

Основы вакуумной техники и электроники

Розанов Л. Н.
Р64 Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника». — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк. 1990. — 320 с.: ил.

ISBN 5-06-000479-1

Е.П. Шешин Основы вакуумной техники

ФФКЭ / МФТИ

2001

Разработка новых технологических процессов, обеспечивающих техническое перевооружение основных отраслей производства, тесно связана с вакуумной техникой.

Новые типы полупроводниковых структур, особо чистые материалы, сплавы, специальные покрытия изготавливаются в вакууме. Вакуум является идеально чистой технологической средой, в которой можно осуществить электрохимические и электрофизические процессы при изготовлении изделий микроэлектроники.

До середины XVII в. понятие «вакуум», в переводе с латинского означающее пустоту, использовалось лишь в философии. Древнегреческий философ Демокрит одним из «начал мира» выбрал пустоту. Позднее Аристотель вводит понятие эфира — неощутимой среды, способной передавать давление. В этот период знания о свойствах разреженного газа еще отсутствовали, но вакуум уже широко использовался в водоподъемных и пневматических устройствах.

Научный этап развития вакуумной техники начинается с 1643 г., когда в Италии Э. Торричелли, ученик знаменитого Г. Галилея, измерил атмосферное давление. В 1672 г. в Германии О. Герике изобрел механический поршневой насос с водяным уплотнением, что дало возможность проведения многочисленных исследований свойств разреженного газа. Изучается влияние вакуума на живые организмы. Опыты с электрическим разрядом в вакууме привели вначале к открытию электрона, а затем и рентгеновского излучения. Теплоизолирующие свойства вакуума помогли создать правильное представление о способах передачи теплоты и послужили толчком для развития криогенной техники.

Успешное изучение свойств разреженного газа обеспечило возможность его широкого технологического применения. Оно началось с изобретения в 1873 г. первого электровакуумного прибора — лампы накаливания с угольным электродом — русским ученым А. Н. Лодыгиным и открытием американским ученым и изобретателем Т. Эдисоном в 1883 г. термоэлектронной эмиссии. С этого момента вакуумная техника становится технологической основой электровакуумной промышленности.

Расширение практического применения вакуумной техники сопровождалось быстрым развитием методов получения и измерения вакуума. За небольшой период времени в начале XX в. были изобретены широко применяемые в настоящее время вакуумные насосы: вращательный (Геде, 1905), криосорбционный (Д. Дьюар, 1906), молекулярный (Геде, 1912), диффузионный (Геде, 1913).

В СССР становление вакуумной техники связано с именем академика С. А. Векшинского (1896—1974), организовавшего в 1928 г. вакуумную лабораторию в Ленинграде, а затем возглавившего научно-исследовательский вакуумный институт в Москве.

До 50-х годов существовало мнение, что давления ниже 10^{-6} Па получить невозможно. Однако работы американских ученых Ноттингема (1948) по измерению фоновых токов ионизационного манометра и Альперта (1952) по созданию ионизационного манометра с осевым коллектором расширили диапазон рабочих давлений вакуумной техники еще на три-четыре порядка в область сверхвысокого вакуума.

Для получения сверхвысокого вакуума изобретают новые насосы: турбомолекулярный (Беккер, 1958), магниторазрядный (Джеспен и Холанд, 1959); совершенствуются паромасляные и криосорбционные насосы.

При измерении низких давлений применяются анализаторы парциальных давлений, с помощью которых определяют состав и давление каждой компоненты остаточных газов. Сверхвысоковакуумные системы потребовали для обеспечения их надежной сборки и эксплуатации разработки чувствительных методов определения натеканий в вакуумных системах: масс-спектрометрического, галоидного и др. Для снижения газовыделения вакуумных конструкционных материалов начинает применяться высокотемпературный прогрев всей вакуумной установки. Вакуумные системы изготавливают цельнометаллическими, разрабатывают конструкции сверхвысоковакуумных уплотнений, вводов движения и электрических вводов в вакуум. Совершенствуются технологические методы получения неразъемных соединений металла со стеклом, электронно-лучевая и газовая сварка. В 60-х годах успешное развитие вакуумной техники привело к разработке стохастических методов расчета вакуумных систем.

