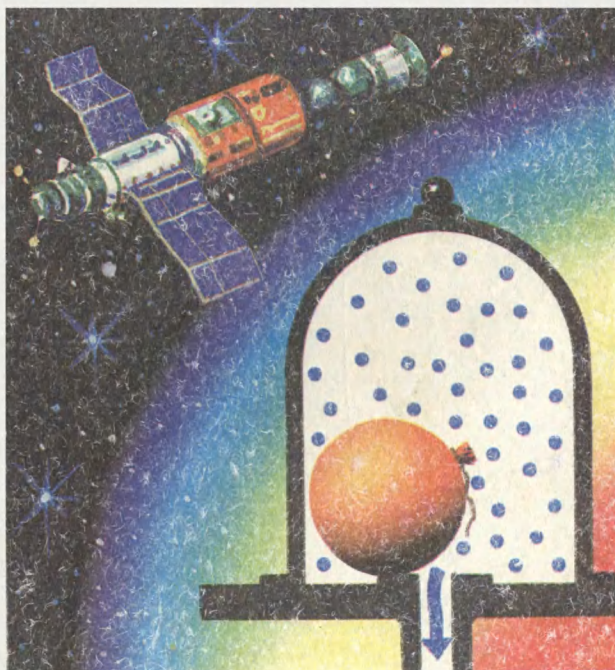




БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •  
выпуск 58

Л. А. АШКИНАЗИ

# ВАКУУМ ДЛЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ





**БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •**  
**выпуск 58**

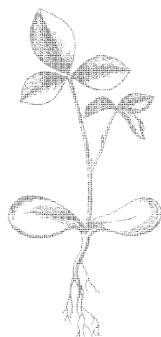
---

**Л. А. АШКИНАЗИ**

# **ВАКУУМ ДЛЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ**



**МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1987**



Scan AAW

ББК 31.77  
А98  
УДК 621.691.3 (023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Ю. А. Осипьян** (председатель), академик **А. Н. Колмогоров** (заместитель председателя), профессор **Л. Г. Асламазов** (заместитель председателя), кандидат физ.-мат. наук **А. И. Буздин** (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР **А. А. Абрикосов**, академик **А. С. Боровик-Романов**, академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР **Б. В. Воздвиженский**, академик **В. Л. Гинзбург**, академик **Ю. В. Гуляев**, академик **А. П. Ершов**, профессор **С. П. Капица**, академик **А. Б. Мигдал**, академик **С. П. Новиков**, академик АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, профессор **Я. А. Смородинский**, академик **С. Л. Соболев**, член-корреспондент АН СССР **Д. К. Фаддеев**

Ответственный редактор выпуска **А. В. Митрофанов**

**Ашкинази Л. А.**

**А98** Вакуум для науки и техники. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 128 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 58.)

25 к. 104 500 экз.

Популярно рассказано о том, что такое вакуум, когда и как возникло это понятие и как развивалась вакуумная техника в дальнейшем. Рассмотрены процессы на поверхности твердых тел, процессы в разреженных газах и некоторые из процессов, происходящие в объеме вещества и существенные для работы вакуумных приборов и установок. Рассказано о том, как получают и измеряют вакуум, о применении вакуума в технике и науке, о взаимодействии вакуумной техники и вакуумной физики с другими областями техники и науки.

Для школьников и преподавателей.

**А 1704040000 — 036**  
**053(02)-87** 155-86

**ББК 31.77**

© Издательство «Наука».  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1987

## ЧТО ТАКОЕ ВАКУУМ И НЕМНОГО ИСТОРИИ

Вакуум, как его понимают в технике, — это сильно разреженный газ. Приборы и устройства, в которых тем или иным образом используется вакуум, широко применяются в самых разных областях науки и техники. О вакууме и его применении пойдет речь в этой книге.

Вакуум был известен еще в далекой древности. Считается, что первые приборы для получения разреженного воздуха были созданы греческими учеными из Александрии Ктесибием (I век до н. э.) и Героном (I век н. э.). Но долгое время их приборы оставались лишь забавными игрушками — достаточно насущной потребности в вакуумной технике у человечества не возникало вплоть до начала XIX века. В Энциклопедическом словаре Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона (13 издание, 1890 г.) и Энциклопедическом словаре Гранат (11 издание, 1910 г.) вакууму отведено примерно 0,0002 % объема. Доля места, выделяемая этой теме в энциклопедиях, стремительно увеличивается между 1910 и 1930 гг., достигая 0,01 % в Большой Советской Энциклопедии (БСЭ, 1 издание). Далее медленно увеличивается еще в 3 раза к 1950 г. (Американская энциклопедия, 22 издание и БСЭ, 2 издание) и затем почти не изменяется вплоть до 1970 г. (Британская энциклопедия, 15 издание и БСЭ, 3 издание).

Вакуум нашел свое место, «определился».

Основной рост объема статей о вакууме в энциклопедиях, пришедшийся на первую треть нашего века, был связан с созданием электровакуумных приборов — ламп накаливания, электронных ламп, кинескопов. Умение достигать высокой степени разрежения газа позволило физикам сделать в конце XIX — начале XX века ряд открытий. Так, например, Т. А. Эдисоном в 1883 г. была открыта термоэлектронная эмиссия и после нескольких лет исследований, проводившихся разными учеными, О. Ричардсоном в 1903 г. были установлены ее основные закономерности. А в 1915–1916 гг. И. Ленгмюр нашел законы, которым подчиняются взаимодействие газа с твердым телом и прохождение тока в вакууме.

Именно тогда, на заре XX века, были созданы прообразы многих типов современных насосов. А. Малиньяни применил связывание в замкнутом сосуде молекул газа парами фосфора с образованием нелетучих соединений. Дж. Дьюар осуществил разрежение газа путем поглощения его активированным углем, охлаждаемым жидким азотом, В. Гедэ разработал ротационный ртутный насос и молекулярный насос, В. Гедэ, И. Лемгмор и С. А. Боровик — ртутные диффузионные насосы, К. Бэрг — паромасляный диффузионный насос. Со всеми этими типами насосов мы еще познакомимся в книге. В те же годы были созданы основные типы приборов для измерения вакуума — компрессионный (Г. Мак-Леод), тепловой (М. Пирани) и ионизационный (О. Бакли) манометры. Без этих насосов и приборов, а также без развития теории вакуумных приборов не получило бы широкого распространения ни электрическое освещение, ни радио, ни телевидение. Трудно представить себе, как выглядела бы в этом случае сейчас человеческая цивилизация. Развитие вакуумной техники позволило установить к концу первой трети нашего столетия наличие трех элементарных частиц — протона, нейтрона, электрона.

Вторая волна бурного развития вакуумной науки и техники была связана с созданием крупных ускорителей, установок для получения управляемого термоядерного синтеза и для имитации космического пространства. За первую треть XX века вакуумная техника прошла путь от настольных установок и небольших приборов, давление в которых составляло 0,01 атмосферного, до установок таких же размеров, но в которых достигалось давление на восемь порядков ниже атмосферного. Во второй трети XX века был совершен переход от настольных приборов к установкам, внутри которых можно поставить не то что стол, но даже небольшой домик. За рубежом с 70-х годов объем производства вакуумной техники растет на 30 % в год, т. е. в 5 раз быстрее, чем общий объем промышленного производства \*).

Если приглядеться повнимательнее, то в истории развития вакуумной техники можно выделить три основных направления: 1) улучшение вакуума (т. е. уменьшение давления газа или концентрации его молекул), 2) увеличение размеров вакуумных приборов и 3) увеличение потоков газа, удаляемого из приборов и установок. Второе и третье направления взаимосвязаны. Казалось бы, размеры сосуда влияют только на время

---

\*) Цейтлин А. Б. Современное состояние и перспективы развития вакуумной техники. Обз. инф. Серия ХМ-6: Криогенное и вакуумное машиностроение. — М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1986.

удаления из него газа (откачку) — из большего сосуда придется откачивать дольше. Но это не совсем так. Задача достижения очень малого давления газа — получение так называемого высокого вакуума — состоит не только в том, чтобы просто удалить молекулы газа из сосуда и затем поплотнее его закупорить. Необходимо еще и уметь поддерживать в нем это сильное разрежение среды. Все мы знаем из опыта — если из банки с вареньем съесть все варенье, то бесполезно ждать, пока она наполнится сама. С вакуумом ситуация принципиально иная, и скоро мы узнаем, почему. Процесс «порчи» вакуума настолько важен, что часто говорят не о получении вакуума, а о его получении и поддержании. Потоки газа, которые поступают в установки больших размеров, обычно больше, чем в маленькие. Поэтому проблема больших установок и проблема удаления больших потоков газа часто возникают одновременно.

Существует много самых разных вакуумных приборов, и поэтому многообразны задачи, которые приходится решать при создании этих приборов. Рассказ о вакуумных приборах и связанных с их созданием проблемах разделен в этой книге на четыре части. Почему на четыре?

Если условно разделить приборы на малые и большие, а также на высоко- и низковакуумные, то получится как раз четыре группы приборов, каждая со своими характерными особенностями. Начнем с начала.

## ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ НЕБОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ С НЕВЫСОКИМ ВАКУУМОМ

### 1. Долго ли можно бежать в лесу по прямой?

Естественно, что именно с небольших приборов с невысоким вакуумом начиналась вакуумная техника. Но не надо относиться к ним пренебрежительно — всегда надо с чего-то начинать. Например, термос и электрическая лампочка, которые широко используются в быту, — именно такие приборы.

Каковы основные свойства вакуума? Они определяются малой концентрацией молекул. Раз концентрация молекул мала, то любая частица (например, электрон, атом или молекула) будет долго перемещаться в пространстве, не сталкиваясь с другими частицами. Путь, пройденный частицей без столкновений, называется длиной свободного пробега. В вакууме длина свободного пробега велика. Сильно разреженная газовая среда химически инертна, поскольку молекул в единице ее объема мало. Все химические реакции с участием молекул газа протекают в вакууме очень медленно. Например, раскаленный металл быстро окисляется на воздухе, но в вакууме в реакцию окисления практически не вступает. Свойство вакуумной среды оказывать слабое механическое сопротивление движущимся в ней телам и почти не участвовать в процессах теплопередачи также, естественно, определяется малостью концентрации частиц. Множество самых разнообразных приборов и устройств создано на основе этих свойств вакуума.

Большая длина свободного пробега используется в электронных приборах, например в кинескопах телевизоров. Действительно, не будь длина свободного пробега большой, электроны начали бы сталкиваться с молекулами (рассеиваться или вступать во взаимодействие) и пучок электронов, который, собственно, и заставляет экран светиться в определенной точке, перестал бы существовать, не достигнув его поверхности.

Химическая инертность используется в тех же электронных приборах — почти в любом из них есть металлические детали, имеющие настолько высокую температуру, что на воздухе они бы практически мгновенно окислились, т. е. «сгоре-

ли». В металлургии и химии вакуум также используется для того, чтобы можно было сильно нагреть то или иное вещество без риска окислить его.

Теплоизолирующие свойства вакуума позволяют использовать его в разных устройствах, нуждающихся в теплоизоляции, например в термосе и даже в горнолыжных очках (в некоторых моделях между внутренней и внешней пластинками из цветной пластмассы имеется вакуум). Такие очки не обмерзают.

Движущееся тело не теряет скорости, если в своем движении оно не испытывает сопротивления среды. Поэтому в вакуум помещают особо чувствительные весы и гироскопические системы. Множество искусственных спутников и космических станций летают вокруг Земли за пределами ее атмосферы, демонстрируя тем самым эффект малого сопротивления движению тел в вакууме. Использует это свойство и сама Земля. Хорошо, что она летит в вакууме, не правда ли?!

Для того чтобы лучше почувствовать, что такое вакуум, оценим, какой степени разрежение воздуха необходимо получить в кинескопе, чтобы электроны благополучно добирались от своего источника (катода) до поверхности экрана. Пусть пучку электронов надо преодолеть расстояние 0,3 м, и мы хотим, чтобы при этом терялось не более  $1/30$  доли всех электронов. Двигаясь в газе, электроны сталкиваются с молекулами, отклоняясь от заданного направления. Пусть в газ влетает электрон. Сколько он пролетит, не столкнувшись ни с одной молекулой? Это неизвестно: он может столкнуться сразу же, а может быть, ему «повезет» и он долго будет лететь свободно. Если в среднем электрон пролетает без столкновений при данном давлении газа расстояние  $L$ , то  $1/30$  доля всех электронов «выйдет из игры» на  $1/30$  этого расстояния. Для того чтобы  $1/30$  доля всех электронов испытывала столкновения, пройдя не менее 30 см, надо обеспечить каждому электрону длину свободного пробега 10 м. При какой же концентрации молекул  $L = 10$  м? Предположим, что мы «сидим на электроне» и смотрим на газ изнутри. Если считать, что молекулы окружающего нас газа — шарики с диаметром  $D$ , то с ростом толщины газовой оболочки вокруг нас все большая часть «небосвода» будет покрываться кружками (так мы будем видеть шарики-молекулы). При толщине слоя  $L \approx \approx 1/nD^2$  ( $n$  — концентрация, или число молекул в единице объема) «небосвод» закроется почти весь. Эта толщина и будет средняя длина свободного пробега \*). Полагая  $D = 4 \cdot 10^{-10}$  м, получим,

---

\*) Точный ответ: на 30% больше, но для нас это отличие несущественно.



что  $L = 10$  м достигается при  $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Какому вакууму соответствует эта концентрация?

Вакуум характеризуют давлением газа. Давление — это отношение нормальной силы к площади, на которую эта сила действует. Единица силы — 1 ньютон (Н), площади — 1 метр квадратный ( $\text{м}^2$ ), поэтому единица давления —  $1 \text{ Н/м}^2$ . Называется эта единица 1 паскаль (Па). Кроме единицы 1 Па, названной по имени французского физика, математика и философа Б. Паскаля, в технике часто применяется другая единица — 1 Тор, названная по имени итальянского физика и математика Э. Торричелли (ученика Г. Галилея) и равная давлению столбика ртути высотой 1 мм. По определению  $1 \text{ Тор} = 1 \text{ мм рт. ст.}$  Легко подсчитать, что  $1 \text{ Тор} = 133 \text{ Па}$ .

Почему единицы давления названы именами этих ученых? Э. Торричелли изобрел ртутный барометр и объяснил принцип его действия. Именно на основе ртутного барометра были созданы первые приборы для измерения вакуума (вакуумметры), верой и правдой служившие людям до середины нашего века, чтобы затем уступить место более совершенным приборам. Б. Паскаль доказал существование атмосферного давления, продемонстрировав его зависимость от высоты — он сравнил показания ртутного барометра у подножия горы и на вершине. Он же первый измерил ртутным барометром разрежение, создаваемое вакуумным насосом.

Но вернемся к нашему вопросу: какому вакууму соответствует концентрация  $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ? При давлении  $1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$  в объеме 22,4 л любого газа содержится  $6 \cdot 10^{23}$  молекул (закон Авогадро), что соответствует концентрации  $n = 3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Отсюда легко подсчитать, что концентрация молекул  $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  достигается в газовой среде, давление в которой около  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ , или  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$ . Именно при таком вакууме из каждых 100 электронов, вылетевших с катода, в среднем 97 будут благополучно добираться до поверхности экрана, давая нам возможность видеть изображение.

## 2. Химически самая инертная среда

Химическая инертность вакуума используется в электрических лампочках и в электронных лампах. И в тех и в других есть сильно нагретые металлические детали. В электрической лампочке это спираль. Если в лампочку попадет воздух, спираль мгновенно сгорает, а баллон покрывается белым налетом — окисью вольфрама (если воздух в лампочку попадает медленно, т. е. реакция идет не с избытком, а с недостатком газа, образуется другая окись вольфрама — го-

любого цвета). Заметим, что с точки зрения химической инертности небезразлично, молекулы каких газов остались в лампе. В первую очередь опасен кислород.

Оценим, какое давление кислорода может быть в лампочке, чтобы она служила не менее 1000 часов. При высоких температурах каждая молекула кислорода, попавшая на поверхность вольфрама, вступает с ним в химическое взаимодействие, а получившаяся в результате реакции молекула окиси вольфрама испаряется, открывая другим молекулам кислорода доступ к металлу. При окислении вольфрама нить становится тоньше, ее электрическое сопротивление увеличивается, потребляемая мощность, а вместе с нею и сила испускаемого света уменьшаются. Предположим, что допустимое уменьшение радиуса нити 5 мкм\*). Слой вольфрама единичной площади и толщиной 5 мкм имеет массу около 100 г/м<sup>2</sup> (при плотности вольфрама  $\approx 20$  г/см<sup>3</sup>). На окисление одного атома вольфрама расходуются три атома кислорода, поэтому на окисление 5 мкм вольфрама пойдет

$$\frac{(100 \text{ г/м}^2) 3 A(O)}{A(W)}$$

кислорода (где  $A(O) = 16$  — атомная масса кислорода,  $A(W) = 184$  — атомная масса вольфрама), что составляет приблизительно 25 г/м<sup>2</sup>, или  $5 \cdot 10^{23}$  молекул/м<sup>2</sup> (масса  $6 \cdot 10^{23}$  молекул кислорода равна 32 г).

При каком давлении воздуха за 1000 часов на единичную площадь поверхности вольфрама попадет  $5 \cdot 10^{23}$  молекул/м<sup>2</sup> кислорода? При атмосферном давлении ( $10^5$  Па) концентрация молекул кислорода составляет

$$\frac{6 \cdot 10^{23} \text{ молекул}}{22,4 \text{ л}} \approx 3 \cdot 10^{25} \text{ молекул/м}^3.$$

Приравняв тепловую энергию  $3kT/2$  молекулы кислорода средней кинетической энергии  $mv^2/2$ , можем определить ее среднюю скорость ( $m$  — масса молекулы,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана). После чего легко посчитать плотность потока молекул кислорода, падающего на поверхность вольфрама при давлении  $P$

$$(P/10^5) \cdot 3 \cdot 10^{25} \cdot 500 = P \cdot 1,5 \cdot 10^{23} \text{ молекул/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

где давление  $P$  выражено в паскалях.

---

\*) При исходном диаметре проволоки, равном 0,1 мм, уменьшение ее радиуса на 5 мкм увеличит сопротивление проволоки и уменьшит потребляемую ею мощность примерно на 20%. Этот расчет вы легко проведете сами.

Таким образом, количество молекул, попадающих на поверхность металла за 1000 часов, составляет

$$P \cdot 1,5 \cdot 10^{23} \cdot 1000 \cdot 3600 \approx P \cdot 0,5 \cdot 10^{30} \text{ молекул/м}^2.$$

Нам надо, чтобы это количество не превышало критического значения, равного  $0,5 \cdot 10^{24}$  молекул/м<sup>2</sup>, следовательно, давление кислорода в лампе не должно превышать значения  $P = 10^{-6}$  Па. Это ограничение накладывается на давление в лампе кислорода или иного газа, так же активно взаимодействующего с вольфрамом.

### 3. Хороша ли шуба из вакуума?

Пусть две плоские поверхности (1, 2), имеющие каждая площадь  $S$ , расположены параллельно друг другу на расстоянии  $l$  одна от другой (рис. 1). Температура одной поверхности  $T_1$ , а другой —  $T_2 > T_1$ . Какое количество теплоты передается от одной поверхности к другой? Поскольку  $T_2 > T_1$ , то поверхность 2 будет охлаждаться, а поверхность 1 нагреваться. Существуют три механизма теплопередачи — излучение, теплопроводность, конвекция.

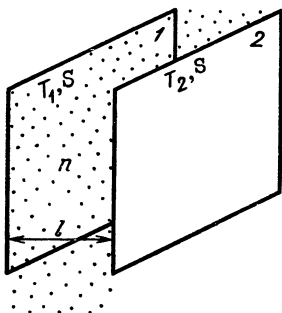


Рис. 1. К расчету теплопередачи

При теплопередаче излучением каждая поверхность излучает кванты и поглощает кванты, излученные другой. Та поверхность, которая горячее, излучает больше квантов с большей энергией и, следовательно, охлаждается.

При теплопередаче излучением каждая поверхность излучает кванты и поглощает кванты, излученные другой. Та поверхность, которая горячее, излучает больше квантов с большей энергией и, следовательно, охлаждается.

Если пространство между плоскостями заполнено средой, молекулы которой совершают тепловые колебания, в среднем оставаясь на месте, происходит теплопередача посредством теплопроводности. Молекула сталкивается с окружающими ее молекулами, получает энергию от тех, у которых ее больше и отдает тем молекулам, у которых ее меньше. В результате энергия передается сначала от горячей поверхности в среду, потом по среде, потом из среды — на холодную поверхность. Для этого механизма теплопередачи справедлив закон Фурье:

$$N = -(T_2 - T_1) \lambda S / l,$$

где  $N$  — количество теплоты, передаваемое за единицу времени (тепловой поток),  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности. Из фор-

мулы видно, что коэффициент теплопроводности, который характеризует тепловые свойства среды, показывает, какое количество теплоты переносится через единицу площади за единицу времени при изменении температуры на один градус на единичной длине. А знак «минус» показывает, что энергия переносится в сторону убывания температуры. Поскольку в системе СИ единицей количества теплоты является 1 Дж, то единицей теплового потока будет 1 Дж/с = 1 Вт, а коэффициент теплопроводности имеет размерность  $[\lambda] = 1 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$ .

Если среда между пластинами способна перемещаться и нагретая часть среды перемещается от горячей пластины к холодной, перенося тепло, говорят о конвекции.

В вакууме, конечно, есть излучение, не может быть конвекции, а механизм теплопроводности отличается от механизма теплопроводности в твердом теле. Действительно, молекулы не обмениваются энергией друг с другом, а, получив энергию при соударении с горячей стенкой, летят прямо к холодной и отдают эту энергию ей. Вы можете сами попробовать вывести формулу для теплового потока, переносимого разреженным газом между двумя пластинами. Исходные данные для ее вывода таковы: молекулы свободно перемещаются между пластинами, не взаимодействуя друг с другом. Отлетая от пластины с температурой  $T$ , молекула имеет энергию  $3kT/2$ , а средняя скорость определяется условием  $mv^2/2 = 3kT/2$ , где  $m$  — масса молекулы. Умножив общее количество молекул, участвующих в переносе тепла, на энергию, переносимую каждой молекулой за один «полет по замкнутому маршруту», и на количество полетов в единицу времени, получим, что тепловой поток составляет

$$N = \frac{nS3k(T_2 - T_1)}{2\left(\sqrt{\frac{m}{3kT_1}} + \sqrt{\frac{m}{3kT_2}}\right)}.$$

Пользуясь этой формулой, оценим, какой вакуум надо создать для обеспечения малых потерь тепла за счет теплопроводности в термосе, электрической лампочке и сосуде для хранения жидкого азота — сосуде Дьюара. (Дж. Дьюар в 1904 г. разработал способ получения вакуума путем поглощения газа активированным углем, охлаждаемым жидким азотом, и изобрел «дьюар».)

Устройства сосуда Дьюара для хранения жидкого азота и термоса одинаковы — оба они «дьюары». Это емкости с двойными стенками, между которыми создан вакуум, а сами стенки

изготовлены или из полированного металла, или из стекла с металлическим покрытием. Вакуум между стенками создается для того, чтобы уменьшить теплопередачу через воздух, а полируются стенки для уменьшения теплоизлучения\*).

Начнем с электрической лампочки. Полагая, что масса средней молекулы воздуха равна  $m = 5 \cdot 10^{-26}$  кг, температура — 2500 и 400 К (в разных лампочках эти значения температуры — спирали и баллона — различны, но на ответ это влияет слабо), площадь поверхности нити (для обычной лампочки) равна  $S \approx 1 \text{ см}^2$ , получаем  $N \approx n \cdot 10^{-21}$  Вт. Если мы хотим, чтобы в лампочке потери мощности в виде тепла составляли, например, не более 1 Вт, получаем, что  $n$  должно быть не более  $10^{21} \text{ м}^{-3}$ , что соответствует давлению 2 Па. Это довольно небольшой или, как говорят, низкий вакуум, и обеспечить его совсем нетрудно. На самом деле концентрация кислорода, взаимодействующего с вольфрамом, должна быть во много раз меньшей, поэтому лампочки часто наполняют тяжелыми инертными газами до давлений, значительно больших, чем 2 Па. Зачем это делается (несмотря на некоторое увеличение потерь мощности), мы узнаем позже. Заметим, что когда теплопроводность мала, основные потери тепла могут происходить в результате излучения. Однако вычислить эти потери точно очень сложно — надо знать спектр излучения, а точнее — долю мощности, излучаемой в диапазоне частот, невидимых глазом.

Перейдем к вопросу, пусть не столь важному, как электрическое освещение, но тоже нужному. Речь пойдет о бытовом термосе. Пусть в термос налит чай или кофе при температуре 100°C. Подставляя в нашу формулу  $S = 0,06 \text{ м}^2$  (высота термоса 20 см, диаметр — 10 см),  $T_2 = 400 \text{ К}$  — температура чая или кофе,  $T_1 = 300 \text{ К}$  — температура воздуха в комнате,  $m$  и  $k$  — как в предшествующем примере, получаем  $N \approx 3 \cdot 10^{-20}$  Вт. Но какой поток тепла  $N$  допустим? Если мы хотим, чтобы за сутки 1,5 литра кипятка охладился не более, чем на 10 К, надо, чтобы поток тепла был не более 1 Вт (это значение вы легко получите сами). Для этого требуется создать между стенками термоса вакуум 0,07 Па, соответствующий концентрации  $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Такой вакуум тоже получить совсем нетрудно.

А вакуум, который надо иметь между стенками сосуда Дьюара для хранения жидкого азота, должен быть выше или

---

\*) Шероховатая поверхность излучает больше тепла потому, что она... больше! Ведь мы не видим, какова площадь поверхности на самом деле — микрошероховатости, увеличивая площадь поверхности в десятки раз, воспринимаются как «матовость» поверхности.

ниже? Пусть в сосуде Дьюара хранится некоторое количество жидкого азота. Если мы хотим, например, чтобы из него за неделю испарилось не более 2 кг жидкого азота, допустим поток тепла, приходящего в сосуд, не более  $N_{\text{доп}} = \frac{2 \text{ кг} \cdot 2 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}}{6 \cdot 10^5 \text{ с}} \approx 0,7 \text{ Вт}$  (здесь  $2 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$  — удельная теп-

лота испарения жидкого азота). Подставляя эту величину и соответствующие значения температуры — комнатную 300 К и жидкого азота 78 К — в нашу формулу, легко получить, что для того, чтобы теплоприток в сосуд Дьюара с площадью стенок, например,  $0,3 \text{ м}^2$  составлял не более 0,7 Вт, нужно иметь вакуум  $10^{-2} \text{ Па}$ , соответствующий концентрации  $n = 4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Создание такого вакуума тоже не является сложной задачей.

Попробуем оценить, какое количество теплоты теряет кофе в термосе и получает жидкий азот в сосуде Дьюара за счет излучения. Поток тепла при излучении оценивается по формуле

$$N = \xi \sigma T^4 S,$$

где  $\xi$  — излучательная способность стенок сосуда Дьюара,  $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $T$  — температура в кельвинах,  $S$  — площадь поверхности тела \*). Излучательная способность меняется в пределах от 0 (абсолютно блестящее тело — ничего не поглощает и ничего не излучает) до 1 (абсолютно черное тело — все поглощает и больше всех излучает). Для хорошо полированного металла и для металлической пленки на полированном стекле, которые используются в термосе и в сосуде Дьюара, излучательная способность  $\xi \approx 0,01$ . Тогда, полагая  $T = 400 \text{ К}$  и  $S = 0,06 \text{ м}^2$  для термоса и  $T = 300 \text{ К}$  и  $S = 0,3 \text{ м}^2$  для сосуда Дьюара с жидким азотом, имеем соответственно около 1–1,5 Вт.

Иногда теплоизоляционные свойства вакуума очень затрудняют жизнь конструкторов. Например, надо что-то охлаждать в вакууме, а как? Если предмет, который нужно охлаждать, летает в космосе, то ничего другого не остается, как отводить тепло излучением. Количество теплоты, излучаемое любым телом, возрастает с увеличением его площади и температуры и всегда больше для черного тела, чем для блестящего. Поэтому излучатель надо делать черным и он должен быть либо большим, либо горячим. Но увеличение размеров нежелательно, а рост температуры часто снижает степень надежности приборов.

---

\*) По этой формуле можно оценить, например, температуру нити накала лампочки. Сделайте это, положив  $\xi = 0,3$ ,  $S = 1 \text{ см}^2$ ,  $N = 60 \text{ Вт}$ .

#### 4. На какой высоте надо летать спутнику?

Теперь рассмотрим «механические свойства» вакуума. Конечно, это шутка, но ведь тело, движущееся в вакууме, сталкивается с молекулами, не так ли? Пусть спутник, имеющий массу  $M$ , движется с большой скоростью  $v$  в вакууме с концентрацией молекул  $n$ . Пусть масса каждой молекулы  $m$ , а площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения, —  $S$ . Спутник массы  $M$  налетает на молекулы, которые взаимодействуют с ним неупруго. Тогда за время  $t$  спутник пролетит через объем пространства  $vSt$  и столкнется с  $n(vSt)$  молекулами. Спутнику будет передано количество движения  $mv(nvSt)$ , поэтому средняя величина силы, действующей на спутник со стороны молекул, —  $F = mnv^2S$ . Предположим, что спутник массой 100 кг и сечением  $0,1 \text{ м}^2$  летит на высоте 100 км со скоростью 8 км/с. На этой высоте атмосферное давление, согласно данным измерений, составляет в среднем  $4 \cdot 10^{-2}$  Па, а состав атмосферы мало отличается от того, к которому мы привыкли, т. е.  $m \approx 5 \cdot 10^{-26}$  кг. Тогда  $n \approx 10^{19}$  молекул/ $\text{м}^3$ , а  $F \approx 0,3$  Н. Оценим, какую высоту будет терять спутник за один оборот. Изменение кинетической энергии есть сумма работ силы трения и силы притяжения спутника к Земле:

$$\Delta\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = -F2\pi R + \frac{\gamma MM_3 \Delta R}{R^2}.$$

Здесь  $R$  — радиус орбиты,  $2\pi R$  — длина одного оборота,  $\gamma$  — гравитационная постоянная,  $M_3$  — масса Земли,  $\gamma MM_3/R^2$  — сила притяжения спутника к Земле,  $\Delta R$  — потеря высоты за один оборот. Используем для связи  $v$  и  $R$  второй закон Ньютона: ускорение тела равно силе, действующей на него, деленной на его массу. Отсюда для нашего случая следует:  $v^2/R = \gamma M_3/R^2$ . Воспользовавшись этим выражением и приближенным равенством  $\frac{1}{R - \Delta R} - \frac{1}{R} \approx \frac{\Delta R}{R^2}$ , получаем

$$\Delta R = 4\pi FR^2/Mv^2 \text{ или } \Delta R = 4\pi R^2 mnS/M.$$

Подставляя числа, имеем  $\Delta R \approx 25$  км для  $R = 6400$  км (высота полета — 100 км). Практически это означает, что спутник не сделает и пары оборотов. И если время входа его в плотные слои атмосферы придется на ночное полушарие, то кто-то сможет «загадать желание». Какие еще выводы можно сделать из решенной нами задачи? Спутники надо запускать на большие высоты, где вакуум хотя бы на два порядка лучше. На Земле вакуум  $4 \cdot 10^{-4}$  Па соответствует высоте 150 км. На других планетах он может быть и на

меньших высотах, если их атмосфера менее плотная. Например, командир космического корабля, прилетевшего на планету Регис III (существующую только в научно-фантастической повести Станислава Лема «Непобедимый»), говорит: «Выведите-ка пару малых фотозондов на экваториальную орбиту. Но чтобы это была максимально точная окружность, и на небольшой высоте. Километров этак семьдесят — это еще в пределах атмосферы... Они сгорят через несколько десятков витков...»

Поскольку законы физики одинаковы повсюду, из полученной нами формулы можно заключить, что плотность атмосферы у этой планеты существенно меньше, чем у Земли.

## 5. Механический насос

Многие процессы и явления стали известны нам в основном потому, что они были исследованы в вакууме, — а для этого вакуум надо было создать. С другой стороны, многие устройства, создающие и измеряющие вакуум, возникли благодаря изучению явлений, происходящих в вакууме.

Цель вакуумной техники — получить и поддерживать вакуум в каком-то объеме. Устройства, применяющиеся для создания вакуума, т. е. удаления молекул газа из объемов, называются вакуумными насосами. Насосы характеризуются скоростью откачки молекул газа и предельно достижимым вакуумом. Но почему нельзя получить абсолютный вакуум, полную пустоту? Существуют две причины.

Предположим, что у нас имеется сосуд, наполненный газом с концентрацией молекул  $n \text{ м}^{-3}$ , к которому присоединен насос со скоростью откачки  $U = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 2). Тогда за первую секунду насос удалит из сосуда  $0,1n$  молекул, а в сосуде

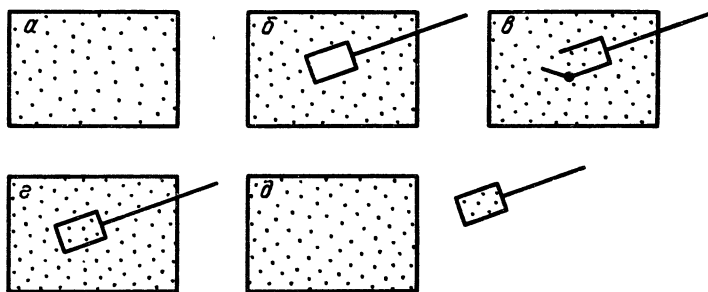


Рис. 2. Схема идеального насоса со скоростью откачки  $U \text{ м}^3/\text{с}$ : а — исходный вакуум; б — внесен пустой «ковш» объемом  $U \text{ м}^3$ ; в — «ковш» открыт и наполняется; г — «ковш» закрыт; д — «ковш» вынут. Время повторения цикла 1 с



останется  $0,9n$  молекул газа, которые после удаления первой порции (за первую секунду) распределятся равномерно по всему объему, т. е. к концу первой секунды концентрация газа в сосуде стала  $0,9n \text{ м}^{-3}$ . Следовательно, за вторую секунду (при той же скорости откачки  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ) насос удаляет не  $0,1n$  молекул, а  $0,1 \times 0,9n = 0,09n$  молекул газа из сосуда и т. д. Таким образом, насос будет «честно» откачивать по  $0,1 \text{ м}^3$  газа в каждую секунду, но «цена» этих  $0,1 \text{ м}^3$  будет различна — каждый следующий откачиваемый объем газа будет содержать все меньше и меньше молекул.

Существует еще одна, причем более серьезная, причина того, чтобы абсолютный вакуум был практически недостижим. У всех насосов есть так называемый «обратный поток». Как будто ковш объемом  $U \text{ м}^3$ , которым мы один раз в секунду черпаем из нашего сосуда, вносится туда не совсем пустым. Например, можно считать, что обратно в сосуд вносятся молекулы, выделяющиеся со стенок самого насоса. При открывании ковша принесенные в нем молекулы тут же вылетают в объем и смешиваются с теми, которые там уже есть. Уменьшение концентрации молекул в сосуде прекратится тогда, когда количество приносимых и уносимых молекул будет одинаково.

Кроме этого, у вакуумных насосов есть, как и у любого предмета, масса, габариты, стоимость и надежность, а для работы им необходимы, как и многим приборам, вода, электроэнергия, сжиженные газы, масла и т. п. В тех случаях, когда требования к основным («рабочим») характеристикам не слишком высоки, габариты или энергопотребление оказываются решающими факторами.

Все насосы можно разделить на две группы: насосы, удаляющие молекулы газа из объема наружу, и насосы, осаждающие эти молекулы на свои стенки.

Рассмотрим насосы, удаляющие молекулы газа из объема. При работе этого насоса учитывается такое важное свойство молекул газа, как их свободное хаотическое движение и способность заполнять весь предоставляемый им объем. Пусть имеется какое-то количество газа. Независимо от того, в какой объем (сосуд) мы их «заталкиваем», молекулы газа распределяются равномерно по всему объему данного сосуда. Поэтому одно и то же количество молекул газа можно разместить в разных объемах, но при этом концентрации будут разные — чем больше объем, тем меньше концентрация, тем газ становится разреженнее. Именно таким путем был получен разреженный газ Ктесибием еще в I веке до н. э. (рис. 3).

