

Таблица 7

Газ	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, 10^{-6} \text{ г}/(\text{см}\cdot\text{с})$	$K, 10^{-6} \text{ кал}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C})$	$d, 10^{-8} \text{ м}$	
				по формуле (11.42)	по формуле (11.43)
Водород	0	86,7	39,6	1,64	2,21
Кислород	0	189	5,70	2,13	2,98
Азот	0	166	5,66	2,23	3,08
Гелий	0	189	33,6	1,16	1,79
Углекислый газ	0	142	3,37	2,79	3,80

10. В заключение приведем сводную таблицу явлений переноса.

Таблица 8

Явление	Переносимая физическая величина	Уравнение переноса	Формула для коэффициента переноса
Диффузия	Масса	$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dSdt$	$D = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$
Внутреннее трение	Импульс	$dF = -\eta \frac{dv}{dn} dS$	$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$
Теплопроводность	Энергия	$dQ = -K \frac{dT}{dx} dSdt$	$K = \frac{1}{3} \rho c_V \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$

§ 11.9. Понятие о свойствах разреженных газов

1. Газы, плотность которых настолько мала, что средняя длина свободного пробега молекул соизмерима с линейными размерами сосуда, называют **разреженными**. В сильно разреженных газах соударения между молекулами происходят очень редко. Они пролетают от одной стенки сосуда к другой практически без столкновений друг с другом так, что средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ целиком определяется формой и размерами сосуда, т. е. не зависит ни от плотности газа, ни от размеров его молекул.

2. К разреженным газам неприменима изложения в предыдущем параграфе теория явлений переноса, так как она основана на предположении о том, что $\langle \lambda \rangle$ во много раз меньше линейных размеров сосуда. Уменьшение плотности разреженного газа, не вызывая изменения $\langle \lambda \rangle$, приводит к соответствующей убыли числа молекул, участвующих в процессе переноса импульса или внутренней энергии. Поэтому коэффициенты внутреннего трения и теплопроводности такого газа прямо пропорциональны его плотности. Полезно отметить, что в достаточно сильно разреженных газах внутреннее трение по существу отсутствует, уступая место внешнему трению движущегося газа о стенки сосуда. Это связано с тем, что изменение импульса молекул происходит только в результате их взаимодействия со стенками. Ве-

личина силы трения, действующей на единицу площади стенки, в первом приближении пропорциональна скорости движения газа и его плотности (сравните с уравнением 11.31).

Отсутствие соударений между молекулами разреженного газа приводит также к изменению закономерностей процесса теплопроводности. Свободно перемещаясь от одной стенки сосуда к другой, молекулы газа осуществляют непосредственный обмен энергией между стенками, имеющими температуры T_1 и T_2 . Количество энергии, отданной (или

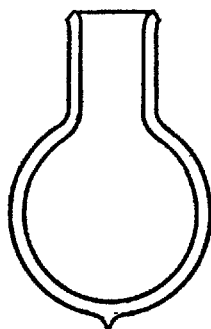


Рис. 11.15.

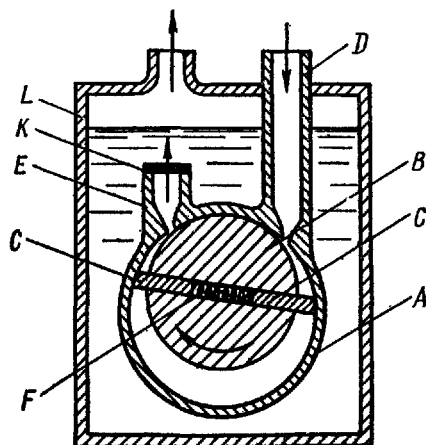


Рис. 11.16.

полученной) в форме теплоты единицей площади поверхности стенки за единицу времени, пропорционально разности температур и плотности газа (сравните с уравнением 11.32).

Эти особенности процесса переноса в разреженных газах используются на практике для создания надежной тепловой изоляции. Так, например, для уменьшения теплообмена между телом и окружающей средой тело помещают в сосуд Дьюара. Сосуд Дьюара (рис. 11.15) имеет двойные стенки. Между стенками находится сильно разреженный воздух, теплопроводность которого весьма мала.

3. Для получения различных степеней разрежения применяют специальные устройства — насосы, создающие предварительное разрежение (форвакуум) до 10^{-3} мм рт. ст. и различные вакуумные насосы, позволяющие получить весьма малые давления до 10^{-7} — 10^{-9} мм рт. ст.

