приведены на рис. П.4.

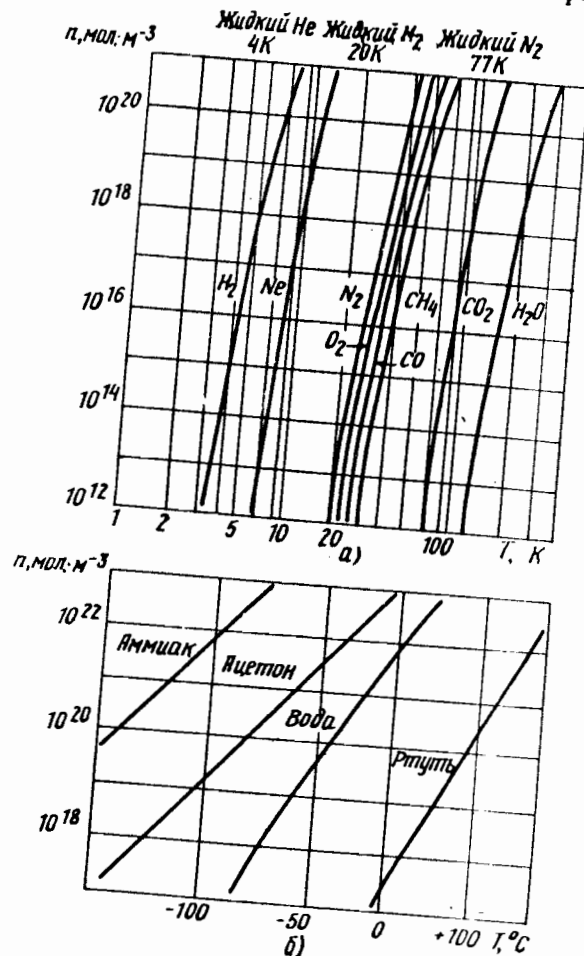


Рис. П.4. Зависимость концентраций насыщенных паров (а) и конденсирующихся газов (б) от их температуры

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника». 2-е изд. М.: Высшая школа, 1990.
2. Вакуумная техника: Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Миняйчев, Т. А. Александрова и др.; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Миняйчева. М.: Машиностроение, 1985.
3. Саксаганский Г. Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М.: Атомиздат, 1980.
4. Глазков А. А., Саксаганский Г. Л. Вакуум электрофизических установок и комплексов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. С. 11—26, 471—513.
6. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума / Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
7. Modern vacuum practice: design, operation, performance and applications of vacuum equipment / ed. G. F. Weston // Vacuum. 1987. V. 37. № 8/9. P. 581—717.
8. Саксаганский Г. Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 35—78.
9. Шестак В. П. Метрологические аспекты физики вакуума: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1983.
10. Савельев И. В. Курс физики: Учеб. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1989.
11. Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех: Молекулы. 5-е изд., испр. М.: Наука, 1982.
12. Ашкинази Л. А. Вакуум для науки и техники. М.: Наука, 1987 (6-чка «Квант», вып. 58).
13. Кузьмин В. В., Левина А. Е., Творогов И. В. Вакууметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течения. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 175—182.
14. Черепини Н. В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Сов. радио, 1973.
15. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. 3-е изд., перер. и доп. М.: Энергия, 1979. С. 88—150.
16. Быков Д. В., Лясников В. Н., Филимонов С. А. Плазменные нераспыляемые газопоглотители в производстве изделий электронной техники // Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ «Электроника», 1989. Сер. 7. Вып. 1. С. 1423.
17. Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985.
18. Грошковский Я. Техника высокого вакуума / Пер. с польск. М.: Мир, 1975.
19. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1985. С. 84—145.
20. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа: в задачах с решениями. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1985. С. 7—68.
21. Шестак В. П. Средства откачки (тексты лекций по курсу «Вакуумная техника»). М.: МИФИ, 1980.
22. Малышев Е. К. Технология электрофизического аппаратостроения: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1988.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
1. Технический вакуум. Понятия	8
1.1. Вакуумно-зависимые процессы	8
1.2. Основные параметры и характеристики вакуума	11
1.2.1. Давление	11
1.2.2. Длина свободного пробега молекул	14
1.2.3. Молекулярная концентрация	15
1.2.4. Парциальный состав	16
1.2.5. Газовые законы	17
1.3. Вакуумные системы	18
1.3.1. Быстрота действия насоса	19
1.3.2. Поток молекул	19
1.3.3. Проводимость элементов тракта	20
1.3.4. Откачка системы	21
1.3.5. Измерения параметров вакуума	23
2. Поведение газов в вакуумных системах	24
2.1. Термодинамика вакуума	24
2.1.1. Молекулярная физика и термодинамика	24
2.1.2. Термодинамические процессы в вакуумной технике	26
2.1.3. Термодинамическая модель вакуума	31
2.2. Статистическая физика и вакуум	33
2.2.1. Функция распределения молекул в вакуумной системе	33
2.2.2. Кинетическое уравнение Больцмана	36
2.3. Движение молекул и молекулярные потоки	38
2.3.1. Продольные профили концентрации остаточного газа	41
2.3.2. Поперечные профили концентрации остаточного газа	43
2.4. Методы анализа движения молекул в вакуумных системах	45
2.4.1. Метод потока в сплошных средах	45
2.4.2. Кинематический метод	46
2.4.3. Кинетический метод	48
3. Основы проектирования вакуумных систем	52
3.1. Моделирование вакуумной системы	52
3.1.1. Структурная схема вакуумной системы	52
3.1.2. Принципиальная схема типовой вакуумной системы	55
3.1.3. Алгоритмы проектирования и расчета	57
3.2. Учет газовой нагрузки	62
3.2.1. Компоненты нагрузки	62
3.2.2. Сорбция — десорбция молекул	65
3.2.3. Газовыделение материалов	74
3.3. Откачные и диагностические модули	77
3.3.1. Совместная работа средств откачки	77
3.3.2. Измерения в вакуумных системах	79
Приложение	82
1. Пропускная способность элементов вакуумного тракта	82
2. Состав атмосферного воздуха	83
3. Конденсация паров и газов	85
Список использованной литературы	86

Шестах Валерий Петрович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Редактор и технический редактор
Е. Н. Кочубей
Корректор Г. А. Станкевич

Тем. план 1991 г., поз. 25

Подписано в печать 27.02.92 Формат 60×84 1/16. Изд. № 033—1.
Печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 250 экз. Заказ 1455
Издание подготовлено на ЭВМ с использованием микросистемы
ДИАФОРМ—МИФИ

Московский инженерно-физический институт. Типография МИФИ.
115409, Москва, Каширское шоссе, 31