Но нельзя же увеличивать объем до бесконечности, чтобы все больше и больше разрезать газ, т. е. получать все более и более высокий вакуум. Можно, скажем, с помощью каких-то механизмов — клапанов или затворов — периодически открывать и закрывать сосуд, предоставляя газу возможность выходить из сосуда, а новым порциям газа перекрывать

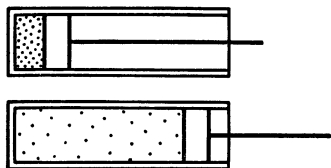


Рис. 3. Разрежение газа посредством его расширения

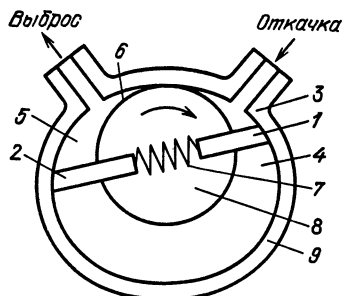


Рис. 4. Схема механического насоса (в разрезе). Стрелка — направление вращения ротора. Обозначения разъяснены в тексте

доступ снаружи в сосуд, т. е. сделать процесс расширения газа периодическим. Это и было сделано в так называемом механическом насосе (рис. 4).

Устроен и работает этот насос так. Лопатки 1 и 2 пружинной 7, проходящей через ротор 8, прижаты к стенкам корпуса 9, трение происходит, конечно, не «всухую», все поверхности смазаны маслом. Когда лопатка 1 идет вниз, откачиваемый объем расширяется и дополнительное место 3 заполняется молекулами газа. Потом лопатка 2 отсечет расширенную часть, а захваченная между лопатками порция газа 4 будет транспортироваться к выходу, где она вытеснится наружу 5.

Существует несколько конструкций механических насосов, например пластины могут располагаться не на роторе (подвижной части), а на корпусе. Что же до объема б, то лопатка отсекает его от выпускного отверстия и перегоняет содержащийся в нем газ — увы! — обратно в объем, из которого он откачивается. Это и есть «обратный поток» газа из насоса в откачиваемый объем.

## 6. Пар откачивает газ

В насосах, удаляющих молекулы газа из объема, для откачки может использоваться поток паров масла (реже — ртути, некоторых эфиров и даже углекислого газа). Такие насосы

называются диффузионными, или паромасляными. Устройство такого насоса схематично показано на рис. 5.

Диффузионный насос состоит из цилиндрического корпуса 1, в который налито масло, нагреваемое снизу обычной электроплиткой 3. Пары масла 10 поднимаются по трубе 4. Затем поток паров с высокой скоростью выходит из сопла 5, конденсируется на охлаждаемой водой 6 стенке 7 и стекает вниз.

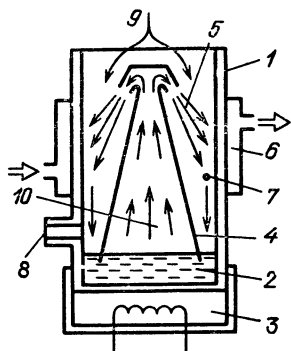


Рис. 5. Диффузионный насос. Одинарная стрелка — движение паров масла, двойная — воды, охлаждающей корпус. Обозначения разъяснены в тексте

Этот тип насосов — один из патриархов вакуумной техники: будучи создан на заре века, он все время совершенствуется и по сей день способен конкурировать по ряду параметров с созданными позже насосами. Немаловажным фактором является его дешевизна, простота в эксплуатации, надежность, доступность.

Диффузионным этот насос назван за механизм работы. Молекулы откачиваемого газа попадают в насос со стороны входа 9, проникают (диффундируют) в струю масляного

пара и вместе с ней уносятся к выходу 8. Основным недостатком диффузионных насосов является обратный поток масла в откачиваемый объем. Десятилетия биографии диффузионных насосов были наполнены борьбой с обратным потоком масла. От него пытались избавиться и «вымораживанием» — охлаждением части установки перед входом насоса (конденсация), и применением сорбентов (поглотителей), и изобретением новых сортов масла. Делались даже диффузионные насосы с использованием углекислого газа вместо паров масла, но в этом случае водяное охлаждение стенок насоса было, конечно, недостаточным. Когда-то широко применялись насосы с парами ртути, но позже их производство резко сократилось, хотя работали они очень хорошо. Пары ртути — а при неправильной эксплуатации они могут попасть в воздух — опасны для организма человека.

Конечно, у ртутных диффузионных насосов обратный поток тоже был, но при этом было известно, из чего он состоит — из ртути. Масло же не соединение, а смесь, зачастую не вполне известного состава. При попадании, например, в электровакуумный прибор пары масла могут разлагаться при взаимодействии с электронами и количество различных веществ в

объеме прибора становится еще больше. А если учесть, что пары масла из механического насоса могут попасть в диффузионный насос и через него — в откачиваемый объем, то понятно, что разобраться после этого, что попало в прибор, становится довольно трудно, а порой просто невозможно.

Достоверно известно, что при замене в диффузионном насосе одного сорта масла другим брак при производстве электровакуумных приборов может увеличиться в несколько раз. Известно также, что пары масла, осевшие на электроды, бомбардируемые электронным пучком, полимеризуются и образуют диэлектрические пленки. Иногда эти диэлектрические пленки превращаются в черное шероховатое покрытие из слабо сцепленных друг с другом частиц углерода. Но когда и что получается, заранее не ясно.

Чтобы не заканчивать рассказ о диффузионных насосах печально, повторим, что конструкция их достигла высокой степени совершенства, что поток масла можно сделать довольно малым и что насосы эти успешно эксплуатируются до сих пор. В технике вообще редко бывает, чтобы новое полностью вытесняло старое — обычно новое ограничивает область применения старого и стимулирует его совершенствование.

Успешно применяются по сей день и механические насосы, когда-то составлявшие вместе с диффузионными весь «арсенал» откачных средств.

Как лучше распорядиться этим небольшим выбором? Например, можно применить последовательное соединение двух насосов. Оно применяется в тех случаях, когда насос, откачивающий газ непосредственно из вакуумной камеры, должен иметь на выпускном конце не атмосферное давление, а пониженное. Существует следующее стандартное сочетание: диффузионный насос работает на механический, а механический — на атмосферу.

Иногда последовательное соединение нескольких насосов реализуется конструктивно как один насос. Такой прием применяется в диффузионных насосах (рис. 6). Чем ниже расположено кольцевое сопло, тем более плотная струя пара из него выходит. Более плотные струи пара обеспечивают малый обратный поток, менее

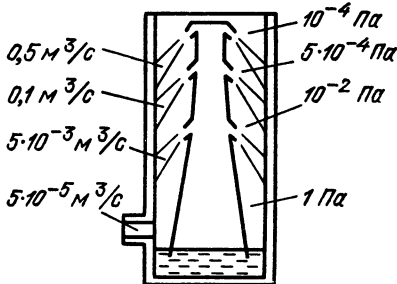


Рис. 6. Многоступенчатый диффузионный насос. Слева — значения скорости откачки, справа — давления

плотные — высокую скорость откачки. Разумеется, поток откачиваемого газа у всех струй одинаков, но давление откачиваемых газов больше для струй, расположенных ниже, а значит, скорость откачки для струй, расположенных ниже, меньше, как это и показано на рис. 6. Произведение давления разреженного газа на скорость откачки должно быть одинаково во всех сечениях насоса — ведь количества газа, проходящие через все сечения насоса, одинаковы.

## 7. Немного о метрологии

Метрология — это наука об измерениях. Некоторые величины, например длину, можно измерять непосредственно, сравнением измеряемой длины и эталона. Однако большинство величин измеряется косвенно — путем преобразования одних в другие и сравнения с эталонами уже преобразованных величин. Конечным звеном всей длинной цепочки является человек, который делает соответствующее заключение в зависимости от того, левее или правее деления на шкале прибора находится стрелка. Действительно, в подавляющем большинстве случаев приборы преобразуют величину, которую измеряют, в зрительные образы. Почти в любом приборе — и весах в магазине, и часах на руке, и спидометре в машине — есть стрелка или цифры, на которые мы смотрим.

В тех случаях, когда при измерении одни величины преобразуются в другие, а другие — в третьи, в качестве промежуточного сигнала обычно используют электрический сигнал. Дело в том, что электрический сигнал очень удобно преобразовывать, и техника работы с электрическими сигналами освоена очень хорошо.

Величины, характеризующие вакуум, тоже обычно преобразуют в электрические сигналы, причем часто в сигналы весьма слабые. Поэтому важной проблемой вакуумной метрологии в электрофизических установках (ускорители, токамаки, установки для исследования плазмы) является защита вакуумметров (приборы для измерения вакуума) от электромагнитных помех. Кроме того, сильные помехи для их работы создают потоки электронов в вакууме и рентгеновское излучение, которое, кстати (точнее, некстати), возникает, когда эти потоки попадают в вещество.

Измерить вакуум вообще очень сложно, и, может быть, его измерение сложнее других. Объективный критерий — достигнутая точность измерений. Обычная точность измерений в вакуумной технике составляет десятки процентов, и лишь с большими усилиями можно достичь точности 5–10 %. Подавляю-

щее большинство величин в других областях техники и физики удастся измерять значительно точнее.

Вакуум характеризуют давлением в основном по традиции. В большинстве случаев надо знать не давление газа, а концентрацию молекул в нем, т. е. число молекул в единице объема, и поэтому приборы, измеряющие вакуум, определяют именно концентрацию молекул, хотя их показания представляются в единицах давления. И имеется в виду при этом давление, которое может создать газ с данной концентрацией молекул при 20 °С (давление пропорционально концентрации и температуре). Чем концентрация (и давление) меньше, тем, как говорят, вакуум «выше» или «лучше».

При всех измерениях, независимо от того, какая величина измеряется, возникает ряд однотипных вопросов. Вопросы эти следующие: как прибор влияет на исследуемый объект, как исследуемый объект влияет на прибор, изменяя его характеристики и, наконец, как наш прибор градуировать, т. е. как определить, что именно он показывает. Рассмотрим, например, измерение температуры. Опуская термометр в стакан с водой, мы немного изменяем ее температуру, поскольку вода нагревается или охлаждается от термометра (если его исходная температура не совпала случайно с температурой воды). Обычным бытовым термометром можно измерить температуру воды, но нельзя измерить температуру плавиковой кислоты или расплавленной меди. А, например, термопарой не всегда можно измерить температуру в реакторе, так как излучение может повлиять на свойства металлов, из которых сделана термопара. Что касается градуировки, то она производится сравнением показаний двух термометров — эталонного и градуируемого. Или можно использовать «реперные точки» — хорошо известные температуры плавления чистых металлов.

Влияние вакуумметра на вакуум может быть двояко: посредством газовыделения он может вакуум ухудшить, посредством откачки (почти все вакуумметры откачивают газ как насосы) он может вакуум улучшить. Может он вести себя и хитрее — одни газы откачивать, а другие выделять.

Для градуирования вакуумметров было бы удобно использовать какие-нибудь эффекты, возникающие при определенном вакууме (как, например, плавление кристалла при определенной температуре). Но подобные эффекты в вакууме неизвестны. Нельзя ли воспользоваться непосредственно определением давления как отношения силы к площади? Конечно, можно, но малые силы измерять трудно, поэтому и высокий вакуум (низкое давление) таким способом измерить нельзя. Как же выйти из этого положения? Чтобы ответить на этот вопрос,

приведем такой пример. Пусть у нас имеется гиря в 1 кг и надо проверить, правильно ли измеряют весы массу в 0,5 кг. Как это сделать? Поступим так: взвесим 1 кг чего-либо, что хорошо делится на части (песок, вода), разделим этот 1 кг пополам (это можно сделать даже на весах вообще без делений), и вот «гиря» в 0,5 кг готова.

Аналогично можно действовать и при измерении вакуума. Возьмем два объема —  $V_1$  и  $V_2$ , создадим в объеме  $V_1$  давление газа  $P_1$ , которое измерим отградуированным ранее вакуумметром, а из объема  $V_2$  откачаем газ и создадим в нем высокий вакуум (рис. 7). Потом соединим объемы  $V_1$  и  $V_2$ , и в системе

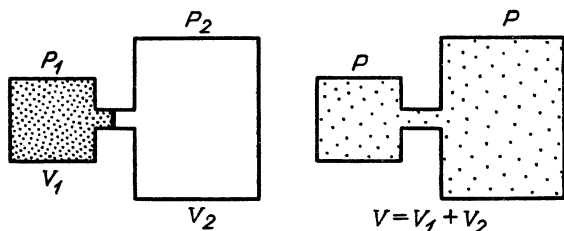


Рис. 7. Градуирование вакуумметра методом расширения

установится давление  $P = P_1 V_1 / (V_1 + V_2)$ . Итак, мы нашли способ превратить известное, но большее давление  $P_1$  в известное (если известны  $V_1$  и  $V_2$ ) и притом меньшее давление  $P$  ( $P < P_1$ ). Зная это меньшее давление, можно получить еще меньшее, и т. д. Следовательно, можно отградуировать любой вакуумметр, т. е. установить, какому именно вакууму соответствуют разные показания этого вакуумметра. Увы, у этого метода, как и у любого другого, есть погрешности. Основной их источник — сорбция на стенках, т. е. прилипание к ним молекул газа. Когда газ из сосуда  $V_1$  перетекает в сосуд  $V_2$ , часть его прилипает к стенкам, причем иногда мы даже не знаем, какая именно это часть.

Другой метод получения известных меньших давлений из больших выглядит так. Пусть в объеме создан вакуум с давлением  $P$  и открыто маленькое отверстие в сосуд с давлением  $P_0$  ( $P_0 \gg P$ ). Тогда из сосуда с давлением  $P_0$  в сосуд с давлением  $P$  начнут попадать молекулы; количество молекул, проникающих из сосуда в сосуд в единицу времени, будет на первых порах \*) постоянно, значит, общее количество молекул в сосуде будет изменяться линейно, и следовательно, давление тоже будет изменяться пропорционально времени. Поэтому,

\*) До тех пор, пока выполняется условие  $P_0 \gg P$ .

если, например, через время  $t$  вакуум оказался таким, что отградуированный ранее вакуумметр показал давление  $P$ , то в момент времени  $0,1t$  вакуум был  $0,1P$ , в момент  $0,01t$  —  $0,01P$  и т. д. Зная эти давления, мы можем отградуировать любой другой вакуумметр.

## 8. Что и как измеряют в вакууме

Для определения вакуума в первую очередь надо измерять концентрацию молекул. Поскольку в вакууме могут быть элементы разных газов, то хорошо бы уметь измерять их концентрации. Далее, хотелось бы уметь измерять поток молекул, т. е. поток газа, откачиваемого из вакуумных камер, так как этот поток характеризует, например, процесс удаления газов из материалов, помещенных в камеру, да и из самой камеры (этот процесс называется обезгаживанием). Хотелось бы знать, из каких объектов или мест самой камеры выделяется газ, какой и сколько. Хотелось бы знать и скорость откачки вакуумных насосов и предельный вакуум, ими создаваемый.

Чтобы определить поток, необходимо измерить давление газа в камере и знать скорость откачки. Если скорость откачки из камеры  $U$ , а давление в ней  $P$ , то поток газа, удаляемого из камеры, будет  $Q = PU$ . Но скорость откачки из камеры не всегда известна, поэтому поток чаще всего измеряют иначе — методом двух вакуумметров. Суть этого метода в следующем. Если в двух разных сечениях трубопровода, ведущего от вакуумной камеры к насосу, измерять давление газа, то его значения окажутся различными.

Действительно, если давление в двух точках одинаково, то потоки газа из камеры в насос и обратно равны и откачки газа как будто бы нет (хотя откачиваться может один газ, а поступать обратно — другой!). Если же давление в камере больше давления на входе насоса, то удаляемый поток больше потока, возвращающегося в камеру, и разность потоков, называемая обычно откачиваемым потоком, будет пропорциональна разности этих давлений.

Измерение предельного вакуума, очевидно, сводится к измерению давления, создаваемого насосом при отсутствии газового потока на входе в насос, т. е. при отсутствии газовой выделенности со стенок откачиваемого объема и попадания молекул из атмосферы. Предельный вакуум зависит от скорости откачки насоса и потока газов, проникающих обратно из насоса в откачиваемый объем. Скоростью откачки вакуумных насосов называют отношение потока откачиваемого газа к давлению на входе насоса.



Какие же бывают вакуумметры? Начнем с приборов, измеряющих именно давление, а не концентрацию. Один из таких приборов вам, конечно, известен, и называют его или барометром (при измерении атмосферного давления), или манометром. Измеряет этот прибор разность давлений по обе стороны деформируемой стенки (например, мембраны). Принципиальная схема прибора показана на рис. 8 (метод измерения перемещений мембраны может быть любым). Поскольку деформация мембраны зависит от разности давлений, то можно

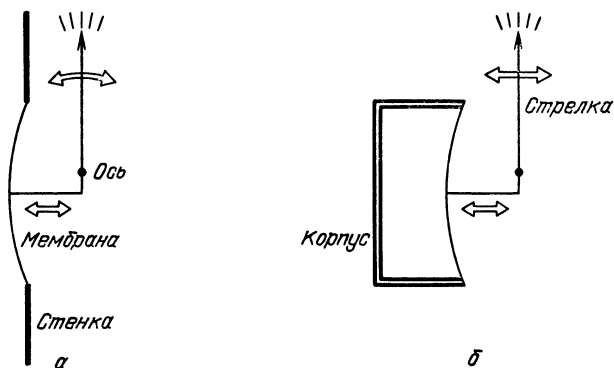


Рис. 8. Вакуумметр с деформируемой стенкой (барометр). Перемещения элементов показаны двойными стрелками

измерять разности давлений, или же одно из давлений должно быть известно, чтобы можно было измерять другое. Возможны, в принципе, два варианта: а) когда одно из давлений атмосферное; б) когда с одной из сторон мембраны имеется откачанный до известного вакуума герметичный объем. Диапазон давлений, измеряемых такими приборами, составляет от  $10^6$  Па (10 атмосфер) до 10 Па. Расширение диапазона в сторону больших давлений не представляет трудностей, а вот в сторону меньших давлений — сложнее: деформации гибких элементов становятся столь малыми, что измерять их становится трудно.

Давление измеряют и ртутные манометры. Вместо мембраны в них используется ртуть, помещенная в U-образную трубку. Конструкция простейшего такого прибора вам, конечно, известна, и поскольку на заре вакуумной техники они были основными приборами для измерения вакуума, конструкция их постоянно совершенствовалась и ценой усложнения удалось увеличить их чувствительность. Однако высокий вакуум этими вакуумметрами измерять все же нельзя (чувствительность при низких давлениях мала), к тому же пары ртути ядовиты,

стекло хрупко, и в итоге эти приборы почти не используются.

Были попытки заменить ртуть другими жидкостями, например маслом. Чувствительность прибора возрастает, но в масле растворяются газы, а оно само испаряется и загрязняет вакуумную систему. Диапазон давлений, измеряемых ртутными вакуумметрами, путем их усовершенствования удается расширить до  $10^5$ – $10^{-4}$  Па.

Следующий тип вакуумметров, широко применяющихся в наше время и предназначенных для измерения невысокого вакуума, — теплоэлектрические. Их работа основана на том, что тепловой поток в разряженном газе зависит от концентрации молекул. Формула для теплового потока приводилась раньше, и из нее видно, что при малой разности температур горячего и холодного тела тепловой поток прямо пропорционален концентрации молекул и обратно пропорционален корню квадратному из массы молекул. Итак, теплоэлектрическому вакуумметру свойственна селективность: его показания зависят от рода газа — чем тяжелее молекулы газа, тем меньше отводимый поток тепла. Устроен и работает теплоэлектрический вакуумметр так: по проволоке, помещенной в вакуум, пропускают электрический ток и измеряют температуру, до которой проволока нагрета. При фиксированном токе накала температура проволоки зависит от потока отводимого от нее тепла. Отвод тепла происходит путем излучения, кондуктивно (через стойки, на которых закреплена проволока) и, наконец, через газ. Итак, температура проволоки зависит от окружающего ее вакуума. Измерять температуру проволоки можно по ее сопротивлению (сопротивление проволоки зависит от ее температуры) или термопарой, приваренной к проволоке (рис. 9). Само устройство вместе с электрической схемой, преобразующей термо-э. д. с. термопары или сопротивление проволоки в показания прибора, непосредственно воспринимаемые человеком, называют обычно теплоэлектрическим вакуумметром, а ту его часть, которая помещается в вакуум (проволока, термопара), — датчиком вакуумметра.

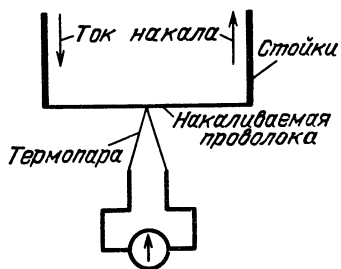


Рис. 9. Термопарный вакуумметр

Теплоэлектрические вакуумметры позволяют измерять давление от 10 до  $10^{-1}$  Па. При больших давлениях тепло-

проводность перестает зависеть от давления \*). При меньших давлениях теплопроводность газа оказывается так мала, что отвод тепла от проволоки по газу становится немного меньше отвода тепла излучением. В этом случае изменение давления газа и, следовательно, отвод тепла по нему, перестают влиять на температуру проволоки. Этими факторами определяется диапазон давлений, которые можно измерять вакуумметром.

Кроме перечисленных выше факторов, на показания вакуумметра влияет доля энергии молекулы, отданная проволоке при соударении. Эту величину можно вычислить так. Если атом со скоростью  $v$  и массой  $m_1$  налетает на атом, находящийся на поверхности, с массой  $m_2$ , то он улетает со скоростью  $u = v(m_1 - m_2)/(m_1 + m_2)$ . Отношение отданной энергии  $(m_1 v^2 -$

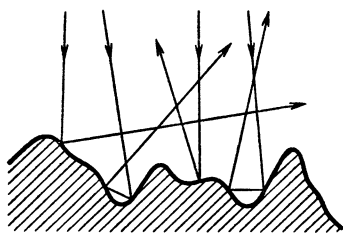


Рис. 10. Схема отражения атомов от поверхности

$- m_1 u^2)/2$  к исходной  $m_1 v^2/2$  будет равно  $4m_1 m_2/(m_1 + m_2)^2$ . На практике эта формула соблюдается не очень строго, в частности, из-за многократных отражений (см. рис. 10). Влияние массы молекул на долю энергии, отданной при соударении, приводит к тому, что селективность получается не совсем такая, как должна была бы быть по формуле для потока тепла в вакууме.

Действительно, как показывает опыт, при равных давлениях газов  $H_2$ , He,  $N_2$ , Ne, Ar, Kr показания вакуумметра относятся как 1,6 : 1,2 : 1,0 : 0,8 : 0,6 : 0,5. Видно, что зависимость слабее, чем корень квадратный из массы, входящий в формулу для потока тепла в вакууме.

Мы переходим к наиболее распространенному вакуумметру — ионизационному. Работа этого вакуумметра основана на ионизации находящихся в вакууме молекул электронами и сборе получившихся ионов на специальный электрод. Чем больше в вакууме молекул, тем больше получается ионов. Пусть в вакууме находятся три электрода (рис. 11): катод — накаливаемая проволока, испускающая электроны; анод — электрод, находящийся относительно катода под положительным

\*) Теплопроводность газа (при длине свободного пробега меньшей, чем расстояние между горячим и холодным телом) увеличивается с концентрацией молекул, переносящих энергию и уменьшается с расстоянием, на которое молекулы его «за раз» переносят, т. е. длиной свободного пробега. Но поскольку длина свободного пробега обратно пропорциональна концентрации, то их произведение постоянно. Вклад конвекции в теплопередачу в вакуумметре мал.

потенциалом (около 100–200 В) и собирающий электроны, и электрод, находящийся относительно катода под отрицательным потенциалом (около 50 В), называемый коллектором и собирающий ионы. Две основные проблемы, которые приходится решать при конструировании датчика ионизационного вакуумметра, — это как удлинить траекторию электронов, чтобы

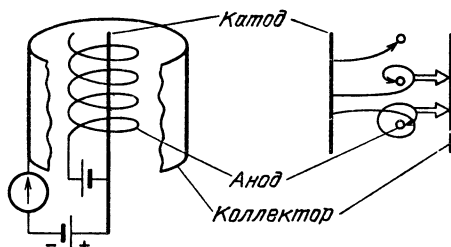


Рис. 11. Ионизационный вакуумметр. Одинарные стрелки — пути электронов, двойные — ионов

увеличить вероятность ионизации молекул, оставшихся после откачки в вакууме, и как собрать все ионы на коллектор. Чем больше ионов будет собрано на коллектор, тем больше будет ионный ток при одном и том же вакууме и тем легче будет его измерить.

Ионизационный вакуумметр существенно влияет на измеряемый вакуум. С одной стороны, нагретый катод имеет заметное газовыделение — газовые примеси диффундируют в проволоке и выделяются в вакуум. С другой стороны, вакуумметр откачивает газы, а ионы, попадая на коллектор (или другие детали датчика), могут внедряться в него. Обычно откачка преобладает над газовыделением. Казалось бы, чем плохо — лишний насос в вакуумной системе? Плохо это тем, что вакуумметр часто присоединяется к вакуумной системе через трубку. Если по трубке идет поток газа, то, как мы уже знаем, на ее концах будут разные давления. А желательно, чтобы в вакуумметре было то же давление, что в вакуумной системе, — ведь вакуумметр измеряет давление в самом себе. Поэтому надо заботиться о том, чтобы давление в вакуумметре было как можно ближе к давлению в системе. Искажение показаний может быть настолько велико, что иногда предпочитают вводить датчик прямо в откачиваемый объем, избавляясь от соединительной трубки.

Катод у датчика термоэлектронный, т. е. горячий, а на горячей поверхности интенсивно проходят разные реакции, изменяющие состав газов. Для катода ионизационного вакуумметра

чаще всего используется вольфрамовая проволока, нагретая до 2500 К. Попад на поверхность такого катода, молекулы углеводородов (последствие применения механических и диффузионных насосов, содержащих масло) разлагаются (водород диссоциирует, кислород взаимодействует с вольфрамом и мгновенно испаряется в виде окиси вольфрама, углерод взаимодействует с кислородом и водой, давая окись углерода, и т. д.), что приводит к увеличению давления в вакуумметре. Поэтому одно из направлений совершенствования ионизационных вакуумметров — применение в них холодных катодов, использующих не термоэлектронную эмиссию, а другие ее виды.

Наличие накалинной проволоки уменьшает надежность вакуумметра. Действительно, чем хуже вакуум, тем быстрее испаряется вольфрам (в виде его окиси) и тем меньше срок службы прибора. Чтобы уменьшить влияние вакуума на работу прибора, катод иногда выполняют из иридиевой проволоки, покрытой окисью иттрия. Такой катод даже называют воздухостойким. Он обеспечивает ту же эмиссию при меньшей температуре, вдобавок иридий вообще окисляется медленнее, чем вольфрам, а при меньшей температуре — еще медленнее. Применяя такой катод, ионизационным вакуумметром удастся измерять давления до 10 Па.

Молекулы, оставшиеся в «вакууме», могут оказывать отрицательное влияние на работоспособность датчика ионизационного вакуумметра не только из-за окисления катода. Нежелательные процессы происходят и на аноде. Как уже говорилось, молекулы масла, попав на накалинный вольфрамовый катод, разлагаются. На аноде ситуация иная: молекулы масла, находящиеся на поверхности, облучаемой электронами, могут полимеризоваться и образовать тонкую пленку. В зависимости от условий образования такая пленка может быть как проводящей, так и изолирующей. Во втором случае пленка заряжается электронами отрицательно, и электроны перестают долетать до анода, так как отрицательный заряд на пленке отталкивает их. Надо сказать, что полимерные пленки могут образовываться во всех приборах, где есть пары масла и электронный пучок \*).

Заметим, что теплоэлектрический вакуумметр гораздо более неприхотлив, чем ионизационный: температура проволоки в нем мала и его можно включить даже при атмосферном давлении, газов он не выделяет и не откачивает.

---

\*) Явление загрязнения поверхностей иногда называют контаминацией, что в переводе с английского означает «загрязнение». В английский язык это слово пришло из латинского, где означало «смешение».

### ВРЕМЯ ИДЕТ, ОБЪЕМ РАСТЕТ

#### 1. Вакуумная техника для технологий

Вакуумные установки больших объемов появились, как это ни странно, для получения высокого вакуума в установках и приборах малых объемов. По мере развития вакуумной техники стало выясняться, что выделение газов из различных материалов, из которых изготовлены отдельные детали прибора, мешает получать высокий вакуум в приборах. Действительно: мы удаляем молекулы газа из объема прибора, а в это время другие молекулы выделяются из деталей прибора и попадают в объем. Но откуда берутся газы, например, в металлах? Они содержатся в исходных рудах и, кроме того, попадают в металлы из атмосферы во время различных технологических процессов, связанных с нагревом, — плавки, сварки, и т. п. Казалось бы, простейший способ этого избежать — проводить в вакууме все технологические процессы, связанные с нагревом металла. Установки для проведения технологических процессов в вакууме называют вакуумными технологическими установками. О таких установках и о происходящих в них процессах пойдет речь в этой главе.

Однако легко сказать — поместить в вакуум плавильную печь или прокатный стан! Несмотря на огромную трудность решения такой задачи, все же делались попытки создать даже целые металлургические производства в вакуумированных или наполненных инертными газами помещениях (инертные газы в металлах не растворяются или растворяются слабо). Люди в таких цехах работали в специальных скафандрах, напоминающих космические (скафандр космонавта — тоже вакуумный прибор!). Однако широкого распространения эти производства не получили — очень уж дорога и сложна их организация. Но отдельные технологические процессы в вакууме проводят. В основном это процессы, связанные с сильным нагревом легко окисляющихся металлов: плавка, пайка, а также сварка и резка электронным или лазерным лучом вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и титана. Кроме того, в вакууме

производят очистку металлических деталей путем сильного нагрева или очистку металлов переплавом. При нагреве увеличивается скорость диффузии и металл быстро обезгаживается при условии, что он нагревается и плавится в вакууме или в инертном газе. Например, удаление водорода из металла будет происходить при переплаве металла в аргоне, хотя оно будет происходить медленнее, чем при переплаве в вакууме. При переплаве в аргоне удаление водорода идет медленнее потому, что часть уходящих из металла молекул водорода будет сталкиваться с атомами аргона и тут же возвращаться в металл, а в хорошем вакууме вероятность такого явления много меньше.

Для проведения технологических процессов в вакууме, как правило, необходимо иметь очень сложные установки, содержащие, кроме насосов и вакуумметров, камеры, трубы, краны, вентили, окошки для наблюдения за ходом процесса, люки и шлюзы для помещения в вакуумную камеру материалов и предметов, вводы электрического тока и многое другое. И хотя вакуумные установки бывают и низко- и высоковакуумные, и большие и маленькие, у них все же есть много общих черт, о чем будет рассказано в этой главе.

Специфика вакуумных установок для проведения «горячих» процессов состоит в том, что вакуумную камеру приходится охлаждать. Казалось бы, что плохого в том, что она нагреется — только очистится лучше; газы выделятся из металлических стенок и откачнутся насосами. Однако резина — а чаще всего уплотнения (прокладки) технологических вакуумных установок выполнены из резины — не выдерживает сильного и продолжительного нагрева. Именно резиновые, а не металлические уплотнения применяют потому, что открытие и закрытие люка с резиновым уплотнением происходит во много раз быстрее, а производительность таких установок — один из главных их параметров. Иногда для упрощения конструкции охлаждают только ту часть установки, где находится резина, или вообще заменяют резину другими упругими, но более термостойкими материалами, например, витоном.

Широко используется вакуум в таком технологическом процессе, как напыление. Процесс это важный, без него не было бы — всего лишь! — всей микроэлектроники, не говоря уже о таких мелочах, как зеркала, отражатели в автомобильных фарах, елочные игрушки и многое другое.

Пусть имеется поверхность («подложка»), на которую надо нанести некое вещество. Сделать это можно разными способами, но в технике самым распространенным и самым универсальным является способ напыления. Напыление — по смыслу

слова — это нанесение на подложку мелких частиц, «пыли». Действительно, известны способы, когда на подложку направляют поток сильно нагретых частиц порошка напыляемого вещества и эти частицы довольно прочно сцепляются с подложкой, как бы «примерзают» к ней. Но чаще, вопреки названию, напыляют не пыль, а отдельные молекулы.

Поток молекул в вакууме можно создать двумя способами. При первом («напыление в газовом разряде») зажигают газовый разряд между подложкой и куском напыляемого вещества («мишенью»). Ионы газа бомбардируют мишень и распыляют ее. При этом атомы вещества мишени напыляются на подложку. При другом способе («вакуумное напыление») кусок напыляемого вещества разогревают так, чтобы он быстро испарялся, при этом испаренные атомы осаждаются на подложке.

Напыление первым способом хотя и сложнее, чем вторым, но и универсальнее — таким способом может быть напылено большее количество веществ. Поэтому сфера применения напыления в газовом разряде растет быстрее, чем вакуумного, но и последнее рано сдавать в архив. Связано это, в частности, с тем, что напылением в высоком вакууме можно получать очень чистые пленки: примесь газа в них определяется отношением скорости поступления на подложку атомов напыляемого вещества и скорости молекул газа, оставшегося после откачки. В высоком вакууме молекул такого газа поступает на подложку совсем немного.

Однако напылить атомы того или иного вещества — это еще не все. Надо, чтобы напыленный слой («пленка») не оторвался от подложки. Для этого подложку чистят иногда нагревом, иногда бомбардировкой ионами — все это увеличивает силу сцепления, или «адгезию».

Причиной отрыва пленки от подложки являются термические напряжения. Поскольку напыленная пленка обычно горячее подложки, то при остывании в пленке возникают растягивающие напряжения, в подложке — сжимающие, а в зоне контакта — напряжения сдвига. В зависимости от того, какие напряжения раньше превзойдут предел прочности, пленка или разорвется на островки, или совсем оторвется от подложки. С подложкой при этом, конечно, ничего не происходит: она много толще пленки и напряжения в ней (отношение силы к площади сечения) много меньше. Один из способов борьбы с этими неприятностями — напыление атомов на нагретую подложку.

Применяется вакуум и в пищевой промышленности, и в медицине — для сушки и обезвоживания пищевых продуктов и



лекарств (такой процесс называют лиофильной\*) сушкой), поскольку откачка ускоряет испарение воды из продуктов. Сушат в вакууме и обмотки электродвигателей и трансформаторов перед пропиткой, а пропитывают их различными смолами и трансформаторным маслом для увеличения теплопроводности. Обмотки нагреваются протекающим по ним током по всей толщине, а охлаждаются лишь с поверхности. И чем меньше в обмотке воздуха и больше смолы или масла, тем больше ее теплопроводность и меньше разогрев. Заметим, что в данном случае вакуумирование применено для уменьшения давления, ибо именно давление воздуха не пустит масло в щели между проводами, если между ними останется воздух. Эта ситуация не единственная, когда откачка применяется именно для уменьшения давления. Например, в химии откачка используется для ускорения фильтрации жидкостей: с нижней стороны фильтра воздух откачивается и жидкость продавливается через фильтр не только собственным весом, но и атмосферным давлением. Применяется откачка и в металлургии для литья деталей, чтобы воздух, остающийся в форме, не мешал металлу поступать в нее.

Применяется откачка и в машиностроении, и в полиграфии, например вакуумные присоски, с помощью которых можно брать по одному листы металла или бумаги из стопки. Вакуумные присоски применяются также и в быту — вспомните мыльницу с двумя резиновыми присосками для крепления к стене. Конечно, этот «вакуум» можно назвать и скромнее — «некоторым разрежением». Разрежение есть и в медицинских банках, которые ставят на спину при простудных заболеваниях.