Принцип действия форвакуумного насоса может быть пояснен на примере ротационного насоса (рис. 11.16). Внутри цилиндрической полости корпуса насоса *A* находится эксцентрично расположенный ротор *B*. В прорезь ротора вставлены две подвижные пластины *C*, которые под действием находящейся между ними пружины *F*, плотно прижимаются к внутренней поверхности корпуса насоса *A*. При вращении

ротора по часовой стрелке воздух засасывается из сосуда, соединенного с патрубком *D*, и выбрасывается через патрубок *E* и клапан *K*. Для обеспечения герметичности боковые поверхности пластин *C* шлифованы к поверхности прорези в роторе, а концы пластин — к внутренней поверхности корпуса *A*. Дополнительное уплотнение и смазка трущихся частей осуществляется маслом, залитым во внешний кожух насоса *L*.

Для получения высокого вакуума до 10^{-7} мм рт. ст. применяют диффузионные ртутные или масляные насосы. Эти насосы основаны

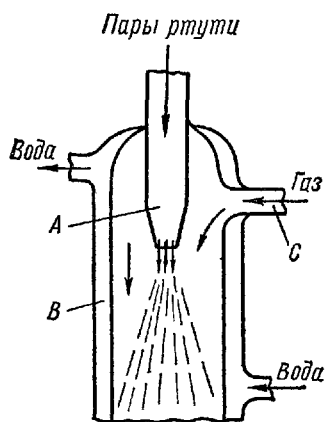


Рис. 11.17.

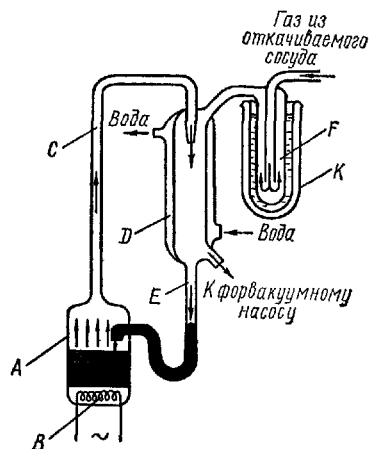


Рис. 11.18.

на следующем принципе. Струя паров ртути или масла, вытекающая из сопла *A* (рис. 11.17), попадает в сосуд *B*, стенки которого охлаждаются проточной водой. При этом пары конденсируются и образующиеся капли ртути или масла стекают вниз, увлекая за собой молекулы газа, находящиеся ниже сопла *A*. Давление газа вблизи сопла понижается и через трубку *C* подсасывается новая порция молекул газа из откачиваемого сосуда. Удаление газа из сосуда *B* производится форвакуумным насосом.

На рис. 11.18 изображена принципиальная схема диффузионного ртутного насоса Ленгмюра. Ртуть, находящаяся в сосуде *A*, нагревается электрической печью *B* до температуры $300-350^{\circ}\text{C}$. Образующиеся при этом пары поступают по трубке *C* в конденсатор *D*, стенки которого охлаждаются водой. Трубка *E* служит для возвращения сконденсированной ртути в сосуд *A*. На пути газа из откачиваемого сосуда в конденсатор *D* установлена ртутная ловушка. Она представляет собой сосуд *F*, помещенный в сосуд Дьюара *K* с жидким азотом или воздухом. Это приспособление позволяет почти полностью исключить возможность попадания паров ртути в откачиваемый сосуд, так как в сильно охлажденном сосуде *F* ртуть переводится в твердое состояние.

4. Для измерения давлений применяют приборы, называемые манометрами. Обычные ртутные, водяные и другие манометры, устройство которых известно из курса физики средней школы, не позволяют измерять давления, меньшие десятых долей мм рт. ст. Для измерения малых давлений применяются специальные манометры — Мак-Леода, Пирани — Галле и др.