## 2. В чем содержат вакуум?

Газ растворен в металле? Разумеется, такого не может быть... Разве что в твердом теле имеются поры, а в них — газ?.. Но отдельные молекулы какого-либо газа, вкрапленные в твердое тело, вряд ли можно называть газом: ведь газ — это не просто некоторое количество определенных молекул, это определенное агрегатное состояние того или иного вещества, которое должно подчиняться «газовым законам». А молекулы веществ, являющихся при нормальных условиях газами, попав в твердое тело, этим законам подчиняться перестают. Тем не менее, их называют «газ, раство-

---

\*) Леофильность — (по-гречески) свойство веществ активно взаимодействовать с растворителями. Подразумевается, что вода активно «взаимодействует» с вакуумом, т. е. быстро испаряется.

ренный в металле», и если эти молекулы выделяются обратно из твердого тела, то они снова представляют собой газ. Таким образом, при определенных условиях из твердых веществ могут выделяться молекулы различных газов. Это обстоятельство крайне нежелательно при работе вакуумной техники. Мало приятного, когда в откачиваемый объем из стенок камеры выделяются все новые и новые порции молекул газа. А без твердого тела при получении вакуума не обойтись, поскольку, чтобы получить вакуум, надо отделить откачиваемый газ от атмосферы. И лучше всего это можно сделать именно твердыми стенками. Единственный случай, когда в таких стенках нет необходимости, — это при откачке всей атмосферы сразу (см. роман А. Р. Беляева «Продавец воздуха»). Однако использование вакуумной техники для порабощения человечества, о чем мечтал герой этого романа, — не лучшее ее применение. Но вернемся к проблеме твердых (например, металлических) стенок, отделяющих вакуум от атмосферы. Из этих стенок выделяются и попадают в вакуум молекулы газов, и, как мы уже знаем, этот процесс мешает получать высокий вакуум. От чего зависит его скорость? Сначала — от скорости отрыва молекул газа от поверхности металла (этот процесс называется десорбцией). По мере того как все больше и больше молекул газа из поверхностного слоя металла уходит в вакуум, поток газа уменьшается, так как молекулам приходится «пробираться» к поверхности через все более толстый слой металла. Наконец, поток газа начинает ограничиваться (лимитироваться) скоростью диффузии.

Понятие лимитирования многостадийного процесса какой-то одной стадией очень важно для физики вообще, так как практически любой процесс многостадийен. Общая скорость протекания процесса или количество объектов «проследовавших» по всему процессу, определяется обычно какой-то одной стадией. Пока молекул газа в металле много, лимитирующей стадией является десорбция. Когда молекул газа становится мало, диффундирующий поток уменьшается, и тогда уже определяющей стадией становится диффузия.

✓ Из чего делают «стенки» для вакуума? В вакуумной технике в основном применяют металлы, керамику, стекло, реже пластмассы. Еще реже — слюду и некоторые лаки. Вакуумные требования к материалам просты и понятны: они не должны портить вакуум, т. е. должны слабо испаряться сами и содержать мало выделяющихся в вакуум примесей. Основные «неприятные» примеси — это находящиеся в твердых материалах газы. Правда, легко испаряться могут не только газы, но и сами металлы. Например, быстро испаряются цинк

и кадмий. При температуре всего лишь  $200^{\circ}\text{C}$  цинк испаряется со скоростью  $1\text{ мкм/ч}$ , а кадмий —  $30\text{ мкм/ч}$ . При нагреве до  $300^{\circ}\text{C}$  скорости испарения цинка и кадмия увеличиваются в 300 раз. Поэтому латунь, кадмированное или оцинкованное железо применять для деталей, работающих в вакууме, нельзя. При относительно слабом нагреве на всех соседних поверхностях образуется серый налет цинка или кадмия. Однако летучие металлические примеси — явление редкое, и его можно избежать, всего лишь навсего используя металл, не содержащий этих примесей. А вот от газовых примесей избавиться много труднее. Они попадают в металл и из исходной руды, и на некоторых стадиях изготовления.

Чем определяется концентрация газа, растворенного в металле? На этот вопрос существуют два ответа — термодинамический и микроскопический. Первый краток, второй интересен. Ситуация похожа на ту, которая имеется в механике — законы сохранения дают простое решение задачи, но узнать, как именно протекает процесс, можно только с помощью законов динамики.

Термодинамический ответ: газы растворяются в металле, потому что это энергетически выгодно.

Микроскопический ответ: вокруг металла имеются молекулы газа и существует, следовательно, поток этих молекул, попадающий на поверхность металла. Молекула, оказавшаяся на поверхности металла, с некоторой вероятностью попадает внутрь металла. Поток в металл зависит от концентрации газа над поверхностью металла, от температуры газа (растет с увеличением температуры) и от химических свойств газа и металла, участвующих в процессе.

Если в металле есть примесь газа, то будет существовать и поток газа из металла наружу, зависящий от температуры металла, от того, какой металл и какой газ, и от концентрации газа в металле. При некоторой концентрации газа в металле потоки из металла и в металл станут равными.

Заметим, что при примитивном анализе эти два подхода отвечают на разные вопросы. Например, зависимость предельной растворимости от давления легче получить из второго подхода (микроскопического). Конечно, законы природы неизменны, и любой правильный подход должен давать правильный ответ. Но усилия, затраченные на получение правильного ответа, различны при использовании разных подходов. Искусство исследователя состоит и в выборе метода, дающего правильный ответ, по возможности, дешево и быстро. Р. С. Гутер, которому автор этих строк обязан вообще очень многим (не только уважением к математике), говорил: «Математик —

это человек, который знает общий метод, но умеет без него обойтись». Р. С. Гутер умел найти для каждого из своих учеников эффективный частный прием — он и в педагогике был математиком. Пусть эти строки послужат данью любви и уважения, увы, запоздалой.

Итак, газ растворился в горячем металле. Что дальше? Металл охлаждается, и если растворимость газа при охлаждении убывает, то газу надо куда-то деваться. Продиффундировать до поверхности и вернуться в атмосферу он не успеет, и поэтому газ собирается в виде пузырьков около дефектов кристаллической решетки или границ зерен. Выделяясь в зоне границы, газ образует химические соединения с основным металлом — окислы, нитриды и т. д. При нагреве атомы газа растворяются в металле. Например, если титан нагреть на воздухе, он окислится и станет цветным. Цвет появляется из-за интерференции света в тонкой пленке окисла. В зависимости от толщины пленки ее цвета могут быть разными \*). Если потом нагреть металл в вакууме примерно до 1000 К, он очистится, хотя эта температура для испарения окиси титана будет недостаточна. Тогда куда же девается пленка? Распадется на титан и кислород, а кислород растворится в металле.

### 3. «Быстрорастворимый» водород и другие

Быстрее всего диффундирует и растворяется в металлах водород. С него и начнем. По взаимодействию с водородом основные металлы, применяемые в вакуумной технике, делятся на две группы — те, в которых водород просто растворяется, и те, в которых водород растворяется, образуя соединения, называемые псевдогидридами. Отличительный признак для первых — растворимость водорода растет с ростом температуры, для вторых — растворимость водорода с ростом температуры падает. Но на самом деле не все так просто.

---

\*) Из-за интерференции света, отраженного от верхней и нижней плоскостей пленки окисла, гасится часть спектра. Чем толще пленка, тем больше длина волны излучения, которое вычитается из спектра. Для самой тонкой цветной пленки таковым оказывается синее излучение, для более толстой — зеленое, для еще более толстой — красное. Остающееся излучение («дополнительный цвет») выглядит соответственно желтым, фиолетовым и голубым. Эти цвета и бывают у тонких окисных пленок. Сдвиг фазы при отражении от границы воздух — пленка и границы пленка — металл одинаков, поэтому цвета получаются такими, как указано выше. Заметим, что цвета мыльного пузыря другие: при отражении от пленки сдвиг фазы равен  $\pi$ , а при отражении от «воздуха», т. е. от границы пленка — воздух, луча, идущего из пленки, сдвиг фазы отсутствует. Подумайте, какие цвета будут наблюдаться при разных толщинах пленки, а потом сделайте эксперимент и посмотрите.

Рассмотрим, например, зависимость растворимости водорода в марганце от температуры. Мало того, что зависимость растворимости от температуры (рис. 12) немонотонна и что растворимость почему-то при некоторых температурах меняется скачком, но и сами эти скачки какие-то странные. Явление, наблюдающееся в области температур 950—1050 К, называется гистерезисом. Но рассмотрим все по порядку. При увеличении

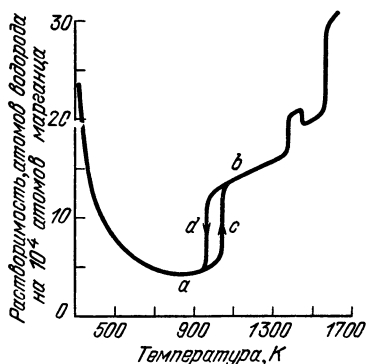


Рис. 12. Растворимость водорода в марганце

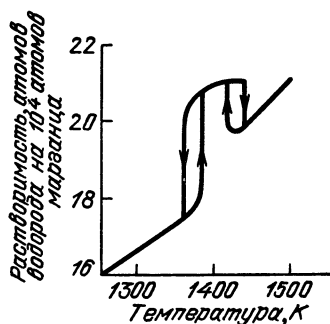


Рис. 13. Растворимость водорода в марганце при температуре от 1300 до 1500 К

температуры примерно до 800 К растворимость водорода в марганце сначала убывает, потом возрастает с ростом температуры примерно до 1050 К. При температуре 1050 К растворимость скачком возрастает больше чем вдвое (участок кривой *c*) и продолжает расти при увеличении температуры примерно до 1350 К, претерпевает еще два скачка, затем продолжает расти и опять делает скачок. При уменьшении температуры примерно от 1050 до 950 К растворимость убывает, при этом скачок наблюдается в области меньших температур — участок кривой *d*. Теперь посмотрим внимательнее на участок 1300—1500 К (рис. 13). Никто не скажет, что зависимость растворимости водорода в марганце от температуры недостаточно сложна...

Поведение других металлов по сравнению с марганцем более просто. Металлы, в которых водород растворяется без образования псевдогидридов, — это, например, Cu, W, Mo, Fe, Ni, Cr, Co, Ag, Pt. Растворимость водорода при 500—1000 °С равна по порядку величины  $10^{-5}$  —  $3 \cdot 10^{-4}$  атомов водорода на один атом металла. Зависимость растворимости от температуры для этих металлов не гладкая, а имеет скачки при тех значениях

температуры, при которых в металлах происходит перестройка кристаллической решетки, причем в высокотемпературной фазе растворимость выше. Это можно качественно объяснить следующим образом: при повышении температуры амплитуда колебаний атомов решетки возрастает, и поэтому более высокотемпературная решетка — более «рыхлая», т. е. атомы металла расположены дальше один от другого. А в более рыхлой решетке может разместиться больше атомов водорода.

Вернемся к системе марганец — водород. У марганца четыре кристаллографические модификации. Температуры, при которых происходят переходы одной фазы в другую, составляют 1000, 1350, 1410 К. Сопоставьте эти значения температуры с соответствующим рис. 12. Становится понятным, почему происходят скачки, но почему скачок при 1410 К идет в обратную сторону и почему появляется гистерезис? А также почему зависимость растворимости от температуры в самой низкотемпературной фазе немонотонна? Возможно, с разными фазами марганца водород взаимодействует по-разному — в одной фазе растворимость убывает с увеличением температуры, в остальных растет. Но здесь видно, что даже в пределах одной фазы растворимость меняется немонотонно! Да, природа устроена нетривиально...

Однако вернемся к нормальным металлам, на сей раз к тем, которые образуют псевдогидриды: Ti, Zr, Ta, V, Pd, La, Th, Nb. Растворимость водорода в них значительно выше, чем в остальных металлах, — в  $10^3$ – $10^4$  раз. И хотя трудно представить, что два атома водорода растворяются в одном атоме Ti, Zr и V, тем не менее это так.

Правда, металлом такое вещество уже назвать трудно. В обычном своем виде титан по удельной прочности (отношение прочности к массе) превосходит сталь и поэтому используется в авиации, ракетостроении и для альпинистского снаряжения. Титан, поглотивший водород в указанной выше дозе (2 атома H на один атом Ti), — серый порошок, крошащийся в пальцах.

Именно таким способом можно превращать твердый титан в порошок — насытить титан водородом, раскрошить, а потом водород удалить. Водород из титана удаляют, естественно, нагревом, так как в металлах этой группы растворимость водорода с ростом температуры убывает. Кстати, так делают «генераторы водорода» — источники водорода для наполнения им герметичных приборов. Внутри помещают кусочек титана, насыщенного водородом, и, нагревая его, вводят водород в объем прибора.

Техника всему находит применение, и если вы найдете у чего-либо какое-нибудь новое свойство, не огорчайтесь, что

ему еще не найдено применение. Это может произойти завтра.

Растворяются ли в металлах другие газы? Да, например, азот растворяется в Fe, Cu, Mo, W, но в количествах меньших, чем водород. Кислород растворяется в большинстве металлов, примерно в тех же количествах, что и водород при образовании твердых растворов. Растворимость азота и кислорода обычно увеличивается с ростом температуры, но бывают исключения. Например, растворимость азота в железе уменьшается с увеличением температуры от 1200 до 1700 К, а растворимость кислорода в серебре имеет минимум при 700 К. Впрочем, по сравнению с поведением водорода в марганце все это не выглядит слишком сложным.

Растворение газа в металле иногда даже успешно используется — например, откачка водорода титаном. Но плохо, когда растворенный газ начинает выделяться в вакуум, ухудшая его. Для этого газу надо продиффундировать к поверхности. Не будем рассматривать механизм диффузии — это прекрасно сделано в книге Б. С. Бокштейна «Атомы блуждают по кристаллу» (М.: Наука, 1984. — Библиотечка «Квант», вып. 28). Заметим лишь, что скорость диффузии увеличивается с увеличением температуры, а поскольку обезгаживание (как и любой технологический процесс) нежелательно вести долго, его стараются осуществлять при высокой температуре, чтобы за счет увеличения коэффициента диффузии быстро обезгазить возможно более толстый слой металла. При этом надо создать над металлом среду, в которой нет газов, чтобы они не растворялись в металле (оказывается, чтобы получить «вакуумный» материал, нужен или вакуум, или чистый инертный газ).

Как всегда, реальная ситуация сложнее. Во-первых, добавив некоторые примеси к металлам, можно уменьшить газовыделение из металлов. Например, примесь магния удерживает кислород в никеле, так как магний образует прочное соединение с кислородом. Казалось бы, если магний удерживает кислород, то последний не должен выделяться и при работе в вакууме. Однако возможны ситуации, когда при отжиге кислород не выделяется, а при последующей работе в вакууме — выделяется.

Во-вторых, примеси могут увеличивать газовыделение, даже если сами они в вакуум не выделяются. Так, углерод испаряется очень медленно и сам удаляться из металла в вакуум не будет, хотя диффундирует он быстро и быстро подходит к поверхности металла, но с поверхности он испаряется медленно. Однако, если на поверхности металла есть окислы —

а они там почти всегда есть, — то углерод, подойдя к поверхности, соединится с кислородом, восстановив металл, и в виде окиси или двуокиси углерода уйдет в вакуум. Это произойдет даже в том случае, если окислы сами по себе при этой температуре не разлагаются и в отсутствие углерода вакуум не ухудшают. Плюс на плюс дает ... минус! Две сами по себе не очень вредные примеси становятся весьма вредными, если оказываются вместе. Именно поэтому одним из наиболее распространенных материалов вакуумных систем является сталь с малым содержанием углерода.

В-третьих, отжиг в высоком вакууме дорог — высоковакуумные установки дороже и эксплуатация их сложнее, чем низковакуумных, а при отжиге в низком вакууме металлы захватывают газ из среды. Ситуация относительно проста, если растворимость газа в металле уменьшается с ростом температуры — металл отжигают при высокой температуре, быстро охлаждают и получают его чистым. А если растворимость с ростом температуры увеличивается? При высоких температурах металл «наглотается» газа, при низких он и рад бы очиститься, но время очистки из-за уменьшившейся при охлаждении скорости диффузии будет слишком большим, и очиститься он не успеет. В этом случае проводят отжиг в высоком вакууме.

Нагретая в вакууме деталь из нержавеющей стали, содержащей хром, становится синей. Она покрылась слоем окиси хрома. Можно было бы заподозрить выделение кислорода из объема и окисление им хрома на поверхности, но оказывается, что источник кислорода — это вакуум. Окись хрома разлагается весьма медленно, и достаточно ничтожного количества прилетающих из «вакуума» атомов кислорода, чтобы сталь, содержащая хром, не очищалась, а окислялась. Вот, например, окись никеля или меди разлагается быстро, и при нагреве в вакууме, даже содержащем кислород, они не окисляются, а точнее — восстанавливаются быстрее, чем окисляются. Какие давления кислорода допустимы при нагреве различных металлов? На рис. 14 показаны предельные давления

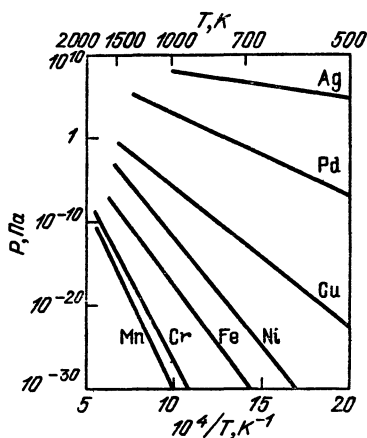


Рис. 14. График зависимости  $\lg P(1/T)$  для различных металлов



кислорода, разделяющие области окисления и восстановления для различных металлов. Выше прямых — область окисления, ниже — область восстановления.

Поверхностное окисление — процесс довольно загадочный. Например, сталь с содержанием 0,1 % углерода и 18 % хрома при нагреве в вакууме может окислиться, а с меньшим содержанием углерода и теми же 18 % хрома — нет. Казалось бы, причем здесь углерод? Однако факты — вещь упрямая.

Окисление металлов при отжиге — это «внутреннее дело» вакуумной техники, а вот интерес, проявляемый в последнее время к проблеме «водород в металлах» специалистами других областей техники, сильно возрос. Оказалось, что эта проблема связана с фундаментом цивилизации — энергетикой. Одна из ее частей сейчас так и называется — «водородная энергетика». Водород — идеальное топливо, калорийное и экологически чистое (единственный продукт сгорания — вода), а выработанную любым способом энергию можно превращать в запас водорода, разлагая посредством электролиза воду. Остается проблема — как хранить и транспортировать водород?

Конечно, водород можно хранить в сжатом или жидком виде. Но сжатие и сжижение водорода требуют значительного количества энергии. Проще насытить некоторые металлы водородом до превращения их в гидриды — соединения этих металлов с водородом. Содержание водорода в гидридах металлов больше, чем даже в жидком водороде. Так, в 1 м<sup>3</sup> сжатого до давления 100 атм водорода содержится  $5 \cdot 10^{27}$  атомов, в 1 м<sup>3</sup> жидкого водорода —  $4 \cdot 10^{28}$  атомов, а в 1 м<sup>3</sup> гидридов — от  $5 \cdot 10^{28}$  атомов (LiH, CaH<sub>2</sub>, LiAlH<sub>4</sub>) до  $10^{29}$  атомов (TiH<sub>2</sub>, VH<sub>2</sub>).

Перейдем теперь от металлов к другим материалам, применяемым в вакуумной технике. Какие газы растворяются в стекле и керамике и выделяются из них в вакууме? В основном — гелий, и обусловлено это тем, что газы растворяются и диффундируют в диэлектриках, в отличие от металлов, без диссоциации на атомы. Самый маленький атом — у водорода, и его коэффициент диффузии и растворимость в металлах больше, чем других газов; самая маленькая молекула — у гелия (его молекула — это один атом), и он лучше всех диффундирует в диэлектриках. Диаметр атома H  $0,37 \cdot 10^{-10}$  м, у всех прочих газов он не менее, чем у N —  $0,55 \cdot 10^{-10}$  м. Диаметр молекулы He  $1,1 \cdot 10^{-10}$  м (молекула He состоит из одного атома), у других газов он не менее, чем у H<sub>2</sub> —  $2,7 \cdot 10^{-10}$  м. Маленькие атомы способны размещаться и диффундировать между атомами основного материала, а большие могут диффундировать лишь по дефектам кристалли-

ческой решетки. Правда, при обезгаживании стекла в основном выделяются пары воды и отчасти углекислый газ, но эти газы выделяются из поверхностных слоев стекла, а сейчас мы говорим о свойствах объемных. Итак, сквозь стекло диффундирует лучше всего гелий, и его проникновение в вакуум из атмосферы часто ограничивает вакуум, который можно получить в стеклянных приборах. Явление это настолько важное, что разработаны специальные сорта стекла с уменьшенной скоростью диффузии гелия. Эта скорость растет с ростом суммарного содержания  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ , поэтому в сорта стекла с уменьшенной диффузией гелия стараются вводить другие окислы.

Заметим, что разделение свойств стекла на поверхностные и объемные в некоторой степени условно, ибо у его поверхности есть слой измененного состава, содержащий воду, гидроксиды и карбонат натрия. Этот слой и выделяет при нагреве до  $300-450^\circ\text{C}$  значительное количество газа, поэтому стеклянные детали вакуумных приборов полезно предварительно (т. е. до начала работы приборов) обезгаживать при этих температурах. В более глубоких слоях стекла также имеется вода, но эти слои обезгаживаются при  $400-600^\circ\text{C}$ , поэтому обезгазить их прогревом трудно (при таких температурах даже специальное стекло, используемое в вакуумных приборах, уже заметно размягчается); но это и не так уж важно, ибо при работе прибора температура стекла недостаточно высока, чтобы шло выделение газов из глубоких слоев стекла.

Газовыделение стекла в основном обусловлено его плохой химической стойкостью — оно взаимодействует с водой (вода — довольно хороший растворитель) и с углекислым газом воздуха. Керамика более химически стойка, чем стекло, и газовыделение из нее меньше, чем из стекла, в десятки и сотни раз. Поэтому в высоковакуумных приборах стараются применять не стекло, а керамику. Однако некоторые детали (например, длинные тонкие трубки) из стекла сделать проще. Кроме того, некоторые детали вакуумных установок и приборов должны быть прозрачными. Не зря говорят, что лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. Правда, у стекла есть конкурент — прозрачная керамика. Но она дороже и обрабатывать ее сложнее.

#### **4. «Конструктор» — не детский, а вакуумный**

Насосы и вакуумметры, которые применяются в технологических установках, использующих невысокий вакуум, не имеют качественных отличий от рассмотренных

выше. Основное отличие количественное — насосы должны обеспечивать удаление больших потоков газа, поступающих от нагретых материалов, т. е. иметь высокую скорость откачки. Достигается это, как правило, увеличением габаритов и потребляемой мощности. Если насосы для откачки электровакуумных приборов имеют размеры, грубо говоря, от посылочного ящика до стола, то насосы для откачки технологических установок бывают размерами и со шкаф, и с комнату.

Однако недостаточно иметь вакуумный насос и вакуумметр, чтобы получить работающую вакуумную установку. Действительно, водопроводная сеть состоит не только из скважины в земле и манометра, измеряющего давление. С трубами и кранами связано в нашей жизни множество проблем. И в вакуумной технике, кроме насосов и вакуумметров, есть то, что называется «вакуумная арматура». Это камеры, трубы, соединяющие насосы и камеры, краны и вентили (трубы эти надо открывать и закрывать), разъемные и неразъемные соединения (элементы вакуумных систем надо соединять и разъединять), шлюзы и люки (в камеры надо что-то класть и что-то оттуда вынимать), вводы движения (в камерах часто надо что-то передвигать), вводы электроэнергии и окошки. Вакуумная арматура — составная часть всех вакуумных установок, больших и маленьких, низковакуумных и высоковакуумных. Конечно, в установках разных классов вакуумная арматура имеет свои особенности.

Вся вакуумная арматура (как, впрочем, и вакуумные насосы) делается из большого количества разных материалов. Поэтому возникает проблема вакуумно-плотного\*) (не пропускающего газы) соединения разных материалов. Например, вакуумную камеру надо сварить из металлических листов. Это и есть первый пример неразъемного соединения. Вакуумная сварка отличается от прочей тем, что шов не должен выделять газы и не должен пропускать газы из атмосферы. Собственно говоря, при любой сварке имеется в виду, что сваренный материал без дефектов, но для вакуумной аппаратуры требования более жесткие. Поэтому обычно применяется сварка электрической дугой, горящей в струе аргона, и сварка электронным лучом в вакууме. При таких видах сварки в металле растворяется меньше газов. Применяется также и пайка,

---

\*) Соединения, находящиеся внутри вакуумной камеры, могут и не быть вакуумно-плотными. Они могут выполняться любыми способами, например контактной сваркой; главное, чтобы они не имели «карманов» — полостей и щелей, из которых трудно откачивать газ.

с которой некоторые из вас (радиолюбители) знакомы. Конечно, вакуумно-плотная пайка сложнее, но основная проблема пайки — как сделать, чтобы припой смачивал материал, — остается прежней. Иногда для улучшения смачиваемости приходится применять гальванические покрытия — например, стали, содержащие хром, предварительно покрывают никелем, чтобы окись хрома не мешала припою смачивать металл. Пайкой удастся соединять металлы, которые не свариваются, и понятно, почему — пайка ведь не соединяет металл *A* и металл *B* — она соединяет металл *A* с металлом *C* (припоем) и металл *B* с металлом *C*. Важно правильно выбрать припой. Но пайка сложнее и дороже. Реальная ситуация такова: при изготовлении вакуумной аппаратуры, когда есть возможность выбирать материал, сварка применяется шире, в частности, потому, что при возможности выбираются те материалы, которые хорошо свариваются. Основным материалом вакуумных систем — стали, содержащие хром и никель, — хорошо свариваются и плохо паяются. Пайка шире применяется при производстве электронных приборов, ибо позволяет соединять большее количество разных металлов, детали сложной формы, с толстыми и тонкими стенками, массивные металлические детали с тонкими фольгами и даже с металлическими пленками, нанесенными на диэлектрики, — все то, что сваривать трудно или невозможно. Вакуумно-плотная пайка чаще всего производится при нагреве деталей в печах, а большую деталь вакуумной аппаратуры в печь не засунешь, зато маленькие детали электронного прибора можно помещать в печь по многу сразу, что удешевляет процесс и увеличивает его производительность.

Сварку и пайку объединяет то, что для обоих процессов необходимо расплавление либо соединяемых материалов, либо третьего материала — припоя. А нельзя ли при сварке плавить только один из соединяемых материалов? Конечно, можно. Иногда этот процесс называют «сварка оплавлением», и технологически он больше похож на сварку, а физически — это пайка одного металла расплавленным другим. Практически так соединяют металлы, один из которых существенно более тугоплавок, чем другой, например молибден и медь, вольфрам и молибден. Если попробовать их сваривать, «как обычно», то когда мы расплавим один, второму будет чуть тепло, а когда мы расплавим второй, первого уже не останется — он закипит и испарится.

Но можно соединять материалы вообще без плавления. Если их плотно сжать и нагреть, то за счет диффузии молекулы одного проникнут в другой. Этот процесс называется диф-

фузионной сваркой. Ее обычно производят в вакууме\*), чтобы соединяемые поверхности были чистыми, и диффузия неминуемо соединяет очищенные, плотно сложенные, сдавленные и достаточно нагретые поверхности. Правда, в диффузионной зоне (зоне взаимного проникновения) могут образовываться непрочные соединения и шов рассыпется, но это может произойти и при любой другой сварке. Диффузионная сварка, как и пайка, применяется в основном не при изготовлении вакуумной аппаратуры, а в производстве электровакуумных приборов.

К категории неразъемных соединений относится большинство электровводов и окошек. В качестве диэлектрика в электровводах и окнах применяют многочисленные сорта стекла и керамики, ситаллы, кварц, иногда слюду и даже такие экзотические для вакуумной техники материалы, как кремний, германий и сапфир (монокристаллическая окись алюминия). Кварц и сапфир хорошо пропускают инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, а кремний и германий — инфракрасное (про них говорят «прозрачный в инфракрасном диапазоне», «прозрачный в ультрафиолете»). Так что без этих материалов не обойтись, но если различные методы изготовления вакуумного спая стекло — металл разрабатываются с конца прошлого века, с первых ламп накаливания, то спаи кремния и германия со стеклом и сапфира с металлом и стеклом созданы относительно недавно.

Проблема, возникающая при соединении различных материалов между собой, — согласование термических расширений. Если одна деталь должна была бы при нагреве расшириться на большую величину, чем другая, спаянная с ней, то в первой при нагреве возникают напряжения сжатия, во второй — растяжения. Действительно, деталь, которая должна была бы расширяться меньше, не будет давать расширяться другой, т. е. будет ее сжимать.

В случаях, когда «согласованный спай» металла с диэлектриком сделать нельзя, стараются металлическую деталь сделать тонкой, чтобы она легко деформировалась и не давала напряжениям в хрупком материале достигнуть опасных значений. Так соединяют стекло и медь (у меди тепловое расширение значительно больше, чем у стекла), кварц и металлы (у кварца тепловое расширение очень мало). Но такие спаи менее на-

---

\*) Это условие не является обязательным — если нагрев достаточен, примеси растворятся в металле. Например, «сварку взрывом» производят на воздухе. При этом с помощью взрыва очень сильно «ударяют» один материал о другой.

дежны, их стараются все же избегать, соединяя медь со стеклом через сплавы, хорошо согласующиеся со стеклом, а кварц с металлами — через несколько переходных стекол с промежуточными значениями коэффициента теплового расширения. Чтобы сделать переход, надо последовательно спаять 4—6 стекол специально подобранных марок. И так плохо, и эдак...

Любая техническая задача имеет несколько решений. Какое решение эффективнее? Для ответа на этот вопрос надо знать, что важнее — малая стоимость или быстрота реализации? Хорошие технические параметры или малый «технический риск» (малая вероятность неудачи)? Никогда одно не может быть настолько важнее другого, чтобы это другое игнорировать совсем. Учитывать надо все — в этом и состоит мудрость.

Ситуация выбора при оценке многих параметров имеется и при выборе способа соединения материалов. Например, один тип спая металла с керамикой надежнее, а другой имеет меньшие габариты. А тот, который и мал, и надежен, требует для изготовления дефицитных материалов. И так далее...

К неразъемным соединениям сводится заметная часть вакуумного «конструктора». Остальное — это разъемные соединения и «вводы движения». К разъемным соединениям относятся коммутационная аппаратура — все, предназначенное для открытия и закрытия трубопроводов: краны, вентили, затворы. К ним также относятся предназначенные для проникновения внутрь вакуумных систем шлюзы (промежуточные камеры, которые можно откачивать) и люки.

А что такое «ввод движения»? Очень часто надо, чтобы в вакууме что-то перемещалось, причем чтобы этим перемещением мы могли точно управлять. Иногда надо перемещать с микрометрической точностью! Проще всего сделать в стенке вакуумного объема отверстие, пропустить через него металлический вал, а место прохода вала через отверстие уплотнить резиновой прокладкой. Действительно, выводят же из подводных лодок валы гребных винтов! Правда, в вакуумной технике требования к герметичности выше и такие уплотнения применяются редко, обычно в том случае, если нужен не очень высокий вакуум.

Другой способ передачи движения в вакуум — через гибкую стенку. Если стенка достаточно тонкая, то, нажимая на нее с одной стороны, легко вызвать ее деформацию и движение предмета, прижатого к ней с другой стороны.

Разновидностью гибкой стенки являются так называемые сифоны (рис. 15), похожие на гофрированный шланг — только металлический и, естественно, тонкостенный. Впрочем, ког-

да-то применялись и стеклянные сиффоны. Они допускали меньшие перемещения, чем металлические.

Еще способ передачи движения через стенку — посредством магнитного поля. Ротор электродвигателя располагают

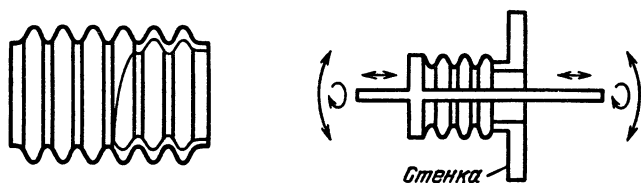


Рис. 15. Сиффон и передача движения с его помощью

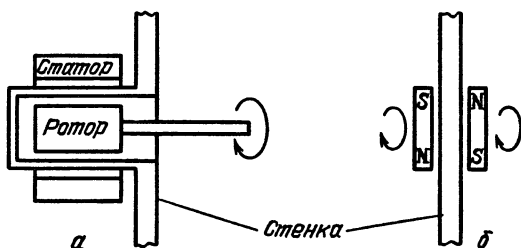


Рис. 16. Магнитная передача

с одной стороны стенки, а статор — с другой (рис. 16, а). А можно воспользоваться и постоянными магнитами (рис. 16, б). От такой передачи один шаг до помещения в вакуум электродвигателя целиком. И такие двигатели существуют, но статор, а точнее, его обмотку, поместить в вакуум много сложнее, чем ротор, на котором обмотки может и не быть, и без нужды такие двигатели не применяют. Дело в том, что газовыделение изоляции обычных проводов обильно и длительно. Впрочем, существуют провода в стеклянной изоляции — тонкое стекло гибко. Любую техническую задачу можно решить многими способами.

Вернемся к разъемным соединениям. К ним сводится вся остальная вакуумная арматура, а основа их — мягкая прокладка между двумя твердыми деталями (рис. 17). Если твердые детали так сжимают мягкую прокладку, что между ними нигде не остается ни щелки, мы имеем вакуумное уплотнение.

Прокладка может быть упругой, например резиновой (для непрогрываемых вакуумных систем), или неупругой, из мягких металлов, таких, как индий, или более твердых — например алюминия и меди. Прокладки из металлов можно прогревать вместе с установкой, но так, чтобы они не расплавились.

Впрочем, при малой толщине расплавленный металл не вытечет, ибо его удержит поверхностное натяжение. Но нет в мире совершенства, как говорил Лис (А. Сент-Экзюпери «Маленький принц»), — расплавленный индий растворяет сталь (между

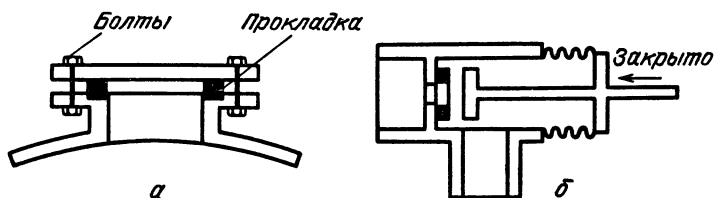


Рис. 17. Разъемные уплотнения: а — люк; б — кран

стальными фланцами можно зажать тонкий слой индия или медную проволоку, покрытую тонким слоем индия). Постоянно ведутся поиски термостойких пластмасс с малым газовыделением; применяют, например, фторопласт (тефлон), допускающий прогрев до  $200^{\circ}\text{C}$ , есть и более термостойкие полимеры (витон).

Различных видов разъемных соединений существует великое множество, люки и краны бывают диаметром от сантиметра до метров, управляют ими и вручную, и моторами, бывают

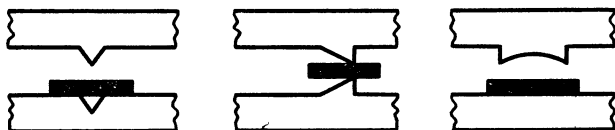


Рис. 18. Метод уплотнения твердых прокладок

они прогреваемые, непрогреваемые и даже охлаждаемые (чтобы не перегреть резину при общем обезгаживании установки прогревом), но основной принцип их работы таков: мягкое между твердым. И главный вопрос — насколько мягкое. Чем выше вакуум, который надо получить, тем, как правило, сильнее надо прогревать установку, тем более тугоплавким должен быть материал прокладки, но тем он оказывается и тверже, и для его деформации нужны большие давления. А чтобы усилия при уплотнении не были слишком велики (удобство эксплуатации), надо деформировать прокладку чем-то острым (ведь и шьют иглой, а не гвоздем). Поэтому уплотнения имеют обычно острые кромки и зубья, врезающиеся в прокладки (рис. 18), а для изготовления таких уплотнений нужна высокая точность обработки.



## ВСЕ ВЫШЕ И ВЫШЕ

## 1. Зачем потребовался высокий вакуум

Высоким вакуумом называют такое разрежение, которого трудно добиться. Поэтому тридцать лет назад высоким вакуумом называли такой вакуум, который бы сейчас этого титула не удостоили. Слово «высокий» иногда применяют вместо слова «большой» или «хороший», когда надо подчеркнуть сложность достижения. Вся история вакуумной техники — это история достижения все более высокого вакуума.

А потребовался высокий вакуум впервые для электронных ламп. Откачка и поддержание вакуума в лампах занимают в вакуумной технике особое место. Это область, которой вакуумная техника обязана своим существованием, область очень глубоко разработанная. Но из этой же области родилась горькая шутка: «Вакуумная техника — вещь в себе, сиречь — непознаваемая». Современная аналитическая техника позволяет обнаруживать тысячные доли монослоя (слоя толщиной в одну молекулу) чужих атомов на поверхности. Созданы приборы, позволяющие различать 5 изотопов ксенона отдельно и отличать  $N_2$  (молекулярная масса 28,013) от CO (молекулярная масса 28,010). Но вся эта техника тогда еще не была создана, она появилась гораздо позже, чем электронные лампы. Основные знания по технологии ламп были обязаны своим возникновением не только научным исследованиям, но и опыту технологов. В результате люди чаще знали, как надо делать лампы, чем понимали, почему их надо делать именно так.

Почему вообще для работы электронных ламп нужен вакуум? Во-первых, чтобы электроны не «запутывались» в молекулах, а летели свободно. Во-вторых, в приборах с тонким и длинным электронным лучом (а таковы почти все современные электровакуумные приборы) ионы, получающиеся при ионизации молекул газов, втягиваются электростатическими силами в электронный пучок и начинают колебаться в нем, что вызывает колебания плотности электронного потока и появление вредного шумового сигнала на выходе прибора. В-третьих, источ-

ником электронов в лампах является катод, как правило, термоэлектронный (т. е. эмиттирующий при нагреве), а для его работы нужен высокий вакуум.

Требования к термоэлектронному катоду просты: поставлять (эмиттировать) в лампу необходимое для ее работы количество электронов и, по возможности, ничего лишнего. Однако раз он нагрет, значит — испаряется, а следовательно, загрязняет лампу и вызывает появление тока утечки по изоляторам. Что будет, когда он испарится весь? Конечно, испаряться он перестанет, но ведь и эмиттировать электроны станет некому. Поэтому катод должен эмиттировать при сравнительно низкой температуре, чтобы иметь малую скорость испарения и, следовательно, большой срок службы.

В качестве термоэлектронных эмиттеров пытались применять много разных веществ. Сейчас большинство термоэмиттеров выполнено на основе окислов щелочноземельных металлов — Ba, Sr, Ca. Окислы эти на воздухе неустойчивы — взаимодействуют с  $H_2O$  и  $CO_2$ , поэтому катод делают из карбонатов ( $BaCO_3$  и т. д.), и при первом его нагреве уже в лампе карбонаты разлагаются до окислов, выделяя  $CO_2$ . Вот вакуумная техника и потребовалась —  $CO_2$  надо откачивать, да так, чтобы детали лампы не окислились! Иначе потом окислы эти будут разлагаться в уже работающем приборе, выделять кислород и — это забавный, но общепринятый термин — «отравлять» катод. Дело в том, что окись, в которой число атомов металла точно равно числу атомов кислорода, плохо эмиттирует электроны. Для того чтобы окись стала хорошим эмиттером, надо, чтобы в ней был маленький (около 0,1 %) избыток атомов металла. Откуда он берется? При нагреве окисла в вакууме испаряется и металл, и кислород, но поскольку кислорода испаряется немного больше, в окисле накапливается избыточный металл, и эмиссия возрастает. Однако если среди остаточных газов в лампе есть кислород или углекислый газ, они окисляют этот избыточный металл, и катод — а вместе с ним прибор — выходят из строя. Вот зачем еще нужен высокий вакуум в электровакуумных приборах.

Мы увидели, что важно не только откачать лампу в начале ее «жизненного пути», но и не допустить ухудшения в ней вакуума в течение десятков и сотен тысяч часов работы и хранения. К этому есть два пути: возможно лучше обезгаживать лампу и применять встроенные в лампу насосы. При изготовлении ламп стараются использовать чистые материалы, перед сборкой очищают детали, в процессе откачки лампы обезгаживают ее электроды прогревом, электронной и ионной бомбардировкой. При этом важно не только максимально быстро, но и

максимально чисто откачать лампу, ибо обратный поток паров масла из диффузионного насоса ее загрязняет. Поняли это тогда, когда обратили внимание на то, что в некоторых случаях уменьшение времени откачки улучшает параметры ламп. Оказалось, что уменьшение загрязнения маслом (при уменьшении времени откачки) для некоторых ламп гораздо существеннее, чем увеличение выделения газов из менее тщательно обезгаженных деталей. Но когда начали проверять этот эффект, выяснилось, что влияние масла на лампу зависит и от типа лампы, и от сорта масла. Ситуация стала еще сложнее, когда оказалось, что масло из механического насоса попадает (через диффузионный насос, навстречу потоку откачиваемых газов!) в откачиваемый объект.

«Масляные» проблемы техника в некоторой степени обошла, перейдя к так называемой «безмасляной откачке», т. е. создав насосы, не содержащие масла. Но, во-первых, многие приборы и по сей день откачиваются диффузионными масляными насосами, а, во-вторых, иногда приходится возвращаться к старым техническим решениям — а у диффузионных насосов свои преимущества.

При откачке вакуумных приборов и установок, как и при откачке технологических установок, важно учитывать время откачки. Если вакуумный прибор, который будет летать на спутнике, откачивается и обезгаживается несколько десятков часов, то ничего страшного в этом нет — таких приборов изготавливается не так уж много. Но разве может занимать такое же время вакуумную установку лампа или кинескоп, которые выпускаются сотнями тысяч в год? Кстати, это еще одна причина, которая заставляет сокращать время откачки ламп. Насос с большой скоростью откачки дела не спасает, так как скорость откачки ограничивается штенгелем — тонкой трубкой, которой лампа присоединяется к насосу. Увеличение ее диаметра — это тоже проблема, ибо чем больше диаметр штенгеля, тем труднее отделить («отпаять») лампу от насоса.

Можно попробовать обезгазить катод (основной источник газа) вне лампы, в отдельной вакуумной установке без штенгеля, а потом быстро «перенести через атмосферу» в лампу. Но при этом катод будет взаимодействовать с газами атмосферы. Значит, надо его от них защитить. С этой целью катод после прогрева покрывают тонкой пленкой органического соединения, изолирующего его от воздуха, или переносят его из камеры в прибор, не допуская охлаждения ниже  $200^{\circ}\text{C}$ , что уменьшает поглощение влаги из атмосферы. Иногда удается перенести катод из камеры в прибор в «кастрюле», наполненной аргоном. Последнее возможно только в том случае, когда конструкция электрон-

ного прибора позволяет приварить «кастрюлю» к корпусу прибора и откачать аргон уже через прибор, не допуская контакта катода с атмосферой.

Второй важной областью применения, которая требует улучшения вакуума, являются установки для исследования свойств поверхности. О них будет рассказано в следующей главе. А сейчас перейдем к рассмотрению процессов, которые были изучены на долгом пути, пройденном вакуумной техникой от первых электронных ламп до современных, летающих на спутниках и работающих сотни тысяч часов благодаря высокому вакууму. Давление в этих лампах удается уменьшить до  $10^{-8} - 10^{-9}$  Па.

## 2. Газ проходит сквозь стену

Газы из атмосферы могут проникать сквозь поры, трещины и иные дефекты материалов. Дефекты эти принято называть микродефектами, и действительно, если они не видны в оптический микроскоп, то размер их невелик — десятые доли микрометра. Но для молекул это все равно, что глубокая река для мелкой рыбы. Когда-то вопросы натекания через дефекты считались в вакуумной технике вопросами первостепенной важности. Но технология материалов улучшилась, и значимость этих вопросов уменьшилась. Действительно, если можно сделать материал без трещин и дефектов, то вопрос влияния дефектов на вакуум отпадает сам собой. Вопрос же изготовления вакуумно-плотных материалов перешел в значительной мере в ведение материаловедов. Так вакуумная техника (и это лишь один из множества примеров) способствовала расширению сферы интересов специалистов других областей науки и техники.

Разумеется, в жизни не все так просто, как на бумаге. Сделать вакуумно-плотный материал мало — надо еще его таким сохранить. А трещины могут появиться в процессе, например, хранения вакуумных приборов на складе из-за коррозии. Не следует думать, что для коррозии надо макать металл в азотную кислоту или морскую воду: на поверхности любого материала, если вокруг него воздух, всегда есть слой молекул воды.

Но даже через идеальный материал в прибор проникают газы из атмосферы. И в этом нет ничего странного — достаточно вспомнить, что такое диффузия. Как уже говорилось, газы диффундируют через металл поатомно, через диэлектрики — в виде молекул. Самый маленький атом — у водорода, самая маленькая молекула — у гелия (это его атом!). Поэтому из атмосферы в вакуумные приборы проникают в основном именно водород и гелий, в зависимости от того, из какого материала

сделан корпус прибора. За вековую историю электронных ламп были созданы стекла, через которые гелий проникает достаточно медленно, чтобы лампы сохраняли работоспособность в течение 100 000 часов. Казалось бы, проблема решена. Но гелий неожиданно напомнил о себе. В подводных лабораториях, в атмосфере которых азот заменен гелием, электронные лампы (и в том числе кинескопы в телевизорах и передающие телевизионные трубки в кинокамерах) выходили из строя из-за диффузии гелия через оболочку \*).

Как зависит проникновение газов сквозь металлы от внутреннего строения этих металлов? Во многих металлах преобладает диффузия водорода по границам кристаллов. Поэтому диффузия протекает быстрее в мелкокристаллическом металле, чем в крупнокристаллическом. Казалось бы, надо стараться использовать крупнокристаллические материалы? Но при крупнокристаллическом строении больше вероятность образования сквозных трещин. Любая технология вообще и вакуумная в частности — наука о компромиссах. Иногда удается найти третье решение — не компромиссное, а принципиально новое. Вместо выбора оптимального размера кристаллов можно покрыть стальную оболочку снаружи, со стороны атмосферы, слоем алюминия. Сталь прочна, и она будет нести механическую нагрузку, алюминий будет защищать от проникновения водорода (сквозь алюминий водород не проникает). Или другой путь — покрыть оболочку изнутри, со стороны вакуума, слоем титана. Он поглотит водород, продиффундировавший сквозь прочную оболочку, и не пропустит его внутрь прибора. Этот путь был найден сравнительно недавно \*\*).

Но от диффузии газов сквозь металлы может быть и польза. Не так давно был открыт удивительно красивый эффект под названием «сверхгазопроницаемость\*\*\*). Оказалось, что в некоторых ситуациях, когда вероятность прохождение атома через металлическую перегородку почти равна единице. Металлическая перегородка ведет себя как... отверстие.

Рассмотрим процесс проникновения водорода через металлическую перегородку. Водород сорбируется на металлах в виде атомов, т. е. при сорбции его молекула диссоциирует, разделяется на атомы. Процесс диссоциации требует затраты

---

\*) В мире науки, 1985, № 5, с. 78.

\*\*) Егоров Ю. Г., Глебов Г. Д., Волченков Е. С. Водородопроницаемость биметаллов в вакуумной технике. Тез. докл. Всесоюзного симп. «Состояние и перспективы разработки и производства новых видов вакуумного оборудования», вып. 2. — Л. — М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981, с. 9.

\*\*\*)) Лившиц А. И., Ноткин М. Е. Сверхпроницаемость ниобиевой перегородки по атомам и ионам водорода. — Письма ЖТФ, 1981, т. 23, № 7, с. 1417-1420.

энергии. Так что не каждая молекула водорода, прибывшая на поверхность металла, может сорбироваться. Но пусть все же это произошло. Получившиеся при диссоциации атомы проникают в металл. В металле атомы водорода некоторое время диффундируют, хаотически движутся, и в итоге подходят изнутри к границам перегородки — либо к той, через которую они проникли, либо к другой. Но выйти из металла тоже не всегда просто — для этого двум атомам надо рекомбинировать, т. е. образовать молекуду. Если сделать так, чтобы вероятность десорбции на входной границе была мала (это достигается слабым ее окислением), то атомы будут выходить в основном не через ту границу, через которую вошли, а через другую, и вероятность проникновения станет равна вероятности сорбции.

Теперь предположим, что на поверхность металла попадают не молекулы, а атомы водорода, и диссоциация не нужна. Тогда вероятность проникновения достигает единицы. Может быть, это и странно, но факты — вещь упрямая. В условиях, в которых реализуется эффект сверхгазопроницаемости, поток атомов водорода проходит через металлическую мембрану, как сквозь отверстие. Такой эффект наблюдался для потоков водорода и дейтерия через палладий, железо, никель, ниобий. Между прочим, издавна было известно, что при получении водорода посредством электролиза или химической реакции на металлической стенке-катализаторе получающийся водород легко проникал сквозь металл. Происходило это именно потому, что водород образовывался в виде атомов на поверхности металла и сразу же уходил в глубь металла.

Рассмотрим подробнее, как ведет себя газ не внутри, а на поверхности материала.

### 3. Газ на поверхности

Вопрос о поведении примесей на поверхности для вакуумной техники — важнейший. Достаточно сказать, что если в средней по размерам электронной лампе удалить со всех внутренних поверхностей всего один монослой и оставить эти молекулы в виде газа в лампе, то давление в лампе достигнет значения порядка  $10^{-1}$  Па. Это в тысячи раз больше, чем допустимо при работе средней электронной лампы..., не говоря уже о лампах, в которых давление не должно превышать  $10^{-9}$  Па (это лампы с долговечностью около 100 000 ч, применяющиеся в спутниках связи).

Газовыделение ухудшает работу не только электровакуумных приборов. Казалось бы, где работать вакуумным приборам, как не в космическом вакууме? В космосе вакуум,

конечно, есть, но далеко не везде он такой, как хотелось бы. Для экспериментов с выпуском электронного пучка в вакуум на космической станции «Спэйслэб» был установлен источник электронов — термоэлектронный катод из вольфрама с добавкой соединений бария. Такой катод, как и подавляющее большинство других катодов, хорошо работает только в достаточно высоком вакууме. В нем, как и в катоде из окислов щелочно-земельных металлов, должен быть небольшой избыток металла. А в плохом (низком) вакууме этот избыток быстро окислится. На высоте, где летал «Спэйслэб», вакуум сам по себе достаточно хороший, но газовыделение с корпуса станции сильно его ухудшало. Пришлось поместить катод в специальный объем, откачиваемый вакуумным насосом, и выпускать пучок электронов через маленькое отверстие, такое, что попадание газа, выделяемого с корпуса станции, в этот объем не очень портит вакуум в нем. Вот ведь как бывает — кругом вакуум, а приходится производить откачку...

Газу, удаляющемуся из объема тела, надо добраться до поверхности, выйти на поверхность и десорбироваться с нее. Десорбция требует затраты энергии, поэтому она ускоряется с увеличением температуры. Если мы нагреем металл с сорбированным на поверхности газом, этот газ будет удаляться, причем в ряде случаев прихватывая с собой атомы основного металла. Так испаряются, например, почти все окислы, кроме окислов никеля и меди. То есть если на поверхности, скажем, вольфрама или молибдена сорбируется кислород, то испаряется не кислород, а окись вольфрама или молибдена. Ничего страшного в этом нет, гораздо хуже то, что при термическом обезгаживании поверхности металла из его объема благодаря диффузии к поверхности будут подходить все новые и новые порции газа. Конечно, при этом очищается объем, но если впоследствии эта деталь работает при низкой температуре, то такая очистка (очистка объема) окажется бесполезной (при работе газ из объема и так выделяться не будет), а хорошо очистить поверхность из-за притока газа из объема не удастся. Поэтому необходим способ очистки поверхности, не вызывающий потока газа из объема. Но как это сделать?

Можно, например, нагреть металл импульсной электронной бомбардировкой. Но при ее применении обнаруживается одна странность: выделение газа при нагреве материала до некоторой температуры оказывается во много раз больше, чем при нагреве всего образца до той же температуры. При этом и состав выделяющихся газов оказывается иным. При обычном термическом обезгаживании выделяется много водорода, который легко диффундирует в металлах, а при электронной

бомбардировке — много газов, содержащих кислород ( $O_2$ ,  $CO$  и  $CO_2$ ). Это наводит на мысль, что в поверхностных слоях металлов много кислорода, т. е. металлы окислены с поверхности. И действительно это так, а кроме того, оказалось, что окислы при электронной бомбардировке легко разрушаются, даже если нагрев материала при этом мал. Так, при энергии электронов всего лишь 2,5 эВ разрушается окись никеля, при 17 эВ — окись магния.

При нагреве образца может произойти загрязнение поверхности, очищенной электронной бомбардировкой. Если обезгазить образец бомбардировкой, а потом нагреть целиком, то при вторичном включении электронного облучения газовыделение окажется таким же большим, как при первом обезгаживании. Следовательно, при общем нагреве кислород из толщи материала, действительно, диффундирует к поверхности и на ней образуется окисленный слой.

Газовыделение с поверхности может происходить не только под действием электронного облучения. Например, в мощных электронных приборах при попадании на металл электронного пучка с высокой энергией возникает рентгеновское излучение, которое довольно эффективно разлагает поверхностные соединения и десорбирует с поверхности примеси. Для практики существенно, что при этом возникает газовыделение не с тех деталей, на которые попадают сами электроны, а со всех имеющих в прямой видимости от них (рентгеновские лучи распространяются прямолинейно).

Стенки прибора могут портить вакуум не только посредством газовыделения. Например, они могут испаряться сами.

#### **4. Белье сохнет на морозе, металл испаряется в вакууме**

С увеличением температуры скорость испарения увеличивается, с понижением температуры — уменьшается. Но равной нулю она не становится никогда. Испаряется даже железо при 20 °С, но очень медленно. При этом железо, конечно, разрушается, но, если уж об этом говорить, пожалуй, преобладающим процессом разрушения является не испарение, а, например, коррозия. В некотором смысле похожая ситуация есть и в вакуумной технике — материал, помещенный в вакуум, теряет в массе не только в результате испарения, но и в результате химических реакций. Но пока мы остановимся на испарении.

Вред от испарения двоякий — изменяется та деталь, которая испаряется, и испарившийся материал загрязняет другие детали. Накаленная вольфрамовая нить в катоде электронной лампы и в



обычной лампе накаливания испаряются при работе и делаются все тоньше и тоньше. В итоге они, как говорят, перегорают (хотя и не горят; горение — это окисление). Между прочим, «перегорание» нити в лампочке — процесс не такой уж простой. А именно, если где-то на нити есть трещинка или сужение, то в этом месте сопротивление нити больше. Следовательно, в этом месте больше электрическая мощность и выше температура. При росте температуры увеличивается испарение и уже уменьшенное сечение уменьшается все быстрее и быстрее. Такой процесс называется лавинным. (Все процессы, результат которых ускоряет протекание самого процесса, называются процессами с положительной обратной связью, или лавинными.) Испарившийся с нити вольфрам оседает на баллоне, светоотдача лампочки уменьшается. Во многих случаях для сильного изменения свойств поверхности материалов достаточно напылить на эту поверхность десятки доли монослоя чужого вещества. Потемневшую лампочку просто выкидывают, но со многими другими приборами так поступать нельзя.

В этих случаях применяют специальные меры для уменьшения вредных последствий испарения, например защищают поверхности, чувствительные к напылению, экранами. Есть и другие методы защиты от вредных последствий напылений. Например, можно сделать поверхность изолятора шероховатой, и напыляющаяся на него пленка не будет сплошной и не будет проводить ток (см. рис. 19). А лампы накаливания наполняют инертным газом. Так, если наполнить лампу аргоном с

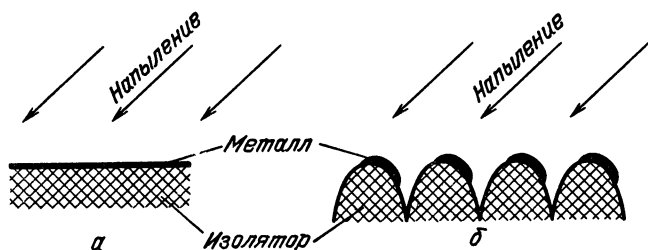


Рис. 19. Пленка металла на изоляторе: *а* — гладкая поверхность изолятора, пленка сплошная и проводит ток; *б* — шероховатая поверхность изолятора, пленка несплошная и ток не проводит

давлением  $10^3 - 10^5$  Па, то скорость испарения вольфрама с нити уменьшится в 4–60 раз соответственно. Инертный газ мешает испарившимся с поверхности нити атомам улетать от нити, и они частично возвращаются обратно.

До сих пор при разговоре об испарении не делалось разницы между твердым и жидким телом. Однако жидкость может

еще и испаряться «внутрь». По определению кипение происходит, когда давление паров жидкости больше внешнего давления и пузырьки увеличиваются в размерах. В достаточно высоком вакууме должна вскипать любая жидкость, независимо от ее температуры и давления пара — внешнего-то давления нет. «Кабина словно взорвалась, меня (героя рассказа А. Ч. Кларка «Сделайте глубокий вдох») обдало могучим вихрем, остатки воздуха вырвались из легких через непроизвольно открывшийся рот... И было очень холодно, возможно потому, что тотчас начала испаряться влага с поверхности тела... Мы почти одновременно бросились в брешь в корпусе... спасатели в скафандрах сразу же подхватили нас и толкнули в переходную камеру».

## 5. Не простое испарение, а стимулированное

Испарение с поверхности может ускоряться во много раз при протекании на ней химических реакций. Эти реакции приводят к изменению состава остаточных газов (газы, остающиеся после откачки) в электронных приборах и к переносу веществ с одних электродов на другие. Внимание исследователей эти реакции привлекли очень давно, поскольку они были обнаружены в электронных лампах.

Но что такое химические реакции на поверхности? Происходит ли химическая реакция, когда атом сорбируется? Если энергия связи невелика, принято называть сорбцию физической, а если она того же порядка, что и при обычных химических реакциях, то ее называют химической сорбцией. Используется еще и такой критерий: если сорбированное вещество выделяется при десорбции в неизменном виде, то это физическая сорбция, а если в виде соединения с каким-либо другим веществом — химическая.

Пример: на поверхность куска молибдена попадает кислород и сорбируется, а если затем молибден нагреть, то десорбируется уже не кислород, а окись молибдена. Другой пример такого процесса: при сорбции  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{H}_2$  на окислах некоторых металлов энергия связи оказывается настолько большой, что при десорбции газы удаляются с них в виде  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . При этом в окисле возникает дефицит кислорода и из окисла начинает ускоренно испаряться металл. На поверхности может происходить и химическое взаимодействие между сорбированными веществами. Например, водород слабо сорбируется на серебре, но если на серебре уже есть сорбированный слой кислорода, то водород «соглашается» на «прилипание», а при последующем нагреве выделяется в виде воды.

Или такой пример: СО способен вытеснить сорбированный на палладии кислород при комнатной температуре. При этом выделяется  $\text{CO}_2$ . А если на том же палладии сорбирован СО, то кислород его может вытеснить только при дополнительном нагреве. При этом также выделяется  $\text{CO}_2$ .

Процессы окисления и испарения окисла могут протекать значительно быстрее, чем процесс испарения основного металла. Например, так обстоит дело в случае, с которого мы начали рассмотрение реакций на поверхности, — система молибден — кислород. Аналогично ведет себя вольфрам, и если у работающей осветительной лампы лопнул баллон, то нить «перегорает» именно химическим путем, и на баллоне оседает белый слой окиси вольфрама.

В процессах, происходящих на поверхности, активно участвуют атомы, диффундирующие из глубины. В частности, если диффундирует кислород, то получающиеся на поверхности молекулы окисла испаряются быстрее, чем толстый слой того же окисла.

При любых поверхностных реакциях ослабляются связи атомов с решеткой и увеличиваются скорости их испарения, даже если сами эти атомы участия в реакциях не принимают. Так это происходит при взаимодействии кислорода и водорода на меди или углерода и кислорода на никеле — скорость испарения меди и никеля в этих случаях возрастает.

Окисленный титан становится чистым при нагреве в вакууме до такой температуры, при которой окись титана еще заметно не испаряется. Титан очищается за счет растворения поверхностного кислорода в своем объеме, и при этом происходит сильное испарение титана. Избыток титана, образующийся в окисле при диффузии из него кислорода в объем металла, быстро испаряется в вакуум.

Вообще окисление металлов — процесс очень непростой. Например, считалось, что если пленка окисла, образовавшегося на металле, не лопается и не пропускает кислород по трещинам к металлу, а сплошной броней отгораживает его от атмосферы, то процесс окисления замедляется при росте окисной пленки на металле, так как для протекания реакции либо металл должен продиффундировать сквозь слой окисла к кислороду атмосферы, либо кислород — сквозь слой окисла к металлу. А с увеличением толщины слоя окисла диффузия замедляется. Между тем коэффициент диффузии алюминия в окиси алюминия весьма велик, и поэтому пленка окиси алюминия не может, казалось бы, эффективно защищать его от окисления. В чем же дело? Для взаимодействия с алюминием кислород прежде всего должен сорбироваться поверхностью окисла. Сорбируется он

в виде ионов  $O^-$ , а подходит к поверхности в виде нейтральных молекул  $O_2$ . Электрон для ионизации кислорода должен «добыть» из слоя окисла, куда этот электрон попадает из металла. Однако проводимость окиси алюминия очень мала, поэтому кислороду трудно сорбироваться по ней, и это резко замедляет окисление алюминия. Это объяснение было получено всего лишь несколько лет назад \*).

Еще более замысловатые процессы могут происходить на поверхности при диффузии примесей из объема материала. Например, если в никеле в качестве примесей содержатся магний и углерод, а в составе остаточных газов имеется кислород, то происходит следующее. Магний диффундирует к поверхности, окисляется, окись магния восстанавливается углеродом с образованием  $CO$ . Две молекулы  $CO$  взаимодействуют, образуя  $CO_2$  и углерод. Казалось бы,  $CO_2$  должен удалиться с поверхности, а углерод остаться? Но нет — в момент образования углерод слабо связан с поверхностью и тоже испаряется.

Если слегка окисленный молибден находится рядом с деталью из графита или никеля с примесью углерода, то происходит следующее: окись молибдена испаряется, попадает на поверхность графита или никеля с углеродом, восстанавливается углеродом, и выделяющийся кислород опять окисляет молибден. Любопытно, что один и тот же кислород много раз «делает свое черное дело» — переносит молибден с детали на деталь. Такие реакции — а в электронных приборах они встречаются часто — называются транспортными. Часто в таких реакциях принимает участие электронный поток — так, например, хлор соединяется с барием на горячем катоде ( $BaO$ ) электронной лампы, хлорид бария испаряется с катода и оседает на анод, где разлагается электронной бомбардировкой, и хлор опять направляется к катоду. Совершенно аналогично происходит процесс с окислами молибдена и вольфрама и парами воды (гидроокиси этих металлов еще более летучи, чем их окислы).

«Тебе придется делать добро из зла, потому что его больше не из чего сделать» (П. Уоррен «Вся королевская рать») — и транспортные реакции можно обратить во благо. Например, галогенные лампы содержат пары иода. Испарившийся с нити и осевший на стекло вольфрам взаимодействует с иодом, образовавшийся иодид вольфрама испаряется и разлагается на горячей нити, после чего иод опять готов к новой реакции, а «шальной» вольфрам, бежавший с нити на баллон, возвращается на место.

---

\*) *Мойжес Б. Я.* О защитном действии окисной пленки на алюминии. — ФТТ, 1984, т. 26, № 2, с. 526 — 577.

## 6. Как откачивать лампы?

Улучшение вакуума в электронных приборах уже более полувека является стимулом к разработке новых насосов. Работа большой группы насосов основана на поглощении газов при напылении на охлаждаемые поверхности. Эти насосы называются сублимационными. Чаще всего напыляют титан. Свеженапыленная пленка сорбирует газы, а если охладить ее, например, жидким азотом, вероятность прилипания к ней молекул увеличивается. Титан в таких насосах испаряют путем сильного нагрева, пропуская по проволоке ток, нагревая титан тепловым излучением или электронным лучом. Одна из возникающих при этом проблем — запыление изоляторов парами металла и попадание этих паров в откачиваемый объем. Другая — нагрев стенок насоса тепловым излучением испаряемого металла, которое распространяется так же прямолинейно, как его атомы. А было бы желательно, чтобы эти стенки, как уже говорилось, были холодными... Как решают эти проблемы? Изоляторы, как обычно в вакуумной технике, защищают от напыления экранами. Но стенки экранами защитить от излучения нельзя, поскольку напыление будет идти не на охлаждаемые стенки, а на эти экраны.

Применяют метод импульсного испарения, основанный на том, что при увеличении температуры скорость испарения растет быстрее, чем тепловое излучение. Поэтому лучше не испарять и при этом непрерывно излучать, а короткое время испарять при более высокой температуре, а потом более продолжительное время и не испарять, и не излучать. В паузе напыленная пленка титана связывает остаточные газы. Кроме того, импульсное испарение позволяет защищать с помощью подвижных экранов, закрывающихся на время испарения, откачиваемый объем от попадания в него атомов титана.

Скорость откачки этого насоса (как и любого другого) хотелось бы увеличить, и особенно по инертным газам, которые сорбируются плохо. Вот если бы уметь ионизировать остаточные газы и, ускорив получившиеся ионы, «вбивать» их в стенку! Сделать такой насос, называемый ионным, можно, но уж если ионизировать остаточный газ, то его ионы можно не только «заколачивать» в титан, но заодно ими же этот титан и распылять. Свежая титановая пленка будет поглощать активные газы, а инертные газы будут откачиваться вбиванием, а заодно напылять пленку для поглощения активных газов.

Для того чтобы лучше использовать электроны в качестве ионизаторов, надо удлинить их путь в насосе и тем самым повысить вероятность того, что они ионизуют молекулы. Для удли-

нения траекторий движения электронов анод, в который им надо попадать, должен быть маленьким (рис. 20). Тогда вероятность попадания электронов в анод «с первого захода» уменьшится и электрону придется «повторять попытку».

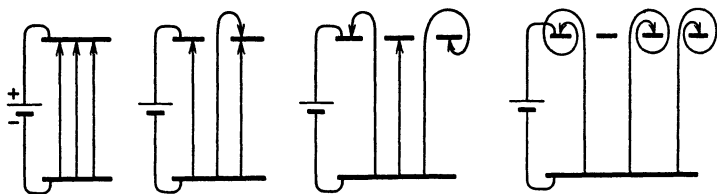


Рис. 20. Траектории электронов в магниторазрядном насосе

Электроны, ионизирующие газ в насосе, могут «поставляться» не только специальным катодом, а выбиваться ионами из анода. Так работают насосы другого типа, которые называются магниторазрядными. Магнитное поле используется в них для удлинения траекторий движения электронов. А состоят эти насосы из большого количества однотипных ячеек, показанных на рис. 21. Электроны, эмиттированные катодами в результате попадания на катод ионов, в отсутствие магнитного поля летели бы на анод по короткой траектории, но возникающая в магнитном поле сила Лоренца закручивает траекторию вокруг линий магнитного поля. На длинной траектории электрон имеет возможность создать путем ионизации нейтральных атомов и молекул много ионов и новых электронов.

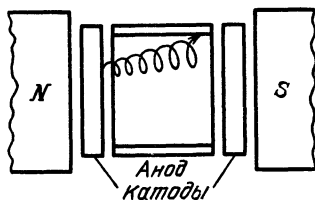


Рис. 21. Ячейка магниторазрядного насоса. Показана траектория электрона

Поскольку ионный ток пропорционален давлению, то с помощью ионного и магниторазрядного насосов можно измерять давление. Основной недостаток этих насосов — малая скорость откачки инертных газов, а также обратное их выделение при распылении катода, в котором ранее находились атомы этих инертных газов. Для исправления этого недостатка применяют два катода из разных материалов (титан и тантал), катоды, разные участки которых сделаны из разных материалов (цирконий и алюминий), катоды не монолитные, а губчатые или имеющие углубления (см. рис. 22). И получается, что титан распыляется в основном со стенок ячеек и, напыляясь на их дно, «погребает» остаточные газы под собой.

Поскольку и ионный, и магниторазрядный насосы работают за счет ионизации молекул остаточного газа электронами, то уместно задать два вопроса: как сечение ионизации зависит от энергии электронов и как — от атомной массы ионизируемого газа?

При малой энергии электрон не способен совершить такую ионизацию. При большой энергии, т. е. при большой скорости,

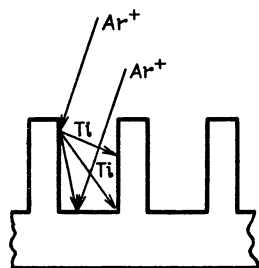


Рис. 22. Работа ячейчатого катода в магниторазрядном насосе

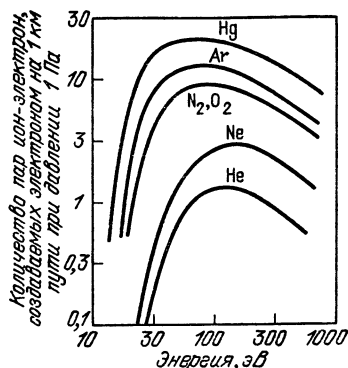


Рис. 23. Эффективность ионизации различных газов как функция энергии электронов

электрон проскакивает мимо объекта предполагаемой ионизации слишком быстро. Эффективность ионизации больше при большей атомной массе, поскольку в этом случае вокруг ядра вращается больше электронов. В итоге получается зависимость, показанная на рис. 23.

## 7. Как откачивать без насоса?

Поддерживать высокий вакуум в электронных приборах настолько важно, что приборы часто снабжают «встроенными» насосами. Ко всем перечисленным выше неприятностям добавляется еще и то, что магнитное поле насоса (а дежурный насос — это чаще всего магниторазрядный) влияет на работу прибора. И, как это бывает обычно в таких случаях, — не положительно, а отрицательно. С другой стороны, известны электронные приборы — малогабаритные металлокерамические лампы, которые успешно работают многие тысячи часов без насосов. История этих ламп, называемых «нувисторами», весьма интересна потому, что они были «новым словом» в технике электронных ламп, о чем свидетельствует и название —

слово «нувистор» можно перевести с итальянского как «новая перспектива» или «новый вид».

В том, что нувисторы работают без насосов, нет ничего удивительного: чистые поверхности сорбируют газ. Вот стенки лампы и откачивают газы, но надолго ли хватит их сорбционной емкости? Если попадание в лампу газов из атмосферы малó, а лампа хорошо обезгажена, то она и качает сама себя тысячи часов. Нувисторы хорошо обезгажены потому, что при откачке они прогревались не до 300 °С, как стеклянные лампы, а до 700 °С. Керамика не стекло, такого нагрева не боится.

Заметим, что в каждой электронной лампе уже есть свои катод, анод и электрическое поле. Одновременно она является маленьким ионным насосом. Но собственная ионная откачка может быть для прибора вредна. Ведь ионы распыляют катод и внедряются в него, состав катода изменяется и он может выйти из строя. А прибор с неработающим катодом никому не нужен, даже если вакуум там и очень хороший. Иногда из этого положения выходят следующим образом: ставят рядом с катодом специальный электрод — коллектор ионов для их поглощения.

Эффективность самооткачки можно увеличить, если поднять сорбционную емкость стенок вакуумного объема. Для этого надо, чтобы вакуум граничил с чем-то, что хорошо сорбирует газы и быстро их в себе растворяет, чтобы поверхность поглотителя оставалась чистой. Конечно, инертные газы будут откачиваться плохо, но с этим приходится мириться.

Многодесятилетние поиски таких материалов и методов их использования привели к применению двух основных типов внутриламповых насосов, которые работают «сами по себе», так называемых «геттеров».