Принципиальная схема манометра Мак-Леода приведена на рис. 11.19. Манометр состоит из двух сосудов A и Q , двух капилляров K_1 и K_2 , имеющих одинаковый диаметр d канала a , и из соединительных трубок C и F . Капилляр K_1 сверху запаян. Трубка C служит для соединения манометра с сосудом, в котором нужно измерить давление p . Перед началом опыта открывают кран B и опускают сосуд A таким образом, чтобы уровень ртути в левом колене манометра был ниже разветвления трубок E . При этом давление в сосуде Q и капиллярах K_1 и K_2 одинаково и равно измеряемому давлению p . Если затем сосуд A постепенно поднимать вверх, то ртуть будет перетекать в левое колено манометра, разобщая между собой сосуд Q и капилляр K_2 . Дальнейшее повышение уровня ртути в сосуде Q вызывает сжатие находящегося в нем газа и вытеснение его в капилляр K_1 . Сосуд A поднимают до тех пор, пока уровень ртути в капилляре K_2 не сравняется с верхним закрытым концом капилляра K_1 . Разность уровней h ртути в капиллярах K_1 и K_2 показывает, насколько давление p_1 газа в капилляре K_1 больше измеряемого давления p :

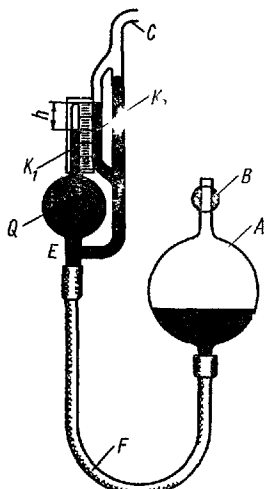


Рис. 11.19.

$$h\rho g = p_1 - p, \quad (11.44)$$

где ρ — плотность ртути.

Обозначим объем сосуда Q и капилляра K_1 через V . Сжатие газа в капилляре K_1 производится достаточно медленно, так что его можно считать изотермическим. Поэтому можно воспользоваться законом Бойля—Мариотта:

$$pV = p_1 \frac{\pi d^2}{4} h. \quad (11.45)$$

Исключив из уравнений (11.44) и (11.45) давление p_1 , получим следующее выражение для измеряемого давления p :

$$p = \frac{\tau d^2 \rho g}{4 \left(V - \frac{\tau d^2}{4} h \right)} h^2. \quad (11.46)$$

Объем сосуда Q во много раз больше объема капилляра K_1 , поэтому в формуле (11.46) можно пренебречь величиной $\frac{\pi d^2}{4} h$ по сравнению с V :

$$p = \frac{\pi d^2 \rho g}{4V} h^2 = \alpha h^2, \quad (11.47)$$

где $\alpha = \frac{\pi d^2 \rho g}{4V}$ — постоянная манометра.

Формула (11.47) служит для нахождения измеряемого давления p . Манометр Мак-Леода позволяет измерять давления до 10^{-5} мм рт. ст.

В качестве второго примера вакуумных манометров рассмотрим тепловой манометр Пирани—Галле. Этот манометр представляет собой стеклянный баллон, в котором на специальном каркасе из диэлектрика укреплена тонкая платиновая проволока. Концы проволоки выведены наружу к клеммам манометра. Баллон имеет отросток, с помощью которого его внутренняя полость сообщается с сосудом, давление в котором нужно измерить. При пропускании электрического тока через платиновую проволоку она нагревается, причем выделяющаяся теплота передается в окружающую среду путем теплопроводности и излучения. Выше было указано, что коэффициент теплопроводности разреженных газов зависит линейно от давления. Поэтому при пропускании через платиновую проволоку тока постоянной силы она нагревается тем сильнее, чем меньше давление в баллоне манометра. Увеличение температуры проволоки в свою очередь вызывает возрастание ее сопротивления. Таким образом, по изменению сопротивления проволоки можно судить о величине измеряемого давления. Для поддержания постоянства температуры стенок баллона манометра его помещают в термостат. Манометр Пирани—Галле до употребления должен быть градуирован, например, по манометру Мак-Леода. Ввиду того, что теплопроводности разных газов различны, градуировка для каждого газа производится отдельно.

Вопросы для повторения

1. Выведите основное уравнение кинетической теории газов.
2. Каково молекулярно-кинетическое толкование абсолютной температуры? В чем его ограниченность?
3. Начертите кривую максвелловского распределения скоростей. Какая скорость характеризует среднюю кинетическую энергию молекул газа? Какая скорость входит в выражение для средней длины свободного пробега молекул?
4. В чем состоит закон равномерного распределения энергии по степеням свободы? Всегда ли он справедлив?
5. Изложите основные положения классической и квантовой теорий теплоемкостей газов.
6. В чем сущность явлений переноса? Каковы условия их возникновения и каковы их закономерности?