Например, можно поместить в лампу кусочек бария. Этот металл хорошо сорбирует газы и диффундируют в нем они быстро, но только как его поместить в лампу? На воздухе он быстро окислится, а если не окислится, то при прогреве лампы во время обезгаживания испарится. Делают так: используют сплав бария, устойчивый и на воздухе, и при обезгаживании, а когда лампа уже готова, нагревают контейнер с этим сплавом. Более летучая компонента сплава — барий — испаряется, и барий напыляется на стенки лампы и начинает откачивать остаточные газы. Применяют и смеси, содержащие, например, кроме бария, титан и окись железа. При слабом нагреве происходит экзотермическая реакция (восстановление железа титаном), при которой контейнер разогревается достаточно сильно для испарения бария. Используются и соединения бария, разлагающиеся при нагреве до бария.



Емкость такого геттера ограничена, и увеличивать толщину напыленного слоя сверх некоторой величины бесполезно — сорбированный газ не будет успевать диффундировать внутрь пленки бария. Увеличить площадь пленки сильно тоже нельзя — в конце концов, больше внутренней поверхности лампы она быть не может. Можно ли увеличить поверхность пленки, не увеличивая занимаемого ею места? Конечно, — увеличивая ее шероховатость. А еще лучше, если пленка не монолитная, а состоит из отдельных частичек («кластеров») бария, как куча булыжников — из отдельных камней. Для этого надо распылять барий не в вакууме, а в среде инертного газа с давлением  $10^{-1}$ – $10$  Па. Тогда на стенку лампы попадают не отдельные атомы, а микрокапельки, и пленка получается губчатая. При быстром испарении твердого тела в газе испарившиеся атомы не улетают сразу от поверхности, как при испарении в вакууме. Они блуждают между молекулами газа и за это время могут столкнуться и слипнуться друг с другом, образовав микрокапельки.

Для нагрева геттера при его распылении используют два метода. Один — когда снаружи лампы располагают индуктор, т. е. катушку (рис. 24, а), по которой пропускают ток высокой



Рис. 24. Способы распыления геттеров: а — нагрев индуктором; б — нагрев током

частоты. В контейнере наводятся токи Фуко, он разогревается (это одна из причин, по которой разогревается железо в трансформаторах) и барий испаряется. Другой — когда через контейнер или расположенный около него нагреватель (рис. 24, б) пропускают ток. В результате в контейнере или нагревателе, согласно закону Джоуля — Ленца, выделяется тепло, геттер нагревается и испаряется.

Но существуют и нераспыляемые геттеры. Предложены они были позже распыляемых и заметно их потеснили, хотя по сей день применяются и те и другие. Нераспыляемый геттер — это губчатый титан или какой-либо другой, хорошо поглощающий газы металл (например, цирконий) или сплав (например, цирконий-алюминий). Главная сложность в этом случае в

том, что эти металлы и сплавы хорошо откачивают большинство газов при температуре  $600^{\circ}\text{C}$  и выше, но водород при такой температуре не откачивается, а если он был поглощен металлом или сплавом раньше, то начинает выделяться. Водород хорошо откачивается при  $200^{\circ}\text{C}$ . Поэтому иногда в лампах применяют два нераспыляемых геттера, располагая один рядом с термокатодом, а второй подальше. Первый откачивает все газы, кроме водорода, второй — водород. Между прочим, в сплаве цирконий-алюминий зависимость скорости поглощения водорода от концентрации циркония немонотонна и в максимуме превосходит скорость откачки чистым цирконием. И это при том, что алюминий сам по себе не поглощает водород.

Нераспыляемые геттеры долгое время применялись только в электровакуумных приборах. Но судьба играет не только человеком, но и геттером. Сейчас предполагают применение геттерных пластин в крупных физических установках, например в токамаках. Так что нераспыляемые геттеры ждет интересное будущее.

Однако получить высокий вакуум мало. Его надо еще измерить — ведь без этого мы даже не узнаем, что он получен.

## 8. Специфика измерения высокого вакуума

Какие проблемы возникают при измерении ионизационным вакуумметром высокого вакуума? Во-первых, это измерения очень малых токов в цепи коллектора. Но эта проблема не главная, ибо сейчас удастся измерять токи порядка  $10^{-17}$  А, а такой ток протекает в цепи коллектора при вакууме порядка  $10^{-16}$  Па. Мешают фоновые токи в цепи коллектора, не связанные с давлением остаточных газов. Первый источник фонового тока — это утечки по стеклу, из которого делают корпуса вакуумметрических ламп (рис. 25, а). Да, стекло — диэлектрик, но в мире нет ничего идеального. Стекло — хороший диэлектрик, но не идеальный. Причем ток протекает не только по объему стекла, но и, как говорят, по поверхности, а точнее, по приповерхностному слою. Состав стекла у его поверхности изменен из-за взаимодействия с влагой воздуха. Кроме того, поверхность стекла на воздухе всегда покрыта молекулами сорбированных газов и воды, и может быть загрязнена \*). Поэтому вывод кол-

---

\*) Сопротивление квадратного участка поверхности стекла составляет при влажности воздуха 40–60 % от  $10^{12}$  до  $10^{15}$  Ом (для стекол разных марок). При влажности 80 % сопротивление уменьшается до  $10^8$ – $10^{10}$  Ом. Если стекло покрыть гидрофобным (водоотталкивающим) веществом, этого уменьшения сопротивления не происходит.

лектора стараются располагать подальше от остальных выводов, а лампу перед эксплуатацией протирают растворителями. Часто область корпуса лампы, через которую проходят вводы, делают из керамики — у керамики сопротивление больше, чем у стекла. Разумеется, стекло в области ввода коллектора должно быть тщательно защищено от напылений на него, прежде всего — с накаливаемого катода, ибо пленки толщиной в несколько нанометров может быть достаточно для возникновения проводимости.

Мощным методом борьбы с утечками является применение охранного кольца (рис. 25, б). В этом случае ток утечки пере-

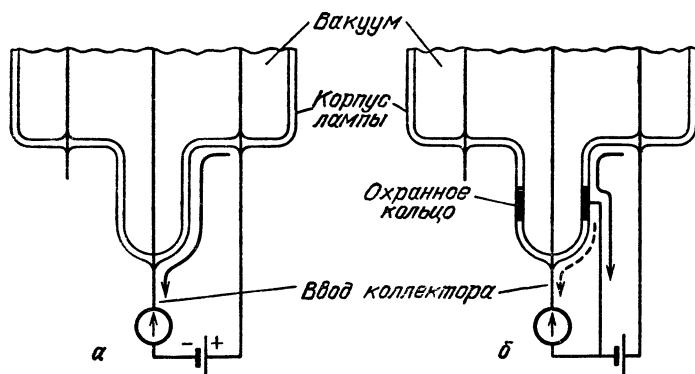


Рис. 25. Конструкция вводов вакуумметрической лампы: а — обычная; б — с охранным кольцом. Ток утечки показан стрелкой, «вторичный ток утечки», значительно меньший основного, — штриховой стрелкой

хватывается охранным кольцом и течет через источник напряжения (условно показанный в виде батарейки), минуя прибор, измеряющий ток коллектора, как это показано стрелкой. Охранные кольца (охранные электроды) используются во многих других приборах для измерения малых токов.

К сожалению, утечки — не единственный источник фонового тока. Электроны, тормозясь в материале анода, испускают рентгеновское излучение. Его мощность растет с увеличением энергии электронов, но даже при энергии 15–20 кэВ она настолько мала, что перед экраном телевизора можно сидеть безбоязненно, ибо в экране тормозятся электроны именно этой энергии \*). При энергии порядка 100 эВ — это энергия электро-

\*) Передняя часть кинескопа сделана из толстого стекла с большим содержанием бария. Такое стекло сильно поглощает рентгеновское излучение.

нов в датчике ионизационного вакуумметра — мощность рентгеновского излучения совсем ничтожна, но ее хватает, чтобы вызвать заметную эмиссию электронов с коллектора. Прибор же, измеряющий ток коллектора, не различает, приходят ли на коллектор ионы или уходят электроны, он лишь измеряет суммарный ток.

Как борются с этим видом фоновых токов? Чаще всего уменьшают площадь коллектора, делают его в виде тонкой проволоочки, но слишком маленьким сделать коллектор нельзя: ухудшится сбор ионов на коллектор. Располагают коллектор так, чтобы он был вне прямой видимости с анода: рентгеновское излучение распространяется прямолинейно, а движение ионов управляется электрическим полем, и из области ионизации вокруг анода их можно «вытянуть» в сторонку, за экран, прикрывающий коллектор от рентгеновского излучения. Наконец, можно перед коллектором установить дополнительный электрод под небольшим отрицательным (относительно коллектора) потенциалом. Поле этого электрода будет возвращать на коллектор электроны, выбитые рентгеновским излучением, поскольку энергия этих электронов мала и преодолеть тормозящее поле они не смогут.

Существует еще один метод борьбы с фоновым током, и в отличие от перечисленных выше методов, специфических для вакуумной метрики, этот метод применяется во многих видах измерений. Пусть прибор — как это и бывает всегда — наблюдает сумму исследуемого сигнала и помехи. Пусть у нас есть способ изменить чувствительность прибора к исследуемому сигналу, не влияя на чувствительность к помехе. Тогда при чувствительности к сигналу, равной  $A$ , и чувствительности к помехе, тоже равной  $A$ , мы видим показание, равное  $A \cdot C + A \cdot P$ , где  $C$  и  $P$  — сигнал и помеха, а если мы изменим чувствительность к сигналу с  $A$  на  $B$ , то увидим показание, равное  $B \cdot C + A \cdot P$ . Зная эти два показания и зная, разумеется, величины  $A$  и  $B$ , мы можем определить и сигнал  $C$ , и помеху  $P$ . Двух уравнений как раз хватает для определения двух неизвестных. Как реализуется этот метод в вакуумметрах? В вакуумметр вводится еще один электрод, изменяя напряжение на котором, изменяют распределение поля в вакуумметре и тем самым — длину пробега электронов. А при изменении длины пробега изменяется сигнал, ибо на большей длине у электрона больше вероятность произвести ионизацию.

Ионизационному вакуумметру, как и теплоэлектрическому, свойственна селективность: газы различаются не только теплопроводностью, но и эффективностью ионизации (количество ионов, созданных электроном на 1 м пути при давлении 1 Па).

Отношение показаний вакуумметра при равных концентрациях He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, Kr и Hg составляет соответственно 0,2:0,4:1:1,4:1,8:2,5. Эти отношения зависят, конечно, от напряжения на аноде, поскольку эффективность ионизации зависит от энергии электронов, но зависимость эта при энергии электронов более 30 эВ слабая, а напряжение на аноде у всех вакуумметров примерно одинаково (около 100 В) — оно выбрано так, чтобы эффективность ионизации была максимальной. Обычным ионизационным вакуумметром можно измерять давления примерно до  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  Па. Применяя различные меры борьбы с фоновыми токами, этот предел удастся довести примерно до  $10^{-11}$  Па.

Для увеличения длины пробега электронов применяют, как и в насосах, магнитное поле. Чувствительность таких вакуумметров, называемых магниторазрядными, выше, чем у ионизационных, и поэтому они могут измерять более высокий вакуум, но конструкция их сложнее. Серьезным преимуществом магниторазрядных вакуумметров является отсутствие накаливаемого катода и, как следствие, их долговечность.

Источником электронов в магниторазрядном вакуумметре является катод, из которого электроны выбиваются ионами. Выбитые из катода электроны летят к аноду, при этом магнитное поле закручивает и удлиняет их траектории. По пути электроны производят ионизацию атомов, порождают новые ионы, эти ионы летят к катоду и т. д.

Диапазон давлений, измеряемых магниторазрядным вакуумметром, простирается от 1 до  $10^{-8}$  Па, а при усложнении конструкции его удастся расширить до  $10^2$  Па в сторону больших и до  $10^{-12}$  Па в сторону меньших давлений.

## 9. Что же есть в вакууме?

Все рассмотренные выше вакуумметры измеряли общее давление всех газов и паров в вакуумной системе. Во многих случаях необходимо узнать состав газов, или, как говорят, спектр газов. Как это сделать? Молекулы разных газов различны по массе, и следовательно, если подействовать на них одинаковой силой, они приобретут различные ускорения. Падение молекул в гравитационном поле Земли использовать не удастся: молекулы настолько быстро пересекают вакуумный объем, что перемещение их под действием гравитации пренебрежимо мало. Какие силы мы знаем, кроме гравитационных? Электрические — но молекула ведь не заряжена! Так зарядим ее и получим ион. Это простейший принцип работы спектроанализатора — прибора для установле-

ния спектра газов. Электронный пучок проходит сквозь газ и ионизирует его, ионы ускоряются определенной разностью потенциалов и приобретают при этом одинаковую энергию, но — поскольку массы их различны — скорости их разные. Ускоряющее напряжение действует в течение короткого времени.

Пусть все ионы пролетают по трубе, в конце которой стоит коллектор, подключенный к прибору, регистрирующему ток. Поскольку скорости ионов различны, то трубу они преодолеют за разное время. Если прибор, регистрирующий ток, способен измерять быстрые изменения малого тока, то можно будет различить, какие газы есть в системе. Пусть в системе есть  $\text{H}_2$ , He,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ . Если их однозарядные ионы  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$  ускоряются разностью потенциалов 100 В, они приобретают энергию 100 эВ и скорости  $10^5$ ,  $6 \cdot 10^4$ ,  $2,4 \cdot 10^4$ ,  $1,7 \cdot 10^4$  м/с соответственно. Пусть труба имеет длину 4 м, тогда время пролета ионов составит соответственно 40, 70, 160, 220 мкс.

Способность различить отдельные группы ионов, прибывающие на коллектор, определяется прибором, измеряющим ток. Если прибор способен различать сигналы, следующие один за другим через 40 мкс и более, то  $\text{H}_2$  от He отличить не удастся, а He от  $\text{N}_2$  — удастся. Разрешающая способность (способность отличить один импульс от другого) у прибора, измеряющего ток, тем хуже, чем чувствительнее прибор, и поэтому определять спектр газа тем труднее, чем выше вакуум.

Важное преимущество таких спектроанализаторов, называемых «времяпролетными», — малое время измерения: как только самые тяжелые ионы достигли коллектора, прибор готов к измерению. Поэтому времяпролетные спектроанализаторы можно применять для исследования быстрых изменений состава газа.

Что касается влияния газа на работоспособность спектроанализатора, его газовыделения и откачивающего действия, то они зависят от того, какой катод используется в источнике электронов, и примерно таковы же, как в ионизационном вакуумметре. Откачивающее действие спектроанализатора мало, но спектр газа в нем все же отличается от спектра в остальной вакуумной системе из-за реакций на накаливаемом катоде и из-за воздействия электронного пучка. Электронный пучок разлагает молекулы. Из  $\text{N}_2$  получается N, из  $\text{O}_2$  — O, из  $\text{CH}_4$  — H, C, CH,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ , из  $\text{H}_2\text{O}$  — H, O, OH и т. д. Возможны и помехи от многократной ионизации, так как одинаковые атомы могут ионизоваться не только однократно. Например, из Ag образуются ионы  $\text{Ag}^+$  и  $\text{Ag}^{2+}$ , а это тоже будет искажать спектр. Ион  $\text{Ag}^{2+}$  будет приобретать в ускоряющем поле энергию в

2 раза большую, чем ион  $\text{Ag}^+$ , и выйдет из него со скоростью в  $\sqrt{2}$  раз большей. Не зная, что у  $\text{Ag}^{2+}$  двойной заряд, мы можем принять его за ион с одинарным зарядом, но с двукратно меньшей массой, т. е. ион  $\text{Ne}^+$ .

Принцип действия другого типа спектроанализатора основан на зависимости движения ионов в магнитном поле от их массы. Пусть ион с зарядом  $e$ , ускоренный разностью потенциалов  $U$  и имеющий, следовательно энергию  $eU$  и скорость  $\sqrt{2eU/m}$ , влетает в магнитное поле с индукцией  $B$  (рис. 26).

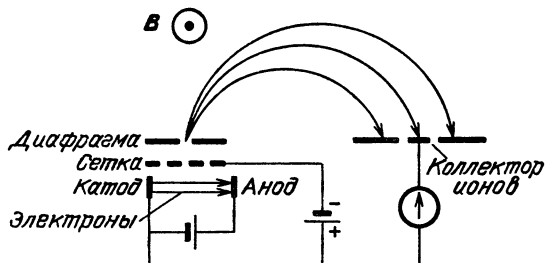


Рис. 26. Принципиальная схема магнитного масс-спектрометра

Он будет двигаться по окружности радиуса  $R = \sqrt{2mU/B} \sqrt{e}$ . Ионы с разной массой движутся по окружностям разных радиусов. В реальных конструкциях ставят один коллектор и, плавно

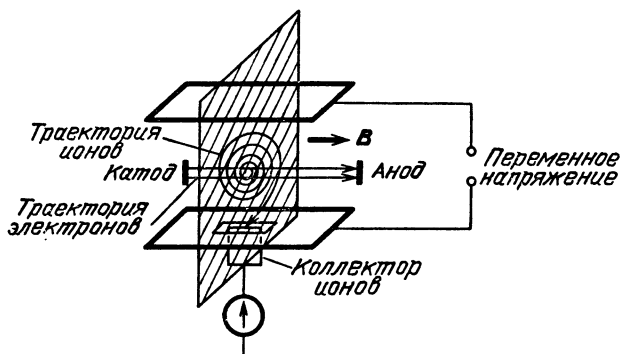


Рис. 27. Принципиальная схема омегатрона. Направление магнитного поля  $B$  показано стрелкой, плоскость вращения ионов заштрихована

меняя  $U$ , «приводят» на коллектор ионы с разными отношениями  $m/e$ .

И, наконец, еще один тип спектроанализаторов — омегатрон. Устройство омегатрона показано на рис. 27. К пластинам

приложено переменное напряжение. Ионы, образующиеся на оси прибора в области электронного пучка, движутся по спирали. Частота вращения иона равна  $Ve/m$ . Если эта частота совпадает с частотой переменного напряжения  $2\pi\nu$ , то радиус траектории растет со временем \*), и ион движется по раскручивающейся спирали, пока не попадет на коллектор. Происходит так потому, что каждый раз, когда ион движется, например, вверх, он движется по полю, ускоряясь, и далее, когда он движется по другой половине окружности вниз, поле также меняет направление и опять оказывается ускоряющим. Так ион все время получает энергию от поля и увеличивает радиус своей орбиты. Если же частота вращения иона не совпадает с частотой переменного напряжения, то до коллектора ему не добраться. Изменяя частоту переменного напряжения, на коллектор направляются ионы с разными отношениями  $m/e$  и определяют состав остаточных газов в вакуумной системе.

## 10. Как найти течь?

В вакуумной технике есть область, при упоминании о которой те, кто работает с вакуумными приборами и установками, грустнеют. Но именно эту область и надо знать хорошо! Речь идет о поиске негерметичностей, или «течей», в вакуумных приборах и системах, или, как говорят, о течеискании. Причиной их могут быть ошибки в конструкции, нарушения технологии при изготовлении и дефекты материалов.

Определить сам факт натекания в вакуумную камеру несложно: при работающем насосе достигается не предельный вакуум насоса, а существенно худший. Другой способ — прекратить откачку и вести наблюдение за изменением давления в системе. Если давление нарастает, то возможно натекание. Но задача не только в том, чтобы определить сам факт натекания, а в том, чтобы найти место течи и ликвидировать ее. В вакуумной установке может быть два-три десятка фланцев, два-три десятка вводов, десятки метров сварных и паяных швов. А бывает и на порядок больше. И в каждом вводе может быть течь, в каждом фланце может быть течь, в каждом миллиметре каждого шва тоже может быть течь. Казалось бы, если все сделано доброкачественно, то течей быть не должно. Ведь все элементы вакуумной системы могут быть проверены

---

\*) Движение заряженной частицы в магнитном поле удовлетворяет уравнению  $m(\omega^2 R) = e(\omega R)B$ , где  $\omega^2 R$  — ускорение,  $\omega R$  — линейная скорость,  $e(\omega R)B$  — сила Лоренца. Отсюда  $\omega = eB/m$ . Сила, действующая со стороны электрического поля, увеличивает линейную скорость, при этом увеличивается и  $R$ , так как  $\omega$  остается постоянной.



до монтажа. К сожалению, это не совсем так: маленькие фланцы и вводы могут быть проверены предварительно, а большие элементы, в частности, сама камера, не могут быть проверены никак иначе, чем «в сборе». Но мало собрать камеру без течей — вакуумные камеры, как правило, прогреваются для обезгаживания, а при прогреве из-за разницы в коэффициентах теплового расширения в элементах вакуумной установки возникают механические напряжения и как их следствие — течи. Что с ними делать? Элементы, которые можно заменить, заменяют. Швы иногда пытаются «подваривать», т. е. производить сварку поверх уже имеющегося шва, но далеко не всегда это кончается успешно. Наконец, существуют термостойкие лаки и смолы, которыми замазывают место течи \*). Но для проведения всех этих мероприятий надо знать, где она, течь. Как же это установить?

Предположим, что имеется вакуумметр с большой селективностью, особо чувствительный к какому-то газу. Обдувая вакуумную камеру снаружи тонкой струйкой этого газа и наблюдая за показаниями вакуумметра, мы отметим момент, когда показания вакуумметра резко возрастут. А посмотрев, какое место установки мы при этом обдували «пробным газом», увидим, где течь. Практически удается локализовать место течи с точностью до миллиметра. В качестве пробного газа чаще всего применяется гелий, а в качестве высокоизбирательного вакуумметра — спектроанализатор, настроенный на пик ионов гелия.

Применить этот метод можно, так сказать, наоборот: заполнить камеру газом, содержащим галоген, проще всего тем же фреоном под давлением больше атмосферного, и через место течи он будет сочиться наружу. Снаружи надо поставить нагретую платиновую проволочку, а рядом с ней — любой электрод под отрицательным относительно нее потенциалом. При нагреве из платины начинают диффундировать наружу имеющиеся в ней атомы примесей, в первую очередь — калия и натрия. С поверхности они могут испаряться в виде либо атомов, либо положительных ионов. Ток, протекающий в цепи отрицательного электрода, пропорционален доле ионов. Оказывается, что эта доля увеличивается в присутствии галоидосодержащих газов.

---

\*) В вакуумной технике применяются кремнийорганические смолы и некоторые другие вещества, выдерживающие температуры до 400°C и позволяющие после замазывания течей в приборе этими веществами получить вакуум до  $10^{-7}$  Па. Заметим, что в электронных приборах скорость откачки геттера обычно невелика. В установках же с большей скоростью откачки допустимы соответственно и большее газовыделение, и большие течи.

## ЧТО ПРОИСХОДИТ НА ПОВЕРХНОСТИ

## 1. Если присмотреться повнимательнее...

Для развития многих областей физики и техники необходимо знать, как устроена поверхность, а именно надо знать, какие атомы на ней находятся, как они расположены относительно друг друга, как перемещаются по поверхности. Требуются эти знания и для развития самой вакуумной техники. В свою очередь, вакуумная техника помогает все это узнать. Действительно, если у нас есть идеально чистая поверхность, то оставаться чистой в течение времени, необходимого для исследований, она может только в вакууме. На воздухе или в плохом вакууме она мгновенно покроется слоем молекул: на воздухе — кислорода и воды, в вакууме — остаточных газов. Чем вакуум выше, тем время загрязнения поверхности больше. Конкретно, если мы хотим, чтобы не более 10% поверхности покрылось слоем молекул, например, за 1 час, необходимо иметь вблизи этой поверхности вакуум не хуже  $3 \cdot 10^{-8}$  Па (зависимость скорости, с которой поверхность покрывается сорбированным газом, от вакуума вычислена в § 2 гл. 1). Это уже настолько высокий вакуум, что его часто не без оснований называют «сверхвысокий вакуум».

Предположим, что необходимый вакуум обеспечен и мы можем начать разглядывать поверхность во все более сильный микроскоп (например, сначала в оптический, потом в электронный, потом в ионный). В повести Ст. Лема «Солярис» это описано так: «Я видел как будто с большой высоты огромную пустыню... на ней лежали... плоские скалистые холмики. Я сделал изображение резким и, не отрывая глаз от окуляров... прибавил увеличение... приплюснутая тень одной молекулы заполнила весь окуляр». К сожалению, в реальной жизни так просто это не делается, но при достаточно большом увеличении мы увидели бы нечто похожее на рис. 28, где каждый атом условно изображен кубиком. Атомы на поверхности могут занимать разные положения, и они обозначены на рисунке цифрами от 1 до 5. Отсюда уже видно, почему устройство поверхности

важно для вакуумной техники — ведь от расположения атомов зависит, легко ли каждому атому испариться, т. е. оторваться от поверхности. Атому 1 надо оторваться от одного соседа, атому 2 от двух и т. д. Конечно, действительная картина может

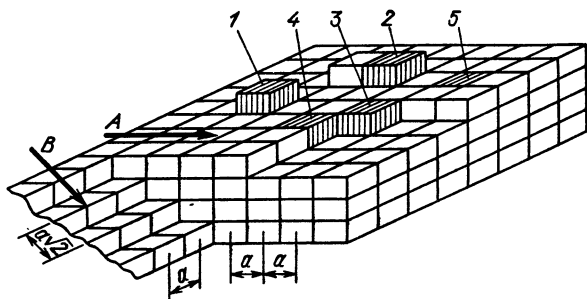


Рис. 28. Положение атомов на поверхности твердого тела

быть сложнее. Например, расстояния между атомами на поверхности могут быть разными в разных направлениях. Если часть поверхности образована не плоскостью *A*, а плоскостью *B* (на рисунке стрелки *A* и *B* параллельны этим плоскостям), то атомы расположены по углам прямоугольников со сторонами *a* и  $a/\sqrt{2}$  (*a* — период решетки), а не квадратов со сторонами *a*. Поверхность может быть устроена и еще сложнее, например атомы на поверхности могут образовывать вообще не ту решетку, что в глубине, — скажем, в глубине решетка может быть кубическая, а на поверхности атомы могут образовывать шестиугольники.

Судя по тому, как сложно устроена поверхность, процессы на ней тоже могут быть достаточно разнообразны. Но для начала... Как сказал один из героев романа М. Булгакова «Мастер и Маргарита»: «Любезный Фагот, покажи нам для начала что-нибудь простенькое». Впрочем, простота эта, как и в упомянутом романе, весьма относительна.

## 2. Атомы «ползут» по поверхности

Возьмем для начала металлическую иголку, раз в десять или сто тоньше той, которой шьют. Поместим ее в вакуум и начнем нагревать. При некоторой температуре мы увидим, что острие затупляется (рис. 29). Перемещение атомов вызывает сила поверхностного натяжения. Это она собирает воду в каплю и втягивает ее в стеклянный капилляр. Теперь установим напротив острия электрод и подадим на него относительно

острия напряжение. Изображенная на рисунке батарейка — условность. На самом деле напряжение должно быть на несколько порядков больше, чем у батарейки. Но важен принцип — при нагреве в поле можно так подобрать температуру и поле, что острие будет становиться еще острее. Электрическое поле тянет острие к электроду, заряженному противоположным относительно острия зарядом. Кроме того, в электрическом поле ускоряется поверхностная диффузия — «ползание» атомов по поверхности.

Для изменения формы поверхности при воздействии температуры и электричества есть еще один путь. Возьмем вольфрамовую проволоку, поместим ее в вакуум и пропустим по ней такой ток, чтобы она нагрелась примерно до 2000 К (на воздухе это сделать нельзя — она окислится). Электрическое поле, вызванное падением напряжения вдоль проволоки, при этом будет мало (поскольку проволока — проводник) и перестройки поверхности из-за действия поля, о которой говорилось выше, ожидать не приходится. Однако поверхность изменяется, причем достаточно загадочным образом\*). Например, поверхность может покрыться ступеньками или ребрами с периодом в единицы или десятки микрометров. При этом оказывается, что новая поверхность образована другой кристаллической гранью (см. рис. 28), например, до воздействия поверхность горизонтальна, а после перестройки поверхность превращается в чередование ступенек из граней, наклоненных влево и вправо под углом  $45^\circ$  к горизонтали. Начало одной такой ступеньки и показано на рис. 28. Важным для такой перестройки поверхности является механическое действие тока на атомы металла. В этом нет ничего странного — электроны разгоняются полем и тормозятся, сталкиваясь с атомами, а значит, действуют на них механически. Теперь перейдем к более подробному рассмотрению поведения на поверхности атомов, прилетевших из вакуума.

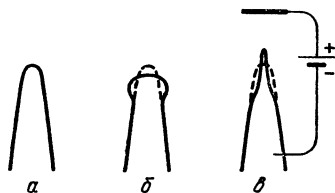


Рис. 29. Изменение формы острия: а — исходная форма; б — после нагрева; в — после нагрева с приложением поля (термополевая перестройка)

\*) Это явление исследовалось группой ученых под руководством Г. Н. Шуппе (Шуппе Г. Н., Закурдаев И. В. Процессы массопереноса и изменения структуры поверхности кристаллов. Обзоры по электронной технике, серия Технология и организация производства, 1983, № 7, № 11. — М.: ЦНИИ «Электроника»).

### 3. Гость на чужой поверхности

Пусть на поверхности одного вещества (подложки) находится небольшое (менее монослоя) количество атомов другого вещества. Как им на ней расположиться? Можно так, как, например, атомы в объеме аморфного вещества. Можно периодически, как говорят, в виде двумерной решетки, аналогично трехмерной решетке в объеме кристаллического вещества. Эта двумерная решетка может быть никак не связана с решеткой подложки, т. е. сорбированные атомы находятся на одинаковых расстояниях один от другого, но где угодно — относительно подложки. Так, например, шахматную доску (двумерная решетка) можно расположить на клетчатой скатерти (изображающей верхний слой трехмерной решетки вещества подложки) как угодно. И наконец, двумерная решетка может быть связана с расположением атомов подложки, т. е. сорбированные атомы будут находиться на определенных местах.

Казалось бы, все в порядке, но порядок этот может быть устроен настолько хитро, что не сразу удастся понять, как именно. Для примера на рис. 30 показано, как распола-

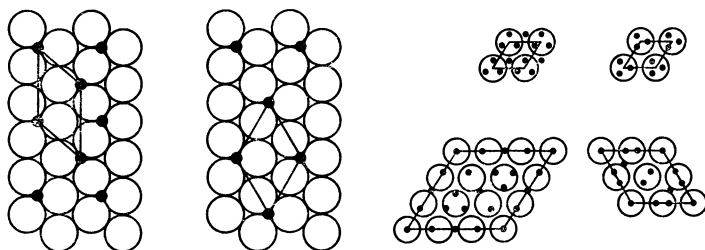


Рис. 30. Расположение атомов О на Ni (светлые кружочки — Ni, черные точки — О) — слева и атомов Bi на Pt (светлые кружочки — Pt, черные точки — Bi) — справа при различной плотности покрытия. Повторяющаяся часть решетки выделена линией

гаются атомы Bi, сорбированные на Pt \*), и атомы О, сорбированные на Ni \*\*). Данные были получены при изучении дифракции электронов, отражающихся от таких поверхностей; об этом методе рассказано дальше.

\*) Paffett M. T. Campbell C. T., Taylor T. N. The influence of adsorbed Bi on the chemisorption properties of Pt (111): H<sub>2</sub>, CO and CO<sub>2</sub>. — J. Vac. Sci. Technol., 1985, v. A3, Nr 3, pt. 1, p. 812–816.

\*\*) Brundle C. R. Why the close-packed Ni (111) surface dissociatively chemisorbs oxygen and nucleates oxide faster the more open Ni (100) surface. — J. Vac. Sci. Technol., 1985, v. A3, Nr 3, pt. 2, p. 1468–1471.

Такие и более сложные вещи происходят на атомно-гладкой поверхности, т. е. на поверхности, составленной одной атомной плоскостью и не содержащей ступеней (типа показанных на рис. 28).

А что происходит, когда атом прилетает из вакуума на поверхность, не являющуюся атомно-гладкой, а содержащую ступеньки, углы и т. д.? Он либо отскакивает, либо сорбируется и начинает двигаться по ней, пока не уткнется в «угол» (см. рис. 28) или не свалится в «ямку» (ловушку), где будет связан сразу с несколькими атомами и «прилипнет» к поверхности надолго. Время пребывания атома в любом положении увеличивается с уменьшением температуры. При достаточно низкой температуре атом прилипнет в любом месте поверхности, а при достаточно высокой — нигде. Но при промежуточных температурах атомами, прилетающими из вакуума, будет достраиваться неполная, т. е. содержащая ступеньки, атомная плоскость, пока она не станет полной (гладкой).

Что дальше?

Углов и ступенек больше нет. Теперь, чтобы атомам конденсироваться на поверхности, надо столкнуться двум, а лучше сразу трем — они слипнутся, образовав зародыш кристаллизации, и с него начнется рост новой плоскости. Но иногда происходят и более интересные вещи.

В результате искажения кристаллической решетки где-то в глубине кристалла поверхность может быть устроена так, как это показано на рис. 31. Такая структура называется «винтовой дислокацией». Когда к ступеньке в области винтовой дислокации начнут пристраиваться атомы, то, как видно из рисунка, плоскость замкнуться не сможет и будет расти ните-

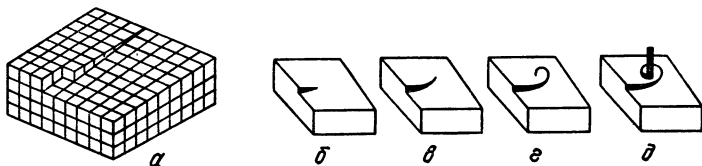


Рис. 31. Винтовая дислокация (а) и стадии роста вискера (б — д)

видный кристалл, именуемый «вискером» (от английского слова whisker — усы животного).

Как из плоскости растет вискер, так из вопроса о росте вискеров вырастает один из важнейших вопросов электровакуумной техники — вопрос об электрическом пробое вакуумного промежутка.

#### 4. Как с вискера начинается вакуумный пробой

Пусть в вакуум введены через изоляторы два электрода, подключенные к источнику напряжения (рис. 32). Если измерить ток, протекающий в цепи, то прибор покажет ток утечки по изоляторам, но этот ток весьма мал. Что ж, это естественно — ток есть там, где есть подвижные носители

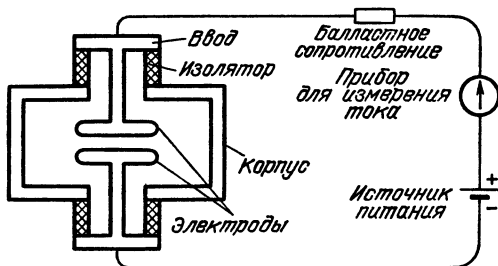


Рис. 32. Схема для исследования вакуумного пробоя. Отрицательный полюс источника питания часто заземляют для более безопасной эксплуатации установки

заряда и электрическое поле. Поле в вакууме есть, но подвижных носителей заряда там нет, так как молекулы остаточных газов нейтральны.

Если увеличивать напряжение, то при напряженности поля порядка  $10^7$  В/м появится так называемый «предпробойный ток», но вести он себя будет как-то странно — то увеличиваться, то уменьшаться, то в течение какого-то времени оставаться постоянным. Напряженность поля, при которой мы заметим этот ток, зависит от чувствительности прибора. Но если продолжать увеличивать напряженность, то начнут происходить резкие возрастания (броски) тока, и чем дальше, тем чаще, и, наконец, в некоторый момент ток сильно возрастет, а напряжение между электродами уменьшится — ток будет настолько велик, что значительная часть напряжения будет падать на балластном сопротивлении.

Явление сильного уменьшения сопротивления диэлектриков при определенном напряжении называется электрическим пробоем диэлектрика. Аналогичное явление в вакууме называется «вакуумным пробоем». Конечно, это пробой не вакуума. А чего?

Перед пробоем в вакууме не было ни твердой, ни жидкой среды, следовательно, это пробой в газе. Откуда газ берется в вакууме? Посредством десорбции и испарения. Но для удаления атомов с поверхности нужна энергия. Источник ее имеется — электроны, пролетающие через зазор («предпробойный ток»),

бомбардируют анод, который при этом разогревается, и с него начинается десорбция газа, да и его собственный материал испаряется. Но откуда берутся электроны, летящие через вакуумный зазор?

Носители заряда могут попасть в вакуум только из электродов. Процессы выхода электронов из электродов называются эмиссией. Чтобы выйти, электронам необходимо преодолеть потенциальный барьер. Его высота называется работой выхода. Если внешнее электрическое поле велико (порядка  $10^{10}$  В/м), то потенциальный барьер становится «тонким», и электрон, чуть-чуть (примерно на  $3 \cdot 10^{-10}$  м) отлетевший от тела, подхватывается полем и дальше уже только ускоряется им. Действительно, при поле  $10^{10}$  В/м на расстоянии  $3 \cdot 10^{-10}$  м потенциальная энергия электрона изменяется на 3 В — порядка высоты потенциального барьера (рис. 33). Такая эмиссия называется автоэлектронной, и она сильно зависит от

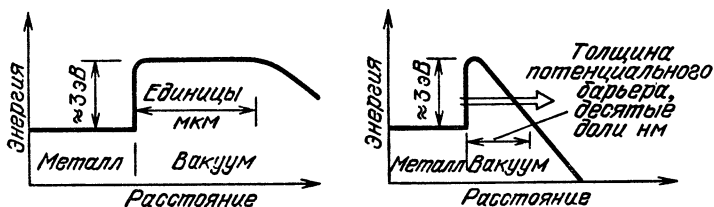


Рис. 33. Потенциальная энергия электронов как функция расстояния при термоэлектронной эмиссии (слева) и автоэлектронной эмиссии (справа). Двойная стрелка — туннелирование электронов

напряженности электрического поля. Так, если катод сделан из меди, никеля, молибдена или вольфрама, то при увеличении поля лишь в 3 раза (от  $10^9$  до  $3 \cdot 10^9$  В/м) эмиссия возрастает на 12 порядков (примерно одинаково для всех этих металлов).

Но как создать такие большие поля? В технике практически не работают с напряжениями более нескольких миллионов вольт, так что, казалось бы, вызвать заметную автоэмиссию при больших вакуумных зазорах невозможно. Но предпробойные токи все-таки текут, и если микро-, а зачастую и миллиамперметр показывает наличие тока, то приходится в него верить.

Мы уже знаем, что на поверхности могут расти висеры. А тот факт, что электрическое поле концентрируется сильнее около остриев, выступов, кромок и т. п., известен нам из школьного учебника физики. Именно по этой причине молниеотвод острый, чтобы большее поле вызвало стекание зарядов в атмосферу, а электрофорная машина заканчивается шариками, чтобы



накопленный заряд не стек в атмосферу преждевременно и аудитория могла любоваться искусственной молнией.

Усиленное на вискерах поле вызывает автоэлектронную эмиссию. Ток, протекающий по вискеру, разогревает его, те же электроны бомбардируют анод, разогревают и его, вакуум заполняется десорбированным с электродов газом и испаренным материалом электродов, и в этой среде происходит электрический пробой. Итак, пробой вакуумного промежутка — это процесс, в результате которого этот промежуток заполняется газом (затем следует пробой в газе).

Теперь посмотрим, что происходит при протекании тока через вискер. При больших токах вискер нагревается и испаряется, но происходит это настолько быстро и нагревается он настолько сильно, что превращается в кусок плазмы — «факел», расширяющийся со скоростью в десятки километров в секунду. Поле «вытягивает» электроны из плазмы — эта эмиссия называется «взрывной». Такой сильный нагрев, при котором вискер испаряется, вызывает, конечно, и плавление близлежащего материала. Электрическое поле вытягивает из этого расплава со-судки — новые острия.

В поведении вискеро-в есть много интересного. У конца виске-ра увеличивается напряженность поля, и следовательно, молеку-ла газа поляризуется, а та, которая была полярной ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), поворачивается и — из-за неоднородности поля (чем ближе к острiu, тем поле сильнее) — притягивается (рис. 34). Непрерыв-ное поступление на вискер молекул из вакуума ускоряет ход

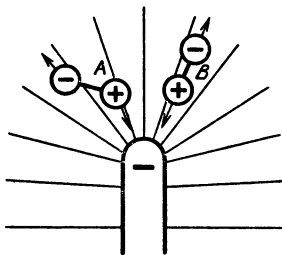


Рис. 34. Поведение полярных молекул в поле вискера. Показаны силы, действующие на диполь. На молекулу А действует вращающий момент

химических реакций на его поверхности. Любопытно также, что при некоторых значениях приложенного поля вискер может начать колебаться в плоскости и вокруг оси. Механизм этого явления не вполне ясен, да и само явление было открыто совсем недавно\*). И, наконец, кольцевые кратеры на аноде.

\*) *Птицын В. Э., Фурсей Г. Н., Егоров Н. В.* Температурная зависимость магнитных эффектов при автоэлектронной эмиссии. — Письма ЖТФ, 1980, т. 10, № 6, с. 619 — 622.

Иногда напротив вискера, находящегося на катоде, на аноде обнаруживается не ямка (след оплавления при бомбардировке электронным пучком), а кольцо (рис. 35). Идея о том, что пучок, идущий с острия, почему-то становится кольцевым, кажется

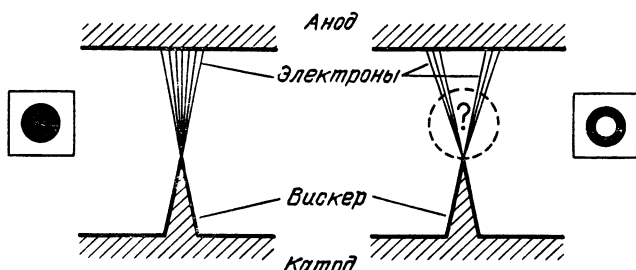


Рис 35. Два варианта расплавления анода током с вискера. В квадратах — вид оплавленной зоны на поверхности анода

странный. На самом деле из того, что что-то кажется странным, вовсе не следует, что этого нет. Например, при пробое в газе разряд, начавшись на шаровом электроде, может приобрести кольцевую структуру сам по себе. Но в данном случае ситуация иная. Кольцевой электронный пучок начинается с кольцевой области на катоде, т.е. не с острия (рис. 36). Конечно, напряженность поля на вершине больше, почему же наибольшая эмиссия идет не оттуда? Если вискер подвергался напылению какого-то вещества, увеличивающего эмиссию всей его поверхности, и одновременно ионной бомбардировке, удаляющей это вещество с самой вершины, то может получиться, что эмиссия с самой вершины будет меньше, чем с околовершинной зоны.

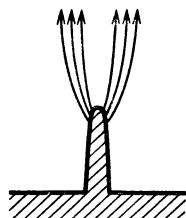


Рис. 36. Эмиссия с вискера при напылении и ионной бомбардировке. Стрелки — движения эмиттированных электронов

Случается, что в процессе разогрева электрода его поверхность оплавляется, из расплава поле вытянет сосульку и может оторвать с ее конца капельку, которая улетит в зазор. Существуют и другие процессы, при которых в зазоре оказывается кусочек вещества — сорванная с электрода полем пылинка, кусочек пленки, напыленной на электрод, просто слабо держащийся кусочек материала, наконец, при разогреве поверхности электрода электронным потоком в нем возникают напряжения, которые могут «выколоть» из него кусок. Кусочек

вещества, оказавшийся в зазоре, будет бомбардироваться электронами и нагреваться до превращения в пар. Если нагрев слабый, то кусочек долетит до противоположного электрода и может превратиться в пар, ударившись о него. Поведение кусочка, летящего по зазору, довольно сложно, так как бомбардировка его электронами зависит от его потенциала, потенциал зависит от заряда, а заряд — от предшествующей бомбардировки. И задача эта довольно актуальна — не далек тот час, когда на космических аппаратах начнут устанавливать высоковольтную аппаратуру, кругом вакуум, никаких стенок, объемов и насосов не надо, но в вакууме, хотя он и космический, летают микрометеориты — те самые кусочки, которым ничего не стоит вызвать пробой.

Если при полете частиц к электроду напряженность поля на частице окажется достаточно высока, то пробой («обычный» вакуумный пробой) возникнет между нею и электродом. В результате пары материала попадут в зазор и начнется вакуумный пробой через весь зазор.

Инициатором «большого» пробоя может быть и другой «маленький» пробой. Например, на катоде могут быть маленькие кусочки изолирующей пленки (окислы или кусочки абразива, которым обрабатывали поверхность). Положительные ионы из зазора прилетают на катод, попадают на эту пленку, застревают на ней — она же диэлектрическая! — заряд все растет и растет. Увеличивается напряженность поля в пленке, происходит пробой этой пленки, ее испарение, пар попадает в зазор и начинается вакуумный пробой.

Заметим, что в данном случае пробой вакуумного промежутка был инициирован пробоем диэлектрика. Пробой диэлектрика мы рассматривать не будем, но вот о пробое по

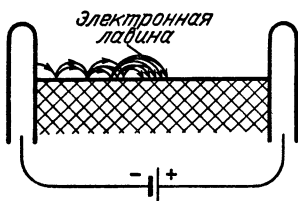


Рис. 37. Схема возникновения поверхностного пробоя

диэлектрику, или о так называемом поверхностном пробое, не сказать нельзя. И не столько потому, что он может инициировать «большой пробой», сколько потому, что физика его — в большей мере — вакуумная.

Итак, пусть кусок диэлектрика зажат между двумя электродами и на них подано напряжение (рис. 37). Из-за высокой напря-

женности поля начинается автоэлектронная эмиссия с электрода, вторичные электроны, выбитые первичными из диэлектрика, летят направо, опять порождают вторичные, и все это устремляется к аноду, по пути десорбируя с диэлектрика

газ. В этом газе и происходит пробой. Заметим, что если к тонкой металлической проволоке, находящейся в вакууме, приложить высокое напряжение, то в процессе быстрого нагрева она десорбирует с себя газ и, если приложенное напряжение большое, успеет произойти разряд в газе вокруг уже испаряющейся проволоки. Этот процесс был изучен сравнительно недавно\*).

## 5. Неустойчивость — инициатор процессов

Обратимся к фундаментальному для физики вообще и для пробоя в частности вопросу — к неустойчивости.

Пусть через вискер на катоде течет ток, который потом эмиттируется с вискера в вакуум и разогревает его. И пусть произошла «флуктуация» — температура вискера чуть-чуть увеличилась. Тут же увеличится отводимая от вискера мощность, но увеличится и выделяемая мощность — увеличение температуры увеличит эмиссию, следовательно, увеличит ток, протекающий по вискеру, и мощность Джоуля — Ленца. Если отводимая мощность окажется больше выделяемой, то вискер остынет, т. е. вернется к состоянию до флуктуации (до изменения температуры). Если же отводимая мощность оказывается меньше выделяемой, то вискер продолжает нагреваться. При этом чем сильнее вискер нагреется, тем больше будет разница между выделяемой и отводящей мощностью и, следовательно, тем быстрее он будет разогреваться дальше. Подобные процессы называются лавинными. Снежная лавина — это тоже лавинный процесс.

Процессы неустойчивости проявляются в пробое в различных формах, например, когда поле выдергивает сосульку из расплавленной зоны на электроде. Но без флуктуации это не произойдет, ибо поле во всех местах одинаково, а «выдернуть» всю поверхность сразу нельзя. Точно такая же неустойчивость возникает при выливании воды из перевернутого стакана (рис. 38).

Неустойчивость может возникать и при очень длинных цепочках процессов, в которых каждый процесс является следствием предшествующего. Вот пример такой цепочки:

а) испарение анода, нагретого автоэлектронной эмиссией с катода;

---

\*) Лебедев С. В. О методике измерения аномальной термоэлектронной эмиссии металлов. — Теплофизика высоких температур, 1981, т. 19, № 1, с. 203 — 205.

Караханов Г. М. Импульсный нагрев проводников в сверхвысоком вакууме. — Журнал технической физики, 1978, т. 48, № 7, с. 1474 — 1481.

- б) ионизация паров материала анода электронами, эмиттированными с катода;
- в) ускорение электрическим полем ионов, летящих в сторону катода;
- г) бомбардировка этими ионами катода и выбивание ионами из катода электронов;

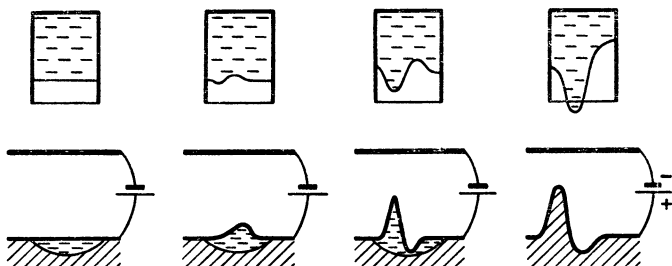


Рис. 38. Развитие неустойчивости: сверху — вода; внизу — зона расплавления вещества на аноде. Развитие процесса во времени — слева направо

- д) ускорение этих электронов, эмиттированных в результате ион-электронной эмиссии;
- е) бомбардировка ими анода и (наконец, цепочка замкнулась!) дополнительный разогрев.

Если случайное колебание в любом звене этой цепи — например, увеличение температуры анода — создает, пройдя по всей цепи, дополнительное тепловыделение, большее, чем дополнительный теплоотвод, то возникает неустойчивость. В итоге произойдет бурное выделение пара в зазор и пробой. Но это уже будет пробой в газе, который протекает по своим законам, и для него существенны другие процессы.

Неустойчивость может быть связана и не с испарением, а с десорбцией. Например, при появлении электрического поля с катода десорбируется газ, этот газ ионизируется идущими вдогонку электронами, эмиттированными посредством автоэлектронной эмиссии; при ионизации газа, находящегося над катодом, может увеличиться напряженность поля на катоде, что увеличивает десорбцию. Поскольку долго десорбироваться газ с поверхности не может (он попросту кончится), то развиваться неустойчивость не успеет, но поле все же успеет в несколько раз возрасти, а это может «включить» другие виды неустойчивости.

И еще одна неустойчивость — электромеханическая. Мы уже знаем, что электрическое поле может оторвать от электрода слабо держащуюся на нем частицу. А если это кусочек напыленной на электрод пленки, то он может и не оторваться,

а изогнуться (рис. 39). При этом электрическое поле на конце полоски возрастает. Если при малой деформации поле возрастает настолько, что сила, с которой оно тянет полоску, возрастает больше, чем сила сопротивления изгибу этой полоски, то возникает неустойчивость. Полоска изгибается все сильнее пока не встанет дыбом. А там уж как повезет — или увеличится автоэмиссия, или поле эту полоску разорвет. И то и другое может повлечь пробой.

Вакуумный пробой — явление принципиально нестационарное. Связано это с тем, что при прохождении тока через зазор на электродах происходят изменения, и условия, необходимые для прохождения тока, нарушаются — вискер испаряется, частица отрывается и т. д.

Кроме этого, обычно электрическая схема не обеспечивает протекания через зазор большого стационарного тока — при попытке пропустить большой ток из-за наличия у источника энергии внутреннего сопротивления уменьшается напряжение на зазоре, и опять нарушаются условия, необходимые для возникновения пробоя. Но пробой может перейти в другое явление, называемое вакуумной дугой. Что такое дуга или дуговой разряд в газе, вы знаете. Процесс, называемый вакуумной дугой, происходит не в газе, а в парах материала электродов. Вакуумная дуга может поддерживаться долго, ибо ни высокие напряжения источника энергии, ни существующие до пробоя вискеры ей не нужны.

Физика вакуумной дуги очень загадочна, и наше представление о ней очень запутано. Как сказано в книге «Вакуумная дуга» (М.: Мир, 1982, с. 23): «Очень немногие физические явления породили такое огромное количество различных и даже взаимоисключающих объяснений...»

Самые общие представления о вакуумной дуге следующие. Металл испаряется с маленьких горячих участков на катоде, называемых катодными пятнами. Эмиттируемые из пятен электроны ионизируют испарение атомов металла, отрицательные ионы устремляются к катоду, бомбардируют и разогревают его. Эмиссия электронов из катода связана как с его нагревом, так и с сильными электрическими полями, возникающими около катода при приближении к нему отрицательных ионов. Катодные пятна быстро и хаотически движутся по катоду. Количество катодных пятен зависит от силы тока дуги — экспе-

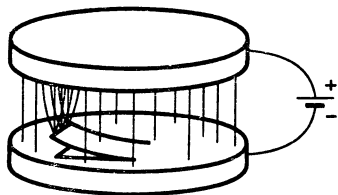


Рис. 39. Пример электромеханической неустойчивости

рименты показали, что каждое катодное пятно пропускает вполне определенный ток, зависящий от металла катода.

А если изменять ток? Катодные пятна делятся и возникают новые, так, чтобы их количество обеспечивало примерно постоянный ток через пятно. «Шнур плазменного огня... превратился в цепочку круглых зерен... Каждое зерно росло и преобразалось, эти капельки... потеряли четкость очертаний, из них выползли отростки, породившие очередную генерацию капелек». Впрочем, это уже не из статьи по физике, а из научно-фантастического рассказа Ст. Лема «Правда».

Поведение катодных пятен весьма сложно. Например, совсем недавно было показано \*), что многие свойства катодных пятен связаны с движением расплавленного металла в жидких «луночках», которые и являются катодными пятнами. Многие свойства катодных пятен связаны со свойствами поверхности металла, на которой они образуются, с ее шероховатостью и ее окислением.

## 6. На пороге новой науки

Как сказал Вольфганг Паули, «поверхность придумал дьявол» \*\*). Но для того чтобы узнать о поверхности все, что сейчас о ней известно людям, надо было придумать методы исследования поверхности и сделать приборы, работающие на основе этих методов. Казалось бы, приборы для исследования поверхности — это лишь одно из множества применений вакуумной техники. Но об этих методах следует рассказать именно в книге, посвященной вакууму, потому что, во-первых, исследование поверхности часто необходимо для изготовления вакуумных приборов и, во-вторых, исследовать поверхность чаще всего приходится в вакууме. К тому же исследование поверхности — исключительно быстро развивающаяся область, а доступного и популярного изложения, из которого можно было бы узнать, что это такое, пока нет.

Чтобы узнать что-то об объекте, надо на него чем-то подействовать и пронаблюдать его реакцию. Например, нагреть образец и исследовать эмиттированные электроны или облучить образец ионами и исследовать выходящее из него электромагнитное излучение. Для того чтобы метод позволил ис-

---

\*) Жаринов А. В., Саночкин Ю. В. О форме мениска и условии равновесия поверхности жидкого металла в катодном пятне вакуумной дуги. — Письма ЖТФ, 1983, т. 9, № 23, с. 1465—1468.

\*\*) Бинниг Б., Рорер Г. Растровый туннельный микроскоп. — В мире науки, 1985, № 10, с. 26—33.

следовать именно поверхность, а не объем образца, необходимо выполнение одного из двух условий: либо воздействие не должно проникать глубже поверхности (как, например, при облучении ионами), либо сигнал, поступающий от образца, должен исходить с небольшой глубины (как, например, при наблюдении эмиттированных электронов или выбитых с поверхности ионов).

Однако прежде чем исследовать поверхность, остановимся на принципиально важном вопросе — на ее подготовке. Надо ли чистить образец, предназначенный для исследования, и если надо, то как? Можно не делать ничего. Можно смахнуть пыль. Можно промыть водой, ацетоном, бензином, спиртом. Можно поместить в вакуум без предварительной обработки. А можно еще и нагреть. Или обработать ионной бомбардировкой, а потом опять нагреть. Как видим, методов множество.

Решение зависит от цели исследования, и далеко не всегда надо чистить до блеска и чистить вообще. Если надо узнать состав поверхности детали, то лучше взять ее непосредственно оттуда, где она работает. Если в воздухе — то из воздуха, если в воде — из воды. Исследовать тоже лучше в той же среде, ибо в чужой среде объект изменится, например в вакууме начнут удаляться летучие вещества с поверхности. Но большинство методов исследования поверхности можно применить только в вакууме, а помещая образец, взятый из воздуха или воды, в вакуум, мы уже влияем на состав его поверхности. Однако это неизбежно. Зато если исследуемый образец — часть электронного прибора, работающего в вакууме и подвергающегося нагреву и электронной бомбардировке, то вполне естественно при исследовании поместить его в вакуум, нагреть и обработать электронным пучком.

Существует, однако, широкий круг физических исследований, в которых объектом является именно чистая поверхность, например, металла. Как ее сделать? Нужно взять кусок этого металла и нагреть его в вакууме для удаления с поверхности воды и сорбированных газов. Но бывают такие термостойкие окислы, что нагревом их не удалить. Тогда надо обработать поверхность ионной бомбардировкой. Но при этом в образец внедряются ионы, а на поверхности возникнут дефекты в кристаллической решетке и рельеф — ямы и бугры там, где их не было. Можно снова нагреть образец, чтобы избавиться от дефектов, но при этом из объема на поверхность выйдет углерод. Тогда надо нагреть образец при наличии в вакууме некоторого количества кислорода. Углерод соединится с кислородом и удалится, однако металл может окислиться. И так далее, и так далее...



Применяют и многостадийную очистку (нагрев — бомбардировка — нагрев — бомбардировка), стараясь при этом брать сверхчистые вещества, наконец, напыляют прямо в той же установке пленку исследуемого вещества. Короче, действуют в зависимости от наличия оборудования, времени и степени сложности поставленной задачи. Заметим, что знания, добытые физиком, будут служить людям почти вечно, а поэтому не так важно, добыты они 27 декабря или 3 января. А вот вред от ошибки может быть велик. В самом деле, сколько ошибок, по вашему мнению, может делать стоматолог или кассир? Прав у исследователя Природы в этом вопросе не больше.

Воздействовать на объект можно нагревом, электрическим полем, потоком электронов, ионов, атомов и электромагнитным излучением. При этом объект может генерировать потоки электронов, ионов, атомов и электромагнитное излучение. Таким образом, каждый метод исследования можно характеризовать тем, что применяется для исследования, какую реакцию изучают, как при этом изменяется объект, как интерпретировать данные измерений. Пример: вид воздействия — нагрев; изучаемая реакция — состав продуктов испарения; влияние на объект — уход с его поверхности легко испаряющихся компонентов. Следовательно, происходит изменение поверхности. Интерпретация — пар должен состоять из тех компонентов объекта, которые наиболее легко испаряются при нагреве.

Далее, для характеристики метода исследования поверхности первостепенное значение имеет величина анализируемой площади, так же, как при фотографировании со спутника — минимальный размер объекта, видимый на снимке (порядка 10 см). Наконец, поскольку мы собираемся анализировать поверхность, принципиально важно знать, с объекта какой толщины мы получаем информацию и можно ли эту толщину изменять. И последняя основная характеристика — чувствительность.

Начнем с простого — с формы поверхности.

На «надатомном» уровне, т. е. в области размеров, много больших, чем расстояние между атомами, поверхность определяется шероховатостью, т. е. глубиной, частотой и направлением борозд, высотой и частотой расположения пиков — словом, всем тем, что можно перечислить в ответ на вопрос: горная ли страна находится в 1800 км к югу и 700 км к востоку от Москвы.

На атомном уровне поверхность определяется расположением атомов на ней, которое, кстати, может отличаться от расположения атомов в глубине. Это, прежде всего, наличие дефектов решетки, т. е. наличие атома там, где его не должно быть, или пустого места (вакансия) там, где должен быть атом,

и прочих дефектов. Например, с винтовой дислокацией, с которой начинает расти вискер, мы уже встречались. Сорбированные чужие атомы на поверхности могут иметь свою решетку, отличающуюся от решетки в глубине материала.

Перейдем к вопросу — какие это атомы. Прежде всего, это состав поверхности, т. е. сколько атомов каждого элемента в первом, втором, третьем и т. д. ее слое (первом, втором и т. д. монослое). Но ответа на этот вопрос недостаточно. Например, если проанализировать состав поверхности некоего образца, то мы узнаем, что на поверхности имеется поровну атомов *A* и *B*. Но как устроен образец? Кристаллы ли *B* покрывают половину поверхности вещества *A* или кристаллы *A* покрывают половину поверхности вещества *B*, или это слой соединения *AB*, у которого на поверхности находится поровну атомов *A* и атомов *B*, или это вещество *A*, в котором имеются включения вещества *B*, или наоборот? По данным о составе большого участка поверхности образца понять, какой из этих случаев имеет место, невозможно. Нужен метод, позволяющий устанавливать состав маленьких участков поверхности, меньших размеров кристалликов. Применяв такой метод, мы узнаем, например, что участки, содержащие элементы *A* и *B*, чередуются. Следовательно, это не сплав, но какое из этих веществ образует подложку, а какое — кристаллики на ней, неясно. Решение таких вопросов бывает очень сложно.

Топографией (описанием формы) и составом поверхности проблема не исчерпывается. Например, атом *O* в соединениях  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  и сам по себе — не одно и то же. Как их различить? Если  $O_2$  от  $H_2O$  можно отличить по наличию *H*, а  $H_2O$  от  $H_2O_2$  по отношению *H*:*O*, то как отличить  $O_2$  от  $O_3$ ? Отличаются они по электронной структуре, т. е. по расположению электронов вокруг ядер. Итак, метод исследования поверхности должен отвечать на вопросы: где находится атом, что за атом, как устроена электронная оболочка (в какое соединение входит атом).

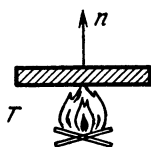
От того, какие атомы находятся на поверхности, как они расположены и в какие соединения входят, зависят остальные свойства поверхности, например работа выхода, коэффициент отражения электромагнитных волн, трение, химические свойства...

Различные методы исследования поверхности мы будем группировать по способам воздействия на поверхность, причем будем рассматривать более подробно те методы, которые пока более широко распространены. А распространенность метода определяется сложностью его реализации и количеством информации об объекте, которую он дает возможность получить.

Кроме того, важно знать, когда метод возник. Как бы ни был хорош метод, открытый в прошлом году, конкурировать с тем, который известен полвека, он не способен. Впрочем, при современном уровне развития приборостроения освоение новых методов происходит достаточно быстро. Физика поверхности развивается стремительно.

## 7. Начнем с нагрева поверхности

Горячее вещество, как нам известно, испаряется интенсивнее, чем холодное. Испарившиеся молекулы можно анализировать масс-спектрометром (прибором для определения масс молекул), как любые молекулы, имеющиеся в вакууме.



Термодесорбция,  
испарение

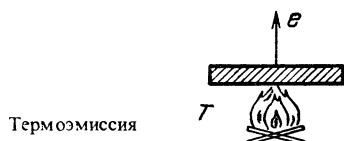
Воздействие метода на объект зависит от того, до какой температуры мы будем нагревать образец. Например, если надо исследовать сорбцию газа на металле, то часто нагрев для десорбции газа нужен слабый. Газ десорбируется и анализируется, а нагрев на образец влияет мало. Но если попытаться так же исследовать состав собственной поверхности образца, а не сорбированных газов, то нагрев нужен сильный, и такой нагрев обычно изменяет состав поверхности. В принципе, анализируемая глубина может составлять монослой, так как испаряется всегда наружный атом. Анализируемый участок может составлять сотые доли миллиметра. Но чем меньше произведение скорости испарения на площадь, тем меньшее количество анализируемого элемента поступает в анализатор. Широкого распространения метод не получил — при температурах, когда скорость испарения велика, материалы обычно не эксплуатируют, а значит, и исследования в таких условиях менее интересны. А вот исследование методом термодесорбции сорбированных газов применяется часто. Этим методом удастся определять, какой именно газ или смесь газов была сорбирована и какова энергия сорбции, т. е. какую энергию должны иметь атомы, чтобы оторваться от поверхности.

Можно применять и локальный нагрев маленькой «молнией» — микроразрядом (искровая масс-спектроскопия) или лучом лазера (лазерная масс-спектроскопия), или электронным лучом. Следует, однако, с огорчением отметить, что глубина

кратера при микроразряде или уколе лазерным лучом составляет около 1 мкм, так что методами анализа поверхности эти методы могут быть названы лишь с некоторой натяжкой.

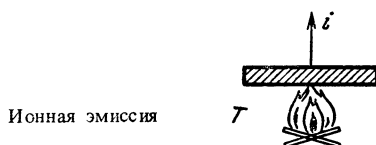
Электромагнитное излучение, возникающее при нагреве, для исследования поверхности пока не используют, так как плохо известно, как связать излучение и строение поверхности. Однако явление эмиссии ионов и электронов при нагреве для исследования поверхности используется. Начнем с электронов.

Эмиссия электронов при нагреве зависит от работы выхода (энергии, которая нужна, чтобы вырвать электрон из вещества),



а работа выхода — от структуры поверхности (у одного и того же материала она различна для разных граней кристалла) и от наличия сорбированных атомов. К сожалению, нагрев, необходимый для изучения термоэмиссии, часто бывает недостаточен, чтобы влиять на свойства объекта. По анализируемой глубине метод заслуживает названия «поверхностный», ибо работа выхода обычно зависит от состояния нескольких наружных слоев атомов. Размер анализируемого участка может быть довольно мал и составлять сотые доли микрометра. Для достижения такого высокого разрешения электроны, эмиттированные сравнительно малым участком поверхности, распределяют по большому экрану и определяют ток, приходящий на разные его участки. Такой прибор называется эмиссионным микроскопом. Чувствительность метода позволяет определять наличие сотых долей монослоя сорбированных веществ на поверхности, ибо именно такие концентрации заметно изменяют эмиттируемый ток.

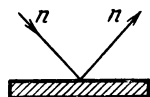
При нагреве происходит эмиссия не только электронов, но и ионов — основного материала или сорбированного. Испаряется,



конечно, атом, но, отлетев от поверхности, он может ионизоваться. Анализ ионов в продуктах испарения также позволяет получать данные о составе поверхности.

Следующая группа методов основана на воздействии на поверхность пучком нейтральных атомов или молекул. Эти методы не получили пока широкого распространения, прежде всего потому, что сформировать узкий пучок из нейтральных частиц, да так, чтобы у них были одинаковые энергии (а это, как мы скоро увидим, важно), трудно. В самом деле, на ионы и на электроны действует и электрическое, и магнитное поле, а на нейтральные частицы не действует ни то, ни другое.

Однако метод, в котором для анализа использованы нейтральные частицы, реально существует и называется он

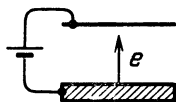


Молекулярное  
рассеивание

«метод рассеивания молекулярного пучка». Диаграмма направленности — зависимость количества отраженных атомов от угла отражения — меняется с изменением шероховатости поверхности объекта и степени ее окисления и может использоваться для их исследования.

## 8. Приложим электрическое поле...

Следующая группа методов, которую мы рассмотрим, связана с воздействием на поверхность больших электрических полей. Если на поверхности объекта есть большое поле, то возникает автоэлектронная эмиссия. При этом



Автоэлектронная  
эмиссия

электрон проходит сквозь потенциальный барьер между металлом и вакуумом и попадает в область сильного ускоряющего поля (рис. 33).

Термоэлектронная эмиссия происходит, если энергия электрона превосходит работу выхода. Для автоэлектронной эмиссии этого не требуется, и зависит она от толщины потенциального барьера (рис. 33), которая определяется работой выхода и приложенным полем. Поэтому, измеряя автоэлектронный ток, можно определить работу выхода.

Простейший способ создать большое поле на объекте — это придать ему форму острия и приложить между острием

и другим электродом некоторое, вполне умеренное, напряжение (рис. 40). В качестве другого электрода можно использовать экран, покрытый слоем люминофора — вещества, светящегося при попадании на него электронов. Тогда на экране мы увидим «автоэлектронное изображение» острия. Прибор, работающий на основе данного принципа, называется автоэлектронным проектором. При отношении радиуса экрана к радиусу острия  $10 \text{ см} : 0,1 \text{ мкм} = 10^6$  увеличение прибора равно  $10^6$ , и 1 нм на острие увеличивается до 1 мм на экране. Так что анализируемая площадь будет быть очень мала.

Глубина, с которой метод «берет информацию», интерпретация и чувствительность примерно такие же, как при измерении термоэмиссии, а вот оказываемое на объект влияние, очевидно, иное: вместо нагрева используется сильное электрическое поле. Оно может разорвать острие, и, как мы уже знаем, изменить условия сорбции газов на поверхности и ускорить поверхностную диффузию. Добавим, что, как и при исследовании термоэмиссии, имеет смысл определять энергии эмиттированных электронов: выходя из металла, электроны взаимодействуют с сорбированными атомами и теряют часть энергии. По этим потерям можно найти некоторые характеристики сорбированных атомов.

Теперь сделаем все наоборот — образец возьмем плоским, а острую иглу приблизим к нему на маленькое расстояние. Если начать двигать эту иглу вдоль поверхности, то зазор между иглой и поверхностью будет изменяться. Там, где из поверхности «торчит» атом, зазор будет уменьшаться, напряженность поля увеличиваться и ток автоэлектронной эмиссии, следовательно, тоже. Благодаря сильной зависимости тока от напряженности поля разрешающая способность метода оказывается весьма высокой. Практически удастся «почувствовать» неровности порядка  $10^{-10} \text{ м}$ , т. е. отдельные атомы. Прибор, основанный на этом принципе, называется «растровый туннельный микроскоп».

Теперь изменим полярность напряжения, приложенного к проектору. В окрестности острия и на самом острие будет, как и раньше, большое поле, но противоположной полярности. Каких явлений следует ожидать? Прежде всего, аналогично автоэлектронной эмиссии — эмиссии ионов. Ее можно было бы назвать автоионной эмиссией, но стало общеприня-

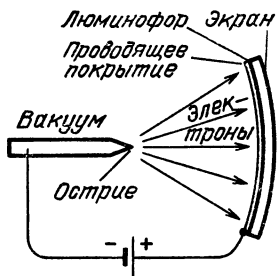
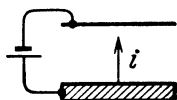


Рис. 40. Автоэлектронный проектор

тым название «полевое испарение». Если поле вырывает из поверхности атом не основного материала, а сорбированный, применяется термин «полевая десорбция».



Полевое испарение, полевая десорбция, атомный зонд

Как мы уже видели, большое поле имеет место не только на самом острие, но и в его окрестности. Поле может действовать на вещество, и если рядом с острием окажется молекула газа, то электрон может покинуть ее и перейти в острие. Получается автоэмиссия «наоборот». Образовавшийся ион направляется от острия к люминесцентному экрану и, закончив на нем свой путь, вспышкой даст нам знать о происшедшем. Ион должен беспрепятственно добраться до экрана. Для этого давление газа (его называют «изображающий газ») должно быть не слишком велико, чтобы длина свободного пробега была больше расстояния до экрана. Разрешающая способность такого прибора (автоэлектронного проектора с измененной полярностью), именуемого «ионным проектором», настолько велика, что видны отдельные атомы, ибо около атомов наружного слоя материала острия поле больше и над ними ионизация происходит чаще (см. рис. 41).

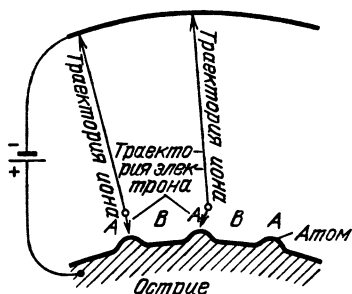


Рис. 41. Ионный проектор. Размеры острия и атомов увеличены. В точках А поле больше, чем в точках В

Вспышки от отдельных ионов, конечно, слабы, но увеличить их яркость техника может. Есть специальные приборы, называемые усилителями яркости, которые позволяют в безлунную ночь, лишь при свете звезд, видеть предметы почти как днем.

Воздействие на объект в ионном проекторе — это воздействие сильного электрического поля.

Ионный проектор позволяет не только увидеть отдельные атомы, но и узнать, что это за атомы. Если острие поворачивать, то все изображение на экране будет также поворачиваться (как поворачивается картина звездного неба в планетарии при вращении сферы с отверстиями и лампой внутри). Острие поворачивают так, чтобы изображение заинтересовавшего нас атома попало в специальное отверстие на экране. За этим

отверстием находится времяпролетный масс-спектрометр. На проектор подается короткий импульс напряжения, создающий поле, достаточное для десорбции выбранного атома. Он срывается с поверхности и пролетает через проектор в масс-спектрометр. По времени пролета можно определить, что это за атом. Такой прибор называется «атомный зонд», и позволяет он определять расположение и тип отдельных атомов на поверхности. Наверное, герой рассказа А. Ван-Вогта «Чудовище», живший во времена, когда люди научились считать атомы, с уважением пожал бы руку создателям атомного зонда.

Каждый новый инструмент увеличивает возможности человека. Сравните рытье ямы лопатой и руками, экскаватором и лопатой. Сравните человека, владеющего колесом и полозьями, калькулятором и счетами. А каждый новый инструмент познания увеличивает изученную человеком часть мира. С помощью атомного зонда было, например, обнаружено, что:

а) в сильных электрических полях атомы инертных газов поляризуются, притягиваются к металлу и сорбируются на нем;

б) после этого поле вызывает десорбцию с металлического острия не только сорбированных атомов инертных газов, но и десорбцию ионов  $WHe^{2+}$ ,  $ReHe^{2+}$ ,  $TaNe^{2+}$ ;

в) кроме этого, среди десорбированных с поверхности Ag, Cu, Au ионов есть комплексы металла и сорбированного газа, например  $Ag(H_2O)_n^{2+}$ , где  $n = 1, \dots, 12$ ,  $Cu(N_2)_n^{2+}$ , где  $n = 1$  или  $2$ ,  $Au(CO)_n^{2+}$ , где  $n = 1$  или  $2$ ;

г) наконец, сорбированные атомы, диффундируя по поверхности металла, иногда передвигаются не поодиночке и независимо, а группами или цепочками по несколько атомов.

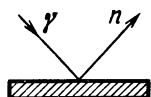
## 9. Наконец, осветим поверхность

Перейдем к методам, в которых объект зондируется электромагнитным излучением. Основным преимуществом этих методов является малое, по сравнению с зондированием ионами и электронами, влияние на объект. Но даром ничто не дается — электронными и ионными пучками легче управлять (на движение заряженных частиц влияют электрические и магнитные поля). А создать пучок электромагнитного излучения нужной частоты, интенсивности и диаметра не всегда просто.

На воздействие электромагнитного излучения образец может реагировать испусканием электромагнитного излучения, электронов и нейтральных частиц. Испускание последних называется фотодесорбцией. Сам по себе квант излучения может выбить из поверхности атом только при большой энергии.



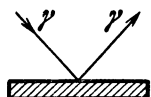
Однако квант, поглотившись, например, полупроводником, может повлиять на поведение имеющихся в нем электронов, а это,



Фотодесорбция

в свою очередь, может повлечь уход с поверхности сорбированного атома.

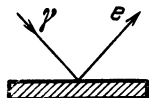
Электромагнитное излучение может отразиться от образца, при этом коэффициент отражения зависит от свойств поверхности. Действительно, почему данный предмет такого цвета,



Инфракрасная  
спектроскопия

какого он есть? Молекулы краски поглощают излучение других частот, а этой — соответствующей видимому нами цвету — отражают. Наблюдая отраженное излучение, можно исследовать и очень тонкие слои сорбированных молекул, имеющие толщину вплоть до нескольких молекул, хотя это, конечно, не просто. Влияние такого тонкого слоя на излучение мало, поскольку молекул в нем мало. Размер анализируемого участка определяется диаметром светового пятна на поверхности и может быть доведен до единиц микрометра.

Методы, в которых и воздействие, и «отклик» есть электромагнитные волны, могут применяться, в отличие от других методов исследования поверхности, не только в вакууме, но и в газе и в жидкости, лишь бы газ и жидкость пропускали эти волны. И если вакуум недопустимо изменяет свойства помещенного в него объекта исследования, то преимущество метода зондирования электромагнитным излучением очевидно.



Фотоэмиссия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия

Если кванты с известной энергией попадают в объект, они могут выбивать из атомов электроны, которые, в свою очередь, могут «выскакивать» в вакуум. Максимальная энергия этих электронов («фотоэлектронов») равна энергии квантов минус работа выхода. Итак, измерив энергию фотоэлектронов, можно

определить работу выхода, а по ней определить состав вещества. На практике размер анализируемого участка составляет обычно около  $1 \text{ мм}^2$ . Сам по себе пучок излучения можно сделать и тоньше, но с уменьшением анализируемой площади уменьшается сигнал (количество фотоэлектронов). А чем сигнал меньше, тем труднее его выделить из шума и тем труднее его исследовать.

Заметим, что если максимальная энергия фотоэлектронов, вышедших из объекта, при фиксированной длине волны излучения зависит от работы выхода, то их количество зависит, кроме интенсивности потока квантов, еще и от объемных свойств объекта. Например, от того, на какую глубину проникают кванты и легко ли выбраться с этой глубины фотоэлектронам.

Однако информацию несет не только максимальная энергия фотоэлектронов, но и зависимость их количества от энергии, или их «спектр». Но прежде надо понять, с каких оболочек атомов выбиты эти электроны — а это зависит от того, чем облучается объект.

Пусть мы имеем кванты с энергией  $10-40 \text{ эВ}$ , что соответствует длине волны  $120-30 \text{ нм}$ . Излучение с такой длиной волны называют «вакуумным ультрафиолетовым излучением». Дело в том, что это излучение сильно поглощается воздухом, поэтому приборы, его использующие, помещают в вакуум. Соответствующий метод исследования называется ультрафиолетовой электронной спектроскопией.

При облучении квантами указанной энергии из атомов могут удаляться только электроны из внешних (валентных) оболочек, поэтому метод применяется для исследования атомов, сорбированных на поверхностях. Если же это кванты с энергией  $1,2-1,5 \text{ кэВ}$ , что соответствует длине волны около  $1 \text{ нм}$  (рентгеновское излучение), то соответствующие электроны выходят из внутренних оболочек. Вычитая из энергии кванта энергию вышедшего электрона, можно определить энергию связи соответствующей оболочки и узнать, какие атомы имеются на поверхности образца.

С помощью рентгеновского излучения можно анализировать участки поверхности около  $1 \text{ мм}^2$ . При этом разрешающая способность метода по толщине такова: минимум глубины проникновения рентгеновского излучения составляет около  $0,1 \text{ мм}$ , а минимум глубины выхода фотоэлектронов равен длине свободного пробега электронов, которая значительно меньше  $0,1 \text{ мм}$  и зависит от энергии электронов (рис. 42).

Увеличить разрешающую способность метода, т. е. уменьшить анализируемую глубину, можно. Для этого лучше исследо-

вать электроны, вылетающие из объекта не перпендикулярно к поверхности, а под малым углом (рис. 43). Под такими углами из объекта имеют шансы выбраться только электроны,

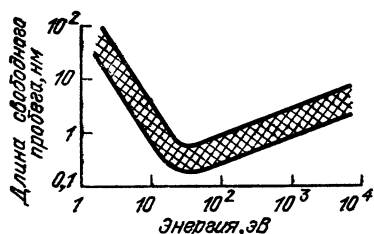


Рис. 42. Зависимость глубины, с которой может выйти из вещества электрон, от его энергии. Данные для различных веществ с плотностью от 2 до 20 г/см<sup>3</sup> лежат в заштрихованной полосе

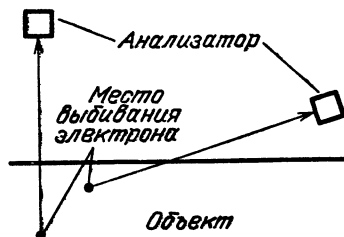


Рис. 43. Уменьшение анализируемой глубины при наблюдении электронов, эмиттированных под малыми углами

выбитые из атома, находящегося на малой глубине, т. е. практически на поверхности.

Не следует думать, что анализ химического состава поверхности методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии прост. Проблем в этом методе, как и в любом другом, много. Для примера рассмотрим всего лишь две проблемы — одну техническую и одну физическую.

Когда электроны покидают образец, его поверхность заряжается положительно. Если образец проводящий, то проблем не возникает — недостающие электроны тут же подойдут к поверхности и поверхность по-прежнему остается электрически нейтральной. А если образец диэлектрический? Увеличение положительного заряда на его поверхности выглядит как увеличение энергии связи, ибо электрону приходится преодолевать тормозящее поле положительно заряженного образца и к анализатору он приходит с меньшей энергией. Как бороться с зарядкой поверхности? Снять заряд нанесением на поверхность проводящей пленки в данном случае нельзя — ведь именно поверхность образца мы и собираемся исследовать. Один путь борьбы с зарядкой поверхности — компенсировать ее, облучая поверхность электронами от отдельного источника. Другой путь — нанести на поверхность чуть-чуть какого-нибудь вещества (эталоны) с известной энергией связи и сравнивать с ней энергию связи неизвестного вещества. В качестве эталона часто применяют углерод, попадающий на поверхность из диффузионных насосов и резиновых уплотнений. При зарядке поверхности энергия уходящих от поверхности электронов умень-

шается, но энергия связи углерода остается, конечно, постоянной, и по разности энергий электронов, выбитых из атомов углерода и атомов неизвестного элемента, определяется энергия связи последних.

Приведем пример проблемы физической. Если смешать порошок W и алюмината бария-кальция (сложное соединение, содержащее Ba, Ca, Al и O) и нагреть смесь, то через некоторое время работа выхода смеси уменьшится и станет меньше работы выхода и W, и алюмината. Ясно, что на поверхности образовалось какое-то новое вещество. Анализ обнаруживает на поверхности образца в основном O и Ba. Возникает вопрос: что там образовалось? Кристаллы BaO на W? Или Ba, сорбированный на окисленном W, т. е. система  $W - O - Ba$ ? А может быть, окисленный Ba, сорбированный на W, т. е. система  $W - Ba - O$ ? Спектр электронов исследуемого объекта, если его сравнить со спектрами всех этих веществ и систем, окажется в чем-то отличным от каждого и в чем-то похожим. Поэтому исследуемый объект не является ни одним из перечисленных. А каким? К этому вопросу мы еще вернемся.

Прежде чем переходить к методам анализа, использующим бомбардировку поверхности ионами и электронами, вернемся к ионному распылению. Сейчас нам потребуется чуть более «тонкая» информация об этом процессе, чем та, которая нужна при рассмотрении работы соответствующих типов насосов.

## 10. Ионное распыление — «кисточка археолога»

Пусть с помощью некоторого метода анализа поверхности мы узнаем ее состав до некоторой глубины. Как узнать, что находится глубже? Можно просто применить метод, «чувствующий» большую глубину, но при этом у нас будут смешиваться сигналы от разных слоев, и мы будем видеть средний состав. Хотелось бы знать, что расположено на каждом нанометре до глубин, скажем, в одну десятую миллиметра (это примерно совпадает с «геологическим» разрешением при бурении скважин — сантиметр на километр).

Для этого надо проанализировать верхний нанометр, потом ионным распылением сорвать его, проанализировать следующий и т. д. Геологов бы этот способ не вдохновил, но у тех, кто изучает поверхность твердого тела, другого способа пока нет. Да и археологи действуют именно так, а как много интересного они узнают!

При этом следует учитывать свойства ионного распыления, затрудняющие его применение при анализе поверхности:

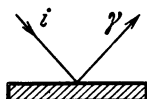
а) распыление селективно — разные атомы распыляются с разной скоростью;

- б) распыление может ускорять диффузию;
- в) бомбардировка ионами может «вбивать» атомы примеси в глубину основного материала, и эта примесь будет обнаруживаться на глубине, на которой до анализа ее не было;
- г) если распыление производится локально и образуется кратер, то материал, распыляемый со стенок кратера, может попадать на его дно;
- д) при анализе сигнал от стенок может примешиваться к сигналу от дна, если анализируемая площадка недостаточно мала...

«... для того чтобы знать что-то, надо знать все. Однако поскольку мы являемся индивидуумами, конечными как в пространстве, так и во времени, то допускаем компромисс». Т. А. Карлсон, автор книги «Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия» (М.: Машиностроение, 1981), написал эту фразу не от хорошей жизни.

Исследование распределения элементов по глубине («профилей концентрации») путем распыления можно осуществить при любом методе исследования собственно поверхности. Но наиболее естественно распыление сочетается с методами, основанными на бомбардировке образца ионами.

При бомбардировке ионами можно анализировать поступающие из образца атомы, ионы, электроны и электромагнитное излучение. Электромагнитное излучение может генерироваться двумя способами. Когда ион водорода или гелия

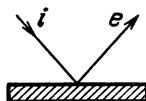


Ионно-рентгеновская  
спектроскопия

с энергией более 100 кэВ входит в материал, он выбивает электрон из внутренней оболочки атома, на это место переходит электрон из внешней оболочки и одновременно испускается квант рентгеновского излучения. Энергия кванта равна разности энергий электрона на двух оболочках, и она различна для разных элементов. Но применение ядер с указанной энергией для исследования поверхности технически сложно. А для прочих ионов при меньших энергиях механизм генерации излучения следующий: при сближении иона и атома электрон переходит из атома в ион (если в ионе есть на какой-либо из оболочек подходящее по энергии незаполненное место (вакансия)). В результате образуется вакансия уже в атоме, а дальнейшее нам известно: другой электрон попадает в эту вакансию и генерируется квант.

При переходе электрона с внешней оболочки на внутреннюю избыточная энергия может не только выделяться в виде кванта электромагнитного излучения, но и передаваться какому-либо

Ионно-электронная  
эмиссия

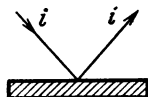


другому электрону. Если полученной энергии окажется достаточно, электрон может покинуть атом. По энергии такого электрона также можно установить, из атома какого элемента он произошел. С этим процессом мы еще встретимся при рассмотрении облучения поверхности электронами, ибо выбить электрон из внутренней оболочки атома можно и другим электроном.

Существует еще один путь возникновения ион-электронной эмиссии, ее, в отличие от описанной выше кинетической (зависящей от кинетической энергии ионов), называют потенциальной. При подходе иона к поверхности электрон может перейти из образца в ион (посредством автоэлектронной эмиссии), а избыточная энергия передается другому электрону образца, и если она превышает работу выхода, то электрон из образца может вылететь в вакуум.

Из всех методов, связанных с ионной бомбардировкой, наиболее широко используются методы, связанные с потоком

Спектроскопия рассеянных ионов, вторичная ионная масс-спектропия



ионов, идущих от образца. Основных таких методов два. В одном из них исследуют рассеянные образцом первичные ионы, во втором — распыленные ионы материала объекта.

Начнем с первого. Ион массы  $m$  налетает на поверхность, сталкивается с атомом массы  $M$  и отражается под углом  $\theta$  (рис. 44). Энергия ионов, рассеянных под разными углами, зависит от  $m$ ,  $M$  и  $\theta$ , и при  $M > m$  и  $\theta = 90^\circ$  (наиболее простой случай, стараются им и пользоваться) энергия отраженного иона относится к энергии падающего, как  $(M - m)/(M + m)$ . Измерив отношение энергий, можно установить, с атомом какого элемента столкнулся ион.

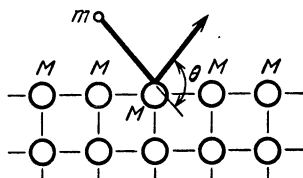


Рис. 44. Рассеивание ионов твердым телом

К сожалению, при отлете от поверхности не менее 99% ионов нейтрализуется (превращается в нейтральные атомы), и энергоанализатор их «не чувствует». Кроме того, метод усложняется из-за многократных столкновений ионов с атомами. Однако по угловому распределению отраженных ионов можно определить и взаимное расположение атомов, что видно из рис. 45. Сигнал от атомов, расположенных «глубоко», можно

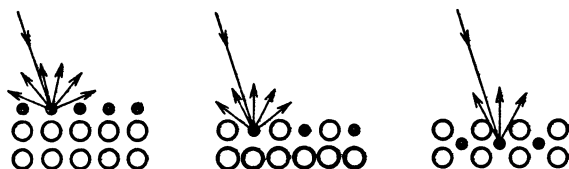


Рис. 45. Влияние расположения атомов на поверхности на угловое распределение рассеянных ионов. Чем глубже расположены атомы, обозначенные черными кружками, тем в более узком пучке сосредоточены ионы, отраженные от них

наблюдать только при движении ионов перпендикулярно к поверхности. Размер анализируемого участка («локальность») в этом методе составляет около микрометра. Высокая чувствительность и локальность привели к тому, что этот метод сейчас один из наиболее распространенных, так же, как и второй метод этой группы — анализ масс ионов, выбитых из поверхности объекта. Этим методом можно устанавливать состав поверхности на такой же маленькой площади и он так же чувствителен к составу первого слоя атомов.

В обоих рассмотренных методах сканирование ионного луча по поверхности (обход поверхности) с наблюдением содержания определенного элемента позволяет получать изображение объекта, как говорят, «в лучах» определенного элемента, или карту его распределения на объекте. Кстати, это возможно вообще во всех методах, в которых производится локальное исследование объекта.

Применение анализа ионов, содранных с поверхности образца при послойном распылении образца ионами, позволяет получить распределение элементов по глубине образца. Приведем два вполне характерных примера. Пусть на кристалл арсенида галлия GaAs напылена пленка сплава AuGe толщины 0,15 мкм, а сверху — пленка Ni той же толщины. Требуется узнать, каков будет состав пленок после нагрева. Масс-спектрометрия вторичных ионов вместе с ионным распылением дают ответ, показанный на рис. 46. Из рисунка видно, что при нагреве Ni продиффундировал в AuGe, Ga продиффундировал и в AuGe, и в Ni и, наконец, Au диффундировал в слой Ni.

При этом нагрев был не такой уж сильный. Отсюда понятно, какие трудности, вызванные взаимодиффузией, встают перед конструкторами высокотемпературных приборов.

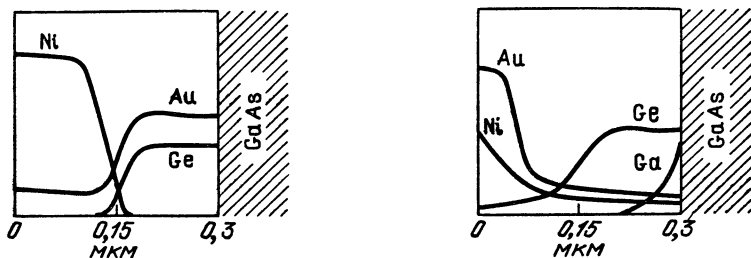


Рис. 46. Распределение элементов по глубине в объекте: пленка Ni (0,15 мкм) — пленка AuGe (0,15 мкм) — кристалл GaAs. Слева — после напыления, справа — после нагрева (за 15 с) до 480 °С

Второй пример: пусть мы хотим напылить на подложку пленку сплава NiCuMnTi. Возьмем кусочек указанного сплава, нагреем его, чтобы он начал испаряться, и поместим в пары подложку. На подложке получится пленка, состав ее не будет совпадать с составом распыляемого вещества. На рис. 47 видно, что самые глубокие слои пленки состоят в основном из Cu (Cu распыляется в первую очередь). Потом появляются и через некоторое время исчезают Ti и Mn (Mn несколько позже), потом появляется Ni, и основная часть толщины пленки состоит, по существу, из Cu и Ni, причем концентрация Ni к поверхности растет. Изменение состава продуктов испарения по отношению к испаряемому сплаву связано с разной скоростью испарения компонентов.

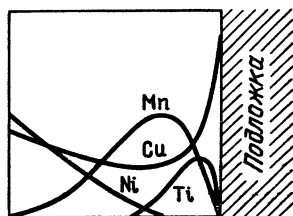


Рис. 47. Распределение элементов по глубине в пленке, полученной при испарении сплава NiCuMnTi

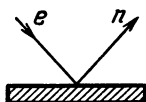
## 11. «Электронный прожектор» освещает объект

Последняя группа рассматриваемых нами методов — это методы, в которых воздействие на поверхность осуществляется электронным лучом. При этом объект может испускать электроны, ионы, атомы и электромагнитное излучение.

Начнем с самого простого. Электроны с малой энергией проникают в вещество неглубоко, следовательно, мы будем



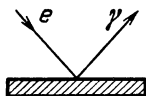
подвергать анализу только поверхностный слой, но оторвать от поверхности собственный ее атом они не могут. А электроны с достаточно большой энергией слишком сильно углубятся в образцы, и сбитые ими со своих мест атомы не добе-



Электронно-стимулированная десорбция

гутся до поверхности. Поэтому такие электроны способны лишь удалить с поверхности сорбированные атомы, причем одни газы удаляются легко, а другие — нет, что вовсе не облегчает анализ. Кроме того, всего лишь менее 1% сорбированных атомов уходит от поверхности в виде ионов, которые легко анализировать. Поэтому этот метод, называемый «электронно-стимулированной десорбцией», применяется редко.

Шире применяются методы, основанные на генерации при электронной бомбардировке так называемого «характеристического излучения». Если энергия бомбардирующих электронов достаточна для перемещения принадлежащего атому электрона



Спектроскопия пороговых потенциалов

с одной оболочки на другую, то при возвращении перемещенного электрона на свое старое место будет испускаться рентгеновское излучение. Длина его волны зависит от разности энергий между оболочками. Поэтому излучение атомов разных элементов различно, что и позволяет определять состав объекта.

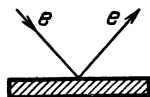
И, наконец, рассмотрим методы, в которых и воздействие, и реакция — это электроны. Это могут быть отраженные первичные электроны — те, которые летели к объекту, и вторичные — выбитые из него. Углы, под которыми электроны уходят от образца после отражения\*), зависят от структуры поверхностного слоя. Этим методом было, например, обнаружено, что атомы на поверхности могут быть расположены не так, как в объеме. В частности, в первом слое могут чередоваться

---

\*) Электрон взаимодействует с атомами, проявляя при этом свойства и частицы, и волны. Поэтому при отражении возникает дифракция, как при отражении света от дифракционной решетки или как при прохождении света через отверстия в экране.

атомы и пустые места (вакансии), через которые «просматриваются» атомы второго слоя. Если на такую поверхность начать напылять атомы, то верхний слой должен понемногу дополняться. При этом происходит следующее: верхний слой

Оже-электронная спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия характеристических потерь, дифракция электронов, спектроскопия ионизационных потерь



разбивается на относительно большие участки («домены»), устроенные по-разному (например, заполненные полностью и наполовину). По мере напыления заполненные участки понемногу растут, а полузаполненные уменьшаются.

У некоторых металлов с кубической решеткой в объеме (золото, иридий, платина) атомы на поверхности расположены шестиугольниками! Поверхности, устроенные не так, как объем, называются реконструированными. Реконструкция собственных атомов поверхности может происходить и при сорбции. А если сорбированных атомов не хватает для всех поверхностных атомов основного вещества, они укладываются через один, через два, через три и т. д. При этом период в разных направлениях может быть различным: например, по одной оси сорбированный атом может лежать на каждом атоме основной решетки, а по другой — через два на третьем. Этот метод исследования поверхности, называемый методом «дифракции медленных электронов», является одним из самых старых и широко применяющихся.

Не уступает этому методу по широте применения и метод сканирующей электронной микроскопии. Пучок электронов, выходящий из так называемой электронной пушки, достигает объекта и передвигается по его поверхности (сканирует), обходя ее строка за строкой. Одновременно другой луч электронов обходит экран телевизора. Рядом с объектом в микроскопе стоит коллектор — электрод, собирающий вторичные электроны. Количество вторичных электронов, попадающих на коллектор, зависит от рельефа объекта. Будем изменять ток луча в телевизоре и, следовательно, яркость его экрана, которая пропорциональна току электронов, приходящих на коллектор в микроскопе. Мы получим на экране изображение рельефа поверхности объекта, такое, как если бы объект освещался светом сбоку, а при этом на него смотрят сверху. Казалось бы, надо считать, что глаз расположен сбоку, а объект освещен сверху «электронным лучом». Однако левая часть гребня в этом случае не была бы видна совсем. Между

тем, как видно из рис. 48, в детектор попадают и электроны из области, лежащей слева от гребня, хотя и в меньшем количестве. Поэтому надо считать, что глаз находится сверху, а объект освещен «лучом света» сбоку и более слабым рассеянным светом — со всех сторон.

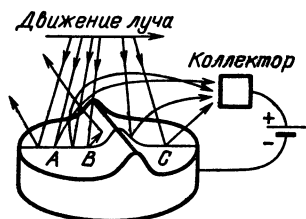


Рис. 48. Принцип работы сканирующего электронного микроскопа. Из областей A и C все вторичные электроны достигают коллектора, из области B — не все: слева от гребня тень

Разрешающая способность электронного сканирующего микроскопа зависит от диаметра электронного луча и от того, как электроны рассеиваются в объекте. Действительно, луч может быть очень тонким при входе в образец, но в самом образце он «распушается» (рис. 49). Глубина проникновения первичных электронов больше максимальной глубины выхода вторичных электронов (около 10 нм), поэтому из рис. 49

видно, что в случае тонкого луча разрешающая способность определяется именно эффективной глубиной выхода вторичных электронов.

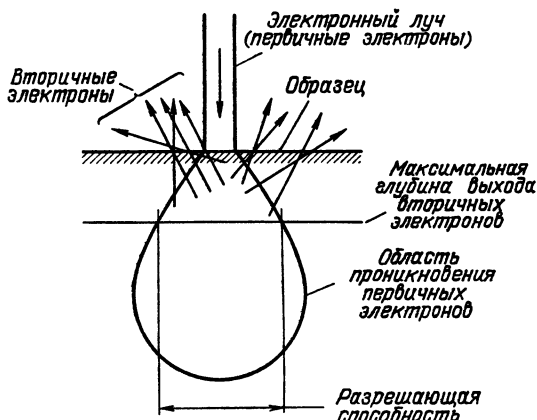


Рис. 49. Разрешающая способность сканирующего электронного микроскопа

Изображение в электронном сканирующем микроскопе имеет ряд особенностей, отличающих его от оптического. Например, разные вещества имеют разный коэффициент вторичной эмиссии, поэтому можно различать на объекте области разного состава. Кроме того, при касательном падении

электронного луча на объект увеличивается количество вторичных электронов, выходящих из объекта (см. рис. 43), поэтому «крутые склоны» на электронно-микроскопическом изображении выглядят яркими.

В отличие от сканирующей электронной микроскопии метод спектроскопии характеристических потерь энергии использует первичные электроны, отраженные от образца. При отражении электроны могут терять часть своей энергии («характеристические потери») на возбуждение колебаний электронов проводимости и сорбированных атомов. Измеряя энергию отраженных электронов, мы определим, какая часть энергии потеряна при взаимодействии с образцом. Это способ исследования одновременно и электронов проводимости, и сорбированных атомов, поскольку от того, как они расположены (прямо над атомом подложки, посередине между ними или в промежуточных положениях) зависит частота возбуждаемых колебаний и потери энергии. Заметим, что эти потери могут быть не только у первичных электронов, но и у электронов, выбитых из атомов квантами и электронами.

Первичные электроны могут отражаться от объекта, потратив энергию не только на возбуждение колебаний, но и на переброс электронов с внутренних оболочек на внешние. Так как энергия различна для разных элементов, то, используя этот факт, можно устанавливать химический состав поверхности образца. Но энергию первичных электронов можно изменять, следовательно, можно изменять и глубину анализируемого слоя. Этот вид потерь энергии называется ионизационным, а метод исследования — ионизационной электронной спектроскопией. Конечно, ионизационные потери, как и характеристические, могут испытывать и электроны, выбитые квантами и другими электронами.

Поскольку эмиссия электронов из вещества может быть вызвана и бомбардировкой, например, ионами, то можно создать прибор, использующий пучок ионов для бомбардировки образца, но анализирующий, как электронный микроскоп, эмиттированные электроны. Сейчас уже делаются попытки создать такой прибор, хотя достигнутое разрешение пока хуже, чем у электронного микроскопа.

Следующий метод, который мы рассмотрим, тоже связан с удалением электронов из атомов при бомбардировке электронами, но при этом анализируются не удаленные электроны, а нечто другое... На место выбитого перемещается один из более далеких от ядра электронов, а избыток энергии передается третьему, который улетает в вакуум к анализатору энергии.

Этот метод позволяет анализировать объект на глубине около  $10^{-9}$  м (несколько монослоев), а размер анализируемого участка составляет доли микрометра (диаметр электронного луча). Водород и гелий этим методом наблюдать нельзя, поскольку у них нет третьего электрона. Заметим, что процесс может быть и многостадийным, так как электрон, переместившийся вниз и заполнивший вакансию, оставил вакансию там, откуда ушел, и процесс может продолжаться. Этому методу повезло с названием: он имеет общеупотребительное «имя собственное» — Оже-спектроскопия. Назван он так по имени своего автора Пьера Оже. (Кроме обычного Оже-эффекта, бывают еще двойной, когда выбрасываются два электрона, и половинный — когда заполняются две вакансии, а вылетает один электрон.)

В заключение вернемся к уже упомянутой системе W + алюминат Ва—Са. История с ней весьма поучительна, ибо эта система давно и успешно применяется как катод электронных ламп, а вот как она устроена, до сих пор не вполне ясно. Даже современные методы анализа, несмотря на их фантастическую чувствительность, не сразу привели к лучшему пониманию. Давно уже было установлено, что в этой системе на поверхности W (W в роли катода) вырастают кристаллики окислов Ва. Так как вначале их там не было, то, следовательно, Ва и О попадают на поверхность катода в результате поверхностной диффузии (миграции) по W. Таким образом, в системе после ее прогрева появляются кристаллы окислов Ва, а также содержится W, покрытый монослоем Ва и О. Но методы не имели поначалу необходимого пространственного разрешения и давали смесь сигналов от кристаллов и монослоев, разобраться в которой было невозможно. Сейчас картина начала проясняться. Заметим, что отчасти прогресс был связан с одновременным применением различных методов, и это вообще характерно для современного состояния области.

В заключение главы вспомним, что почти все методы исследования поверхности применимы только в вакууме. Каковы должны быть особенности таких вакуумных установок? Основная — очень высокий вакуум, обычно не хуже  $10^{-7}$  Па.

Какие же насосы можно применять в установках для исследования поверхности? Пока наиболее часто используют магниторазрядные и сублимационные насосы, у других насосов есть недостатки: у диффузионных — наличие масла, у турбомолекулярных — вибрация. Криогенные насосы (использующие сорбцию на охлаждаемой поверхности) вроде бы недостатков не имеют, но еще не «вошли в быт». Возможно, что будущее принадлежит именно им.

**БОЛЬШИЕ И ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ****1. Вакуумные инструменты большой науки**

Электронные лампы бывают разных размеров, но обычно «рост» их не больше роста человека, так что «имитаторы космоса» могут смотреть на них свысока, так как самые маленькие из них примерно такие же, как самые большие лампы. Один из самых больших имитаторов, установленный в Хьюстоне, имеет диаметр 22 м и высоту 40 м (высота 15-этажного дома). Когда астронавты высаживались на Луне, дублирующий экипаж проделывал все те же операции в этом имитаторе, и если бы там, в космосе, что-нибудь случилось, то здесь, на Земле, можно было бы проверить и подсказать, что и как должны сделать астронавты, чтобы выйти из беды.

Функция имитатора, как это явствует из названия, — имитировать воздействие космоса на различные объекты. Сейчас в общих чертах понятно, что такое космос и что в нем есть, но создать все это сразу в одной установке довольно сложно. Прежде всего нужно имитировать воздействие вакуума, в котором испаряются многие материалы, очищаются поверхности деталей и резко возрастает трение. Далее, воздействие теплового излучения Солнца — прямого ( $1,4 \text{ кВт/м}^2$  около Земли) и отраженного от Земли (до  $0,5 \text{ кВт/м}^2$ ), а также излучения Земли ( $0,2 \text{ кВт/м}^2$ ). Чем ниже температура излучателя, тем больше средняя длина волны излучения, поэтому Солнце, имеющее температуру наружных слоев 6000 К, излучает видимый свет, а Земля с ее в 20 раз меньшей температурой «светит» в инфракрасном диапазоне. Заметим, что само по себе космическое пространство «черное» — оно не возвращает уходящее от объектов излучение. Поэтому камеры имитаторов изнутри часто покрывают черным лаком и охлаждают, чтобы их собственное тепловое излучение было мало. Удобно было бы использовать в качестве стенок камеры «криопанели», т. е. охлаждаемые поверхности крионасосов, но тепловой поток от источников излучения, «изображающих» Солнце, вызовет очень большой

расход хладагента. Поэтому приходится защищать криопанели экранами.

Далее — некоторое количество газа в космосе есть; до 100 км высоты над Землей относительное содержание газов в атмосфере не отличается от атмосферного, выше 1000 км азот и кислород диссоциируют на атомы, а выше 10 000 км «остаточная атмосфера» состоит из гелия и водорода. Все это тоже надо имитировать. Наконец, потоки протонов и электронов высокой энергии, которые выводят из строя солнечные батареи, и, наконец, пыль и микрометеориты.

Собрать в одном имитаторе все виды воздействия космоса очень сложно, поэтому комплексное воздействие космоса всегда было, есть и останется проблемой проблем.

В отличие от имитаторов космоса по физике и технике ускорителей и управляемого термоядерного синтеза существует хорошая популярная литература, и нет необходимости подробно рассказывать об этом. Остановимся лишь на рассмотрении вакуумных процессов в них.

Требования, предъявляемые ускорителями к вакуумной технике, были для нее совершенно новыми. В некоторых типах ускорителей должен достигаться такой же вакуум, как в лучших лабораторных установках и приборах. Например, чем большее время должен существовать пучок частиц в ускорителе, тем выше должен быть вакуум, иначе пучок рассеется из-за столкновений ускоряемых частиц с молекулами остаточных газов.

Тем не менее ускорители существуют и работают, а это означает, что многие проблемы так или иначе решены, и часто достигнутые параметры ускорителя определяются именно вакуумом. Никаких особенных методов для очистки ускорителей нет. Для этого используют уже знакомые нам методы: прогрев, очистку газовым разрядом (ионной бомбардировкой) и т. п. Но если раньше все это умещалось на столе, то теперь вдоль вакуумной системы можно проводить гонки.

Особенность ускорителей состоит в том, что основная часть газовыделения ускорителя — это «стимулированное газовыделение» стенок, вызванное попаданием на стенки либо заряженных частиц, либо электромагнитного излучения, возникающего при движении заряженных частиц по окружности. Стимулированное газовыделение затрудняет применение в ускорителях криогенной откачки, так как замороженный на стенку газ будет срываться с нее излучением (хотя сама стенка будет оставаться холодной) и попадать обратно в объем. Дело в том, что при поглощении электромагнитного излучения стенка может не только нагреваться (что, конечно, само по себе уже

вызывает десорбцию), но и эмиттировать электроны. Магнитное поле ускорителя возвращает их на стенку, и эти электроны вместе с самим излучением вызывают десорбцию.

Впрочем, при наличии частиц, движущихся в ускорителе, вакуум может не только ухудшаться, но и улучшаться. Ускоренные частицы ионизируют молекулы остаточных газов, а ионы внедряются в стенки ускорителя. Это явление называется «откачка пучком».

Разработка имитаторов космоса вызвала в свое время освоение криогенной откачки, а создание вакуумных систем мощных ускорителей вызвало исследования стимулированного газовыделения, создание вакуумной арматуры (кранов, затворов, управляемых дистанционно), проведение работ по надежности насосов, применяемых в ускорителях, и многое другое. Дистанционное управление потребовалось из-за высокого уровня радиации вблизи ускорителя, а вопрос о надежности вышел на первый план, когда количество насосов в ускорителе стало измеряться сотнями. А почему их требуется так много?

Камера ускорителя, в которой живет, ускоряется и тормозится, излучает и взаимодействует пучок частиц, длинная и узкая. Газ выделяется по всей ее длине, а откачивается только там, где подсоединены насосы. Ставить насосы вдоль всей камеры вплотную друг к другу невозможно (слишком дорого получится), а если ставить редко, то между насосами вакуум будет хуже. Это та же проблема, что при откачке электронных приборов через узкий и длинный штенгель, только масштабы другие. И другие пути решения возникшей проблемы. Для ускорителей основных таких путей известно два.

Первый — проложить рядом с камерой трубу большого сечения («высоковакуумный коллектор»), откачивать ее редко расположенными насосами (перепад давления в коллекторе мал,



Рис. 50. Две схемы откачки ускорителя, обеспечивающие высокий вакуум: с коллектором и с распределенным насосом

так как его сечение велико), а с камерой пучка коллектор соединить часто расположенными трубками (рис. 50 слева).

Второй путь — любым способом распределить насос по всей камере пучка (рис. 50 справа). «Распределенный насос» может



быть реализован как криогенный (вся камера охлаждается и сорбирует) или как магнитоэрозивный — в этом случае можно использовать для работы насосов собственное магнитное поле ускорителя (поле, которое действует на заряженную частицу силой Лоренца и заставляет ее двигаться по кругу). Попутно решается еще одна проблема: поскольку насосы не имеют своих магнитов, можно не опасаться влияния их поля на пучок. Вакуумные системы крупных ускорителей содержат тысячи уплотнений и вводов, сотни насосов, вентиляей, вакуумметров и управляются, конечно, с помощью ЭВМ.

Встречается в ускорителях и неустойчивость. При прохождении пучка протонов через недостаточно хороший вакуум образуются ионы, которые отталкиваются от пучка электростатическими силами, бомбардируют стенку, вызывают стимулированное газовыделение, и вакуум ухудшается. При ухудшении вакуума количество образующихся ионов увеличивается и т. д. При определенном значении тока пучка давление остаточного газа резко (лавинно) нарастает и пучок разрушается.

Хотя вакуумные проблемы ускорителей оказались сложными, они так или иначе решаются. А вот вакуумные проблемы токамака пока не решены. Качественное отличие вакуумных установок токамака и вообще установок для исследования плазмы состоит в огромных потоках откачиваемых из объемов газов. Действительно, плазма — это ионизированный газ, который надо откачивать. А это равносильно тому, что надо получать вакуум в установке, в стенке которой просверлено отверстие. Следствие — в крупном токамаке с общей скоростью откачки насосов в десятки тысяч  $\text{м}^3/\text{с}$  (это больше, чем в имитаторах, и значительно больше, чем в ускорителях) достигается вакуум на много порядков хуже, чем в ускорителях.

Газы, которые приходится откачивать из токамаков, — это  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$  (дейтерий),  $\text{T}_2$  (тритий),  $\text{He}$  и  $\text{Ar}$ . Основные виды насосов — криогенные, турбомолекулярные, магнитоэрозивные и сублимационные (с испарением титана) в разных сочетаниях. Может быть, будут применяться и насосы, использующие явление сверхгазопроницаемости. Общая мощность, потребляемая насосами крупного токамака, составляет несколько мегаватт. Токамак должен работать импульсами, длительность рабочего цикла будет составлять несколько десятков секунд, а в промежутке между ними (несколько минут) камера должна откачиваться до вакуума  $1-0,1$  Па по газам, перечисленным выше. Но насосы все равно должны быть «высоковакуумными», так как остальных, примесных газов (продуктов

натекания и газовыделения), должно быть меньше, чем в большинстве высоковакуумных систем.

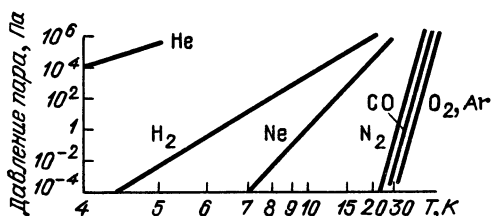
Предъявление таких требований открывает новую страницу в вакуумной технике.

## 2. Морозные узоры

При создании вакуумных систем тех установок, о которых говорилось в предыдущем разделе, оказались эффективны криогенные насосы, иначе называемые криосорбционными. Работа их основана на явлении сорбции молекул газа на холодной стенке.

На рис. 51 показана зависимость давления насыщенного пара некоторых газов от температуры. Видно, что охлаждая стенки

Рис. 51. Давление насыщенного пара разных элементов (указаны на кривых) при низких температурах как функция температуры



вакуумного объема жидким водородом (20,4 К), из него можно откачать все газы, кроме He, H<sub>2</sub> и Ne. Много Ne в вакуумных установках обычно не бывает, а вот откачка He и H<sub>2</sub> — это серьезная проблема. Для ее решения есть эффективный метод — сорбция на высокопористых сорбентах (веществах, предназначенных для сорбции остаточных газов). Ближайшая аналогия — активированный уголь из коробки противогаза. На пористых сорбентах, охлажденных до 78 К (жидкий азот), сорбируются все газы, кроме тех же He, H<sub>2</sub> и Ne, но ведь жидкий азот получить много проще, чем жидкий водород. А при 20,4 К на пористых сорбентах сорбируются и эти газы. Недостатком пористых сорбентов является низкая теплопроводность. Дело в том, что при сорбции выделяется тепло, из-за плохой теплопроводности сорбент не успевает охлаждаться, а при нагреве сорбция ухудшается. Но этот недостаток преодолевают, располагая сорбент тонким слоем на хорошо охлаждаемых металлических поверхностях.

Если на поверхности сорбированы одни атомы, а в вакуумном объеме появились другие, новички начнут заменять предшественников. Не следует понимать этот процесс как непосредственную замену. Сорбция-десорбция — процесс динамический: атомы иногда освобождают свои места, чтобы попу-

тешествовать в объеме и постучаться о стенки. Улучив этот момент, на поверхность оседают новички, чтобы через какое-то время тоже освободить насиженные места.

Сорбция приносит не только пользу (в насосах), но и вред — влияет на измерение вакуума. Если прибор, измеряющий вакуум, соединен с вакуумной системой трубкой, то газ из системы будет проникать в него с большим трудом. Казалось бы, при скорости молекул в сотни метров в секунду этого не должно быть, но вероятность прямого пролета через прямую трубку невелика, через изогнутую вовсе равна нулю, а при попадании на стенку газ может сорбироваться, особенно если трубка холодная и чистая. Показания прибора в этом случае будут искажены.

При работе с насосами, в которых газ конденсируется на холодной поверхности и замерзает, было обнаружено, что они откачивают газы, которые при данной температуре конденсироваться не должны. Оказалось, что уже намерзшие слои одних газов вполне эффективно могут сорбировать другие. На рис. 52 показано, какое количество молей He, Ne и  $H_2$  может

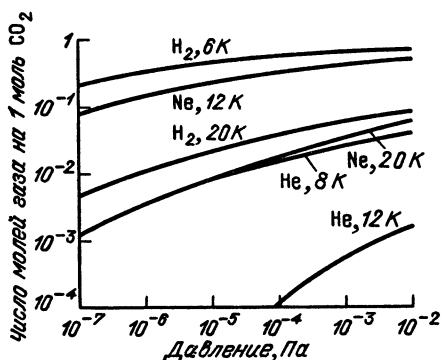


Рис. 52. Криосорбция слоем сконденсированного  $CO_2$  разных газов как функция их давления. Газ и температура указаны на кривых

сорбировать моль  $CO_2$ , сконденсированный на стенке вакуумной камеры, при различных температурах и в зависимости от давления. Видно, что на слое  $CO_2$  при температуре жидкого водорода, в отличие от простой конденсации, сорбция  $H_2$  эффективна. Одна из причин этого эффекта — пористость, рыхлость осадков сконденсированного газа. Называется этот эффект «криозахватом».

Обратимся к рис. 52. Кривые на этом рисунке называются «изотермы сорбции» — это зависимости количества сорбированного газа от его давления при постоянной температуре. Например, активированный уголь при температуре 78 K и дав-

лениях  $10^{-8}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-2}$  Па поглощает соответственно  $10^{-2}$ ,  $10^2$ ,  $2 \cdot 10^2$ ,  $3 \cdot 10^2$  м<sup>3</sup> · Па/кг азота или других газов (кроме He, Ne, H<sub>2</sub>). Видно, что при малых давлениях количество сорбированного вещества пропорционально давлению, а при больших давлениях рост замедляется. Почему изотермы сорбции имеют такой вид? Количество сорбируемых в единицу времени атомов равно вероятности сорбции, умноженной на количество атомов (молекул), ударяющихся о стенку в единицу времени, и умноженной на долю свободной от сорбированных атомов поверхности. Это произведение пропорционально  $P(1 - \theta)$ , где  $P$  — давление,  $\theta$  — доля покрытой поверхности. Количество десорбирующихся в единицу времени атомов пропорционально  $\theta$ . При равновесии эти потоки равны:  $P(1 - \theta) = C\theta$ , где  $C$  — постоянная. Отсюда  $\theta = P/(P + C)$ ; при малых  $P$  сорбированное количество  $\theta$  пропорционально  $P$ , а при больших  $P$  рост  $\theta$  действительно замедляется.

На самом же деле все гораздо сложнее. Например, энергия сорбции зависит от  $\theta$ , поэтому скорость десорбции не пропорциональна  $\theta$ , а растет быстрее — когда сорбированных атомов много, они слабее держатся на поверхности. Кроме того, при некоторых условиях может сорбироваться больше, чем один монослой (т. е. возможно  $\theta > 1$ ). Поэтому существует много разных математических выражений для изотермы сорбции, с разной точностью описывающей поведение разных газов в разных условиях. Выражение, которое мы получили, — простейшее.

### 3. Сладко ли живется «первой стенке»?

Чтобы сразу стало ясно, о сколь серьезных вещах мы собрались говорить, укажем, что «проблема первой стенки» есть часть проблемы токамака или управляемой термоядерной реакции. Первая стенка — это то, что отделяет плазму от всего остального, и она принимает на себя поток нейтронов, протонов, атомов и ионов гелия и трития и электромагнитное излучение плазмы.

Капле на раскаленной сковороде, наверное, живется много слаще... Требования, предъявленные к материалу первой стенки токамака, открыли новую страницу в материаловедении. Записи на этой странице лишь начаты.

Поэтому пока ограничимся перечнем основных процессов, происходящих при таких воздействиях. Во-первых, распыление потоками ионов. Во-вторых, распыление под действием потоков нейтронов. В-третьих, при нейтронной бомбардировке из поверхности стенки вылетают «куски» примерно по  $10^{12}$  ато-

мов ( $10 \text{ мкм}^3$ ), так называемые «чанги». В-четвертых, вколотые в материал атомы гелия и водорода собираются в пузырь, и в результате материал «распухает» — этот процесс называется «свеллинг». Если пузырь образуется близко к поверхности, она вспучивается — этот процесс называется «блистеринг». В-пятых, шелушение поверхности — верхняя корка на этом пузыре отваливается; этот процесс называется «флекинг»<sup>\*)</sup>. Получающаяся в результате блистеринга пористая, губчатая поверхность тормозит флекинг, и после разрушения материала на некоторую глубину процесс замедляется. Предложено и целенаправленное применение этого эффекта — использование поверхности с губчатой, игольчатой (щетка) и сотовой структурой. В последнем случае замедляется и распыление, так как часть материала перепыляется со стенки на стенку, не вылетая в объем (рис. 53). И, наконец, в-шестых, радиационная сегрегация — под действием облучения ионами меняется состав

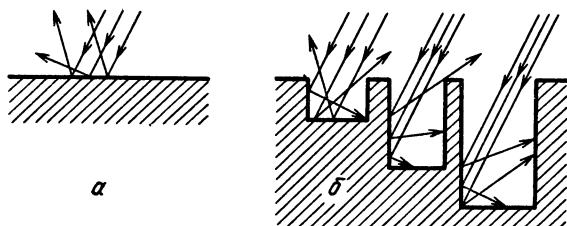


Рис. 53. Схема одного из методов борьбы с распылением: а — гладкая поверхность; б — сотовая (эффективно применение ямок с глубиной, большей, чем их ширина)

сплавов, т. е. облучение вызывает диффузию. Так, если на квадратный сантиметр сплава NiCrWMo обрушить дозу  $5 \cdot 10^{20}$  ионов  $\text{H}^+$  с энергией 10 кэВ каждый, то поверхностный слой на глубине 1 мкм уже не будет содержать W и Mo, которые уйдут в более глубокие слои. Ни про один из этих процессов нельзя сказать, что он достаточно изучен и понят. Рассмотрим наиболее изученный из них — ионное распыление.

#### 4. Во что превращает поверхность пучок ионов?

Ионное распыление, или, как его иногда называют по традиции, катодное распыление, известно не только тем, что оно разрушает первую стенку токамака. Это распыле-

<sup>\*)</sup> Английские слова chunk, blister, swelling, fleck означают соответственно «кусочек», «пузырь», «разбухание», «пятно».

ние сказывается на работе многих электронных приборов. Оно также может применяться во многих технологических процессах. Катодным оно называется потому, что впервые наблюдалось на катоде в газовом разряде.

Какие основные экспериментальные факты известны о катодном распылении? Коэффициент распыления (отношение количества распыленных атомов к числу попавших на поверхность ионов) увеличивается с увеличением массы иона и с уменьшением энергии испарения (энергии, необходимой для испарения атома) материала мишени. С увеличением энергии падающих ионов до энергий порядка 10 кэВ коэффициент распыления сначала растет, потом начинает убывать. Примеры экспериментальных данных показаны на рис. 54. Однако строгой теории катодного распыления, которая могла бы надежно предсказать экспериментальные данные до их получения, нет. Впрочем, для физики поверхности эта ситуация не нова.

Многочисленные существующие теории катодного распыления можно разбить на две группы: тепловые и механические. Тепловые объясняют распыление нагревом поверхности в месте удара иона и испарением; механические — столкновением иона с атомами мишени, в результате которого атомы мишени (соударяясь и друг с другом) получают импульс, направленный к поверхности мишени, и вылетают в вакуум. Механические теории отличаются одна от другой гипотезами о конкретном механизме взаимодействия иона с атомами и дают разные результаты, согласующиеся с теми или иными экспериментальными данными. Понятно, почему при больших энергиях коэффициент распыления уменьшается — падающий ион слишком глубоко забирается в глубь материала и выбитые им со своих мест атомы не добираются до поверхности. Понятно, почему коэффициент распыления мал при малых энергиях. Но гораздо большее количество фактов непонятно или понятно не совсем.

Например, при ионной бомбардировке на поверхности может появиться рельеф, причем довольно сложный. А возможна и полировка, сглаживание поверхности при бомбар-

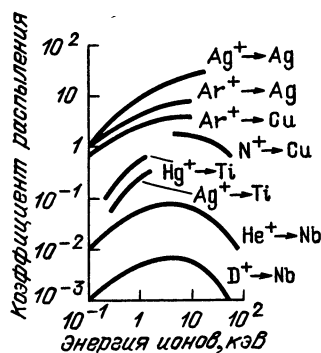


Рис. 54. Зависимость коэффициентов катодного распыления от энергии ионов. Вид иона и мишени указан на кривых

дировке ионами малых энергий. Это связано; видимо, с тем, что атомы, находящиеся на выступах, имеют меньшую энергию связи (их нужно оторвать от меньшего количества атомов), и поэтому можно так выбрать энергию ионов, что эти атомы будут распыляться сильно, а остальные — слабо.

При высокой плотности потока ионов, бомбардирующих электрод, концентрация внедренных в него атомов и возникших в нем дефектов решетки достигают таких значений, что полностью разрушается кристаллическая решетка и материал переходит в аморфное состояние. При этом исчезает четко выраженная температура плавления (действительно, при какой температуре плавится стекло?), и эта непонятная смесь металла и газа начинает ползти, оплывать, как свеча, под действием силы тяжести. Этот эффект обнаружен несколько лет назад\*).

Рассмотрим подробнее, как меняется геометрия поверхности при катодном распылении. Была гладкая — стала вся в иголках, как еж, или в бороздах, как картофельное поле. Или наоборот — была шероховатая, стала гладкая. Как возникает рельеф? Рассмотрим сначала вторую половину этого вопроса. Пусть рельеф уже существует. Будет он при бомбардировке сглаживаться или не будет? Чем характеризуется рельеф? Прежде всего углом наклона. Но склон, крутой для туриста, любующегося горой из автобуса, будет средним для горнолыжника или пологим для альпиниста. А для физика это все 30 градусов. Для того чтобы рельеф при распылении изменялся, коэффициент распыления должен зависеть от угла падения ионов на мишень. А зависит ли коэффициент распыления от угла падения?.. Мы в очередной раз превратили один вопрос в другой, но в науке эта цепочка бывает и длиннее. Важно, кончается ли она ответом.

Если ион падает на поверхность перпендикулярно, то он внедрится на большую глубину, чем ион, падающий под углом. Следовательно, атомы, которые получают импульс от касательно падающего иона, будут находиться на меньшей глубине, и вероятность их вылета в вакуум должна быть больше, т. е. коэффициент распыления должен расти с увеличением угла падения ионов. Однако коэффициент распыления уменьшается при почти касательном падении ионов на поверхность (рис. 55). Но ведь и камешек будет прыгать по воде, если его кинуть по касательной...

---

\*) Бабад-Захряпин А. А., Савватимов И. Б. Псевдоплавление молибдена при обработке его ионами тлеющего разряда. — Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, № 9, с. 80—81.

Рассмотрим участок поверхности, имеющий области с тремя наклонами (рис. 56). Профиль, получающийся после распыления, показан пунктиром. На участке с наклоном  $\theta = \theta_m$  распыление, согласно рис. 56, максимально. Мы видим, что зона с этим наклоном «съедает» соседей. Поэтому в самом

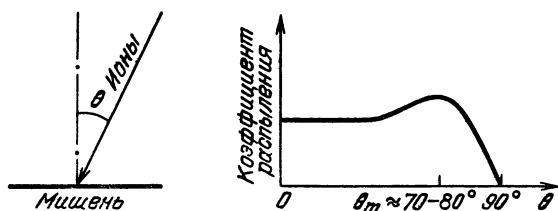


Рис. 55. Зависимость коэффициента распыления твердого тела от угла падения ионов ( $\theta_m \approx 70 - 80^\circ$ )

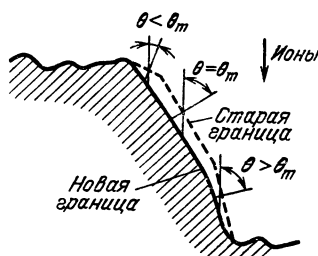


Рис. 56. Распыление неровной поверхности

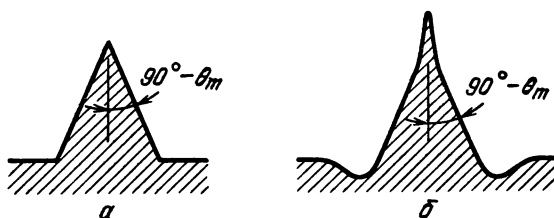


Рис. 57. Идеальная (а) и реальная (б) форма конусов при распылении

грубом приближении поверхность должна заполняться бороздами или конусами с углом наклона  $\theta_m$  (рис. 57). Но иногда эти конусы имеют еще ямочки у основания и «шпиль» наверху...

Все это относится к преобразованию уже имеющегося рельефа, а откуда он берется? Во-первых, шероховатость поверхности может быть следствием механической обработки



поверхности (шлифовки, точения и т. д.); во-вторых, она может возникнуть, если коэффициенты распыления поверхности в разных ее местах различны из-за различий в составе или структуре поверхности, и, наконец, атомы на углах держатся слабее и, следовательно, распыляются легче.

Добавим, что при касательном падении пучка ионов малой энергии, такой, что распыление только-только становится заметно, шероховатость, оставшаяся на поверхности после механической обработки, сглаживается.

Но то, что происходит при катодном распылении многокомпонентных соединений, устроено еще сложнее. Можно еще догадаться, почему примесь одного металла к другому иногда вызывает образование рельефа при распылении: слабо распыляющаяся (а по некоторым теориям — тугоплавкая) примесь, если ее атомы сосредоточены на каких-то участках, защищает от распыления находящийся под ней материал. Но почему добавка нескольких процентов висмута к меди увеличивает коэффициент распыления наполовину? Почему добавление нескольких процентов алюминия к золоту снижает распыление в десять раз? Для распыления сплавов существует несколько теорий и иногда то одна из них, то другая способны правильно предсказать результаты отдельных экспериментов...

## 5. Чем откачивать установку размером с дом?

Наиболее часто при откачке крупных установок применяются два типа насосов — турбомолекулярные и криосорбционные. Применяются они все чаще и чаще и в установках других классов. Происходит это по мере того, как их конструкция и технология совершенствуются, стоимость уменьшается, а надежность и доступность увеличиваются.

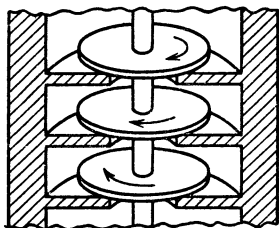


Рис. 58. Схема турбомолекулярного насоса. Статор разрезан вдоль оси. Пластины условно показаны целыми

Турбомолекулярный насос состоит из ротора и статора. На роторе и статоре есть пластины, и они чередуются (рис. 58). Когда насос работает, роторные пластины вращаются, статорные стоят. Впрочем, насос, показанный на рис. 58, качать не будет — он абсолютно симметричен, и непонятно, где у него вход, а где выход. На самом же деле пластины, конечно, не целые, а с прорезами (рис. 59). Прорезы косые, а сама пластина похожа на лопатку турбины.

Впрочем, аналогия неполная — в газе как бы нет отдельных молекул, он взаимодействует с лопастями турбины как целое, как «среда», а вакуум состоит из молекул, взаимодействующих с пластинами индивидуально. Столкнувшись с роторной пластиной, молекула приобретает скорость, направленную вправо (рис. 60).



Рис. 59. Вид на пластины турбомолекулярного насоса (разрез вдоль оси насоса). Стрелка — направление движения роторных пластин

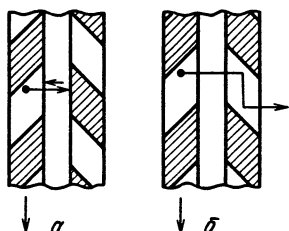


Рис. 60. Движение молекулы в турбомолекулярном насосе

Попав в статорную пластину, молекула либо отразится (вариант а), либо, не потеряв скорости, пройдет сквозь пластину (вариант б), а на выходе попадет в следующую роторную пластину. Отразившись (а), она либо отразится и от плоской части роторной пластины и опять же полетит вправо, или попадет в прорезь роторной пластины и после соударения опять-таки полетит вправо (хотя и не вдоль оси). На самом деле все происходит, как всегда, немного сложнее, но суть дела именно такова. Медленные молекулы, независимо от направления исходной их скорости, ведут себя примерно так же, как и покоящиеся. Быстрые имеют шансы пробиться против общего потока. Но шансы эти невелики, а ведь в насосе не одна пара пластин, а десятки.

Обратный поток насоса состоит из молекул, пробравшихся в обратном направлении с выхода насоса, и газа, десорбированного с его стенок. Этот поток можно было бы уменьшить, увеличив скорость движения лопаток, но совершенствование насосов сдерживается и прочностью материала — ведь скорость лопаток сравнима со скоростью сверхзвукового самолета.

Работа насоса, очевидно, тем эффективнее, чем больше скорость движения пластин и чем меньше зазор между ними. Поэтому, хотя принцип действия турбомолекулярного насоса

известен давно, он начал широко применяться лишь в последнее десятилетие. Потребность в нем была и раньше, просто механика не доросла до уровня обеспечения необходимой точности изготовления. Вспомним, что в первой паровой машине можно было между цилиндром и поршнем просунуть палец.

Параметры насоса существенно зависят от угла наклона лопаток — обратный поток тем меньше, чем меньше угол между лопатками и плоскостью пластины, но скорость откачки при этом убывает. Чтобы убедиться в этом, представьте себе работу насоса с углом наклона, близким к нулю. Обычно турбомолекулярные насосы делают так: во входной части лопатки имеют наклон 35%, а в выходной части — 20%. В целом насос оказывается и с высокой скоростью откачки и с малым обратным потоком. Можно считать, что такой насос — это два насоса, соединенных последовательно.

Второй тип насосов, получивших значительное распространение в последнее время, — это криосорбционные. В этих насосах газ «примораживается» к холодной стенке. Количество газа, которое можно так откачать, ограничено. Слой смерзшегося газа плохо проводит тепло, и температура поверхности по мере роста слоя «снега» начинает расти. Поэтому время работы такого насоса ограничено, но для насосов разных типов оно составляет от нескольких часов до сотен тысяч часов и является одним из основных параметров насосов. По истечении этого времени насос должен очищаться. По некоторым параметрам эти насосы близки к идеальным — например, они не вводят в систему никаких новых газов и паров. Скорость откачки таких насосов около  $10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с для каждого квадратного сантиметра сорбирующей поверхности, если она обращена прямо в вакуум. К сожалению, охлаждаемые (сорбирующие) поверхности этих насосов приходится защищать со стороны вакуумной камеры экранами, иначе тепловое излучение (особенно если в камере есть источники энергии) недопустимо нагреет сорбент или слой сконденсированного газа. И еще недостаток — этим насосам (как, впрочем, и почти всем другим) свойственна значительная селективность, т. е. одни газы откачиваются хорошо, другие плохо (например, инертные газы).

Любопытно провести сравнение различных насосов по энергопотреблению. Дело в том, что энергопотребление растет с увеличением скорости откачки, и в крупных современных установках, в которых общая скорость откачки достигает  $10^4$  м<sup>3</sup>/с, вопрос энергопотребления стоит достаточно остро. На рис. 61 дано сравнение различных типов насосов по энергопотреблению.

Конечно, это не главный параметр насосов, но и забывать о нем в наше время не следует.

Лампочки в люстре включены параллельно, рубашка и куртка защищают человека от холода последовательно. Имеет ли смысл соединять последовательно и параллельно

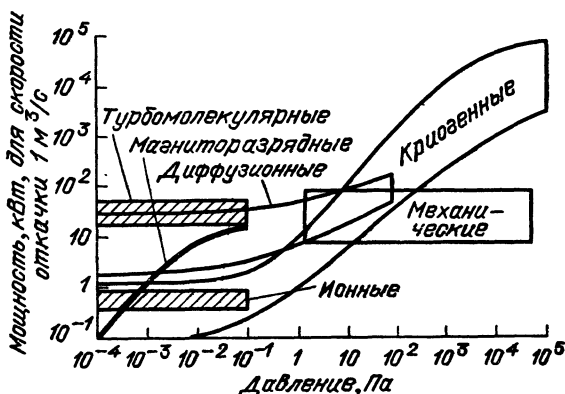


Рис. 61. Потребление энергии различными насосами в зависимости от давления воздуха

вакуумные насосы? Параллельное соединение применяется, например, если насосам свойственна значительная селективность. Например, крионасосы дополняют часто небольшим диффузионным, который откачивает плохо конденсирующиеся газы. Но вот, например, дополнять магниторазрядный насос диффузионным не следует — пары масла, попадая в магниторазрядный насос, сильно мешают его работе (масло при электронной бомбардировке полимеризуется на стенках насоса, а образование таких пленок приводит к вакуумному пробую). Между прочим, размещение в лампе двух нераспыляемых геттеров при разных температурах — это, по существу, тоже два насоса, работающих параллельно.

Какой самый высокий вакуум можно получить? Если газо-выделение и натекание малы, то сорбцией на охлажденных чистых стенках вакуумной камеры можно получить очень и очень высокий вакуум. Так, при охлаждении лишь до 30 К достигнут предельный вакуум, измеряемый обычными вакуумметрами, —  $10^{-12}$  Па. При этом концентрация молекул в вакууме составляет  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ . При охлаждении до температуры жидкого гелия давление должно было бы составлять  $10^{-31}$  Па \*),

\*) Давление насыщенного пара уменьшается с уменьшением температуры экспоненциально, а скорость уменьшения устанавливается по той области температур, в которой давление пара может быть измерено.

но ни измерить, ни представить себе наглядно, что это такое, невозможно. Действительно, что такое плотность молекул  $3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-3}$ ? Это значит, что через камеру в виде куба со стороной 1 м пролетает одна молекула раз в 3 года. Это можно с чистой совестью назвать сверхпустотой, ибо даже в межгалактическом пространстве пустота менее «пустая», так как давление в ней составляет  $10^{-27} \text{ Па}$ . А в межзвездном пространстве внутри галактики вакуум «совсем плохой» — всего  $10^{-15} \text{ Па}$ .

## 6. Когда вакуум нельзя характеризовать концентрацией

Измерение вакуума в установках, о которых шла речь в этой главе, имеет свои особенности.

Для начала вспомним о градуировке вакуумметров. Концентрация  $n$  и давление  $P$  связаны формулой  $P = nkT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура. Уточним, что такое  $T$ . Это температура газа, а в вакуумной системе — это температура стенок. Энергия молекул определяется температурой стенок потому, что при многократных соударениях энергия молекул уравнивается с энергией молекул стенки. А если в вакуумной системе есть ионизационный вакуумметр с накалимым катодом? Тогда молекулы, которые летят от катода, имеют совсем другую энергию. Но катод маленький, молекул таких мало и эффект незаметен. А если в системе имеется большой криогенный насос? Получается, что часть стенок имеет одну температуру, а часть — другую. Средняя температура молекул газа получается заметно ниже, чем  $20^\circ\text{C}$ , и вакуумметр, измеряющий на самом деле не давление, а концентрацию, показывает неправильное давление. Ничего плохого в этом нет, давление само по себе ничего не значит, надо только помнить, что желая определить в такой системе концентрацию молекул по давлению, надо пользоваться не средней температурой стенок, а по-прежнему  $20^\circ\text{C}$ . Ибо при этой температуре калиброван вакуумметр. Но ситуация на самом деле сложнее.

Предположим, что газ поступает (рис. 62) с левой стенки и в основном сорбируется на правой. В камеру помещены четыре вакуумметра — три в корпусах, отверстия которых обращены в разные стороны ( $a$ ,  $b$ ,  $в$ ), четвертый — бескорпусный ( $г$ ). Он и покажет концентрацию молекул. Но открытый вакуумметр применить можно не всегда, а вакуумметры в корпусах будут давать разные показания. Вакуумметр  $a$  покажет больше (каждую из 4-х молекул, влетающих слева, он зарегистрирует дважды, ибо она и влетит, и вылетит); вакуумметр  $в$  покажет

меньше; вакуумметр *б* покажет... трудно сказать, что он покажет. Может быть, то же, что вакуумметр *г* — открытый.

Чтобы в таких системах вакуумметр в корпусе показывал правильно, применяют так называемые «хаотизаторы» — корпус с большим количеством отверстий, одинаково впускаю-

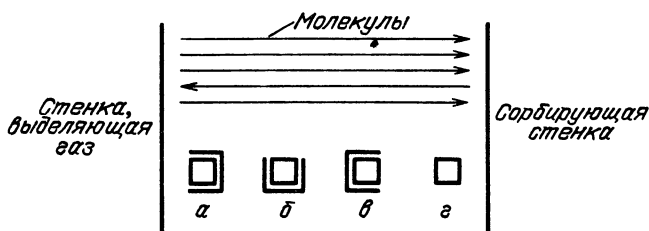


Рис. 62. Схема вакуумной системы с направленным (нехаотическим) движением молекул: 80 % молекул движутся слева направо (если левая стенка горячей). Квадратик — вакуумметр, экранированный с трех сторон в случаях *а*, *б*, *в*

щих молекулы со всех сторон. Однако вакуумметры в корпусах с отверстием с одной стороны позволяют измерять газовыделение с отдельных объектов в вакуумной камере; например, показания вакуумметра *а* на рис. 62 зависят от газового потока, идущего от левой стенки, а вакуумметра *б* — от правой. Заметим, что от левой стенки идет не только поток газовыделения, но и отраженные молекулы, пришедшие справа. Если расположить вакуумметр *а* близко к левой стенке, то он экранирует ее от потока, идущего справа, и будет показывать только собственное газовыделение стенки.

Вакуумная метрология — область, которая еще недавно казалась в значительной мере устоявшейся. Однако сейчас, и в основном в результате появления электрофизических установок с нехаотическим распределением молекул, со всякого рода излучениями и полями, с необходимостью измерения потоков, идущих от отдельных элементов системы, и с другими сложностями, вакуумная метрология увидела перед собой большие, интересные и, в том числе, не решенные пока еще задачи. Некоторые из них, может быть, дождутся и Вас, Читатель. Может быть, к тому времени возникнут и новые задачи. Они должны быть труднее, и, следовательно, интереснее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В начале этой книги было указано место физики и техники вакуума среди окружающей ее остальной физики и техники. Человеку вообще свойствен интерес к окружающему миру. Биологи, например, утверждают, что не интересуйся человек миром, он мог бы и не выжить.

Интерес к окружающему миру живуч, и даже те, кто занимается вакуумом и только вакуумом, иногда с гордостью окидывают взглядом технику и науку «в целом». Где только не применяется вакуум! Везде. Ко всем областям техники он предъявляет свои требования — требования новых материалов, новых конструкций, новых приборов и всем он дает: дает возможность вести новые процессы, получать новые материалы и приборы. Вакуум дал людям почти все, что известно об элементарных частицах и почти все, что известно о поверхности твердого тела. И даст, наверное, еще много нужного и интересного.

Итак, наша с Вами, Читатель, совместная работа закончена. Совместная — я написал, Вы прочитали. Не будем выяснять, кто при этом работал больше. Но если эта книга — не последняя книга по физике и технике, которую Вы прочитали, то над другими Вам придется работать больше. Надеюсь также, что Вам не было скучно. Мне же работу над книгой во многом делало интересным сотрудничество с людьми, принявшими участие в этой работе, — теми, кто читал, критиковал, печатал, рисовал, правил стиль, орфографию и пунктуацию, теми, кто упомянут самым мелким шрифтом на самой последней странице. Но прежде всего — с Л. Г. Асламазовым, тактично и непреклонно придавшим книге общее направление, и А. В. Митрофановым, отредактировавшим рукопись и сделавшим много полезных замечаний.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>Введение. ЧТО ТАКОЕ ВАКУУМ И НЕМНОГО ИСТОРИИ</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ НЕБОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ С НЕВЫСОКИМ ВАКУУМОМ</b>	<b>6</b>
1. Долго ли можно бежать в лесу по прямой? (6). 2. Химически самая инертная среда (8). 3. Хороша ли шуба из вакуума? (10). 4. На какой высоте надо летать спутнику? (14). 5. Механический насос (15). 6. Пар откачивает газ (17). 7. Немного о метрологии (20). 8. Что и как измеряют в вакууме (23).	
<b>Глава 2. ВРЕМЯ ИДЕТ, ОБЪЕМ РАСТЕТ</b>	<b>29</b>
1. Вакуумная техника для технологий (29). 2. В чем содержать вакуум? (32). 3. «Быстрорастворимый» водород и другие (35). 4. «Конструктор» — не детский, а вакуумный (41).	
<b>Глава 3. ВСЕ ВЫШЕ И ВЫШЕ</b>	<b>48</b>
1. Зачем потребовался высокий вакуум (48). 2. Газ проходит сквозь стену (51). 3. Газ на поверхности (53). 4. Белье сохнет на морозе, металл испаряется в вакууме (55). 5. Не простое испарение, а стимулированное (57). 6. Как откачивать лампы? (60). 7. Как откачивать без насоса? (62). 8. Специфика измерения высокого вакуума (65). 9. Что же есть в вакууме? (68). 10. Как найти течь? (71).	
<b>Глава 4. ЧТО ПРОИСХОДИТ НА ПОВЕРХНОСТИ</b>	<b>73</b>
1. Если присмотреться повнимательнее... (73). 2. Атомы «ползут» по поверхности (74). 3. Гость на чужой поверхности (76). 4. Как с вискера начинается вакуумный пробой (78). 5. Неустойчивость — инициатор процессов (83). 6. На пороге новой науки (86). 7. Начнем с нагрева поверхности (90). 8. Приложим электрическое поле... (92). 9. Наконец, осветим поверхность (95). 10. Ионное распыление — «кисточка археолога» (99). 11. «Электронный прожектор» освещает объект (103).	
<b>Глава 5. БОЛЬШИЕ И ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ</b>	<b>109</b>
1. Вакуумные инструменты большой науки (109). 2. Морозные узоры (113). 3. Сладко ли живется «первой стенке»? (115). 4. Во что превращает поверхность пучок ионов? (116). 5. Чем откачивать установку размером с дом? (120). 6. Когда вакуум нельзя характеризовать концентрацией (124).	
<b>Заключение</b>	<b>126</b>



*Леонид Александрович Ашкинази*

## **ВАКУУМ ДЛЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ**

---

Серия «Библиотечка «Квант», вып. 58.

Редактор *Л. А. Панюшкина*  
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*  
Технический редактор *Е. В. Морозова*  
Корректоры *Т. С. Родионова, Н. Д. Храпко*

ИБ № 12981

Сдано в набор 22.07.86. Подписано к печати 22.12.86. Т-23988. Формат 84 × 108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 6,72. Усл. кр.-отт. 7,14. Уч.-изд. л. 7,81. Тираж 104 500 экз. Заказ № 497. Цена 25 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука».  
Главная редакция физико-математической литературы.  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.

**25 коп.**

---