Экспериментальные исследования испарения и конденсации, поверхностных явлений, некоторых тепловых процессов, низких температур, ядерных и термоядерных реакций осуществляются в вакуумных установках. Основным инструментом современной ядерной физики — ускоритель заряженных частиц — немыслим без вакуума. Вакуумные системы применяются в химии для изучения свойств чистых веществ, изучения состава и разделения компонентов смесей, скоростей химических реакций.

Техническое применение вакуума непрерывно расширяется, но с конца прошлого века и до сих пор наиболее важным его применением остается электронная техника. В электровакуумных приборах вакуум является конструктивным элементом и обязательным условием их функционирования в течение всего срока службы. Низкий и средний вакуум используется в осветительных приборах и газоразрядных устройствах. Высокий вакуум — в при-

приборах и газоразрядных устройствах. Высокий вакуум — в приемо-усилительных и генераторных лампах. Наиболее высокие требования к вакууму предъявляются при производстве электронно-лучевых трубок и сверхвысокочастотных приборов. Для работы полупроводникового прибора вакуум не требуется, но в процессе его изготовления широко используется вакуумная технология. Особенно широко вакуумная техника применяется в производстве микросхем, где процессы нанесения тонких пленок, ионного травления, электролитографии обеспечивают получение элементов электронных схем субмикронных размеров.

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

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

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

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

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

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

На транспорте вакуум используется для подачи топлива в карбюраторах, в вакуумных усилителях тормозных систем автомобилей. Имитация космического пространства в условиях земной атмосферы необходима для испытания искусственных спутников и ракет.

В медицине вакуум применяется для сохранения гормонов, лечебных сывороток, витаминов, при получении антибиотиков, анатомических и бактериологических препаратов.

ФИЗИКА ВАКУУМА

§ 1.1. Понятие о вакууме и давлении

Свойства газов при низких давлениях изучаются в физике вакуума, являющейся разделом молекулярно-кинетической теории газов. *Основой физики вакуума* являются следующие постулаты: 1) газ состоит из отдельных движущихся молекул; 2) существует постоянное распределение молекул газа по скоростям, т. е. одной и той же скоростью обладает всегда одинаковое число молекул; 3) при движении молекул газа нет преимущественных направлений, т. е. пространство газовых молекул изотропно; 4) температура газа — величина, пропорциональная средней кинетической энергии его молекул; 5) при взаимодействии с поверхностью твердого тела молекула газа адсорбируется.

Состояние газа, при котором его давление ниже атмосферного, называется вакуумом. При давлениях, близких к атмосферному, пользуются количественным определением вакуума как разности атмосферного и абсолютного давлений. При абсолютном давлении, отличающемся от атмосферного более чем на два порядка, эта разность остается практически постоянной и не может служить количественной характеристикой разреженного газа. В этих условиях вакуум количественно определяют абсолютным давлением газа. При очень малых давлениях, которые непосредственно уже не могут быть измерены существующими приборами, состояние газа можно характеризовать количеством молекул в единице объема, т. е. молекулярной концентрацией газа.

При взаимодействии молекул газа с поверхностью твердого тела нормальная составляющая изменения количества движения молекулы равна $mv \cos \Theta$; где Θ — угол между нормалью к поверхности и вектором скорости; m и v — масса и скорость молекулы. Рассмотрим случай, когда между поверхностью и газовой средой существует энергетическое и адсорбционное равновесие. Каждой адсорбированной молекуле при этом соответствует одна десорбированная молекула с противоположным направлением вектора скорости. Таким образом, суммарное изменение количества движения адсорбированной и десорбированной молекул $\Delta K = 2mv \cos \Theta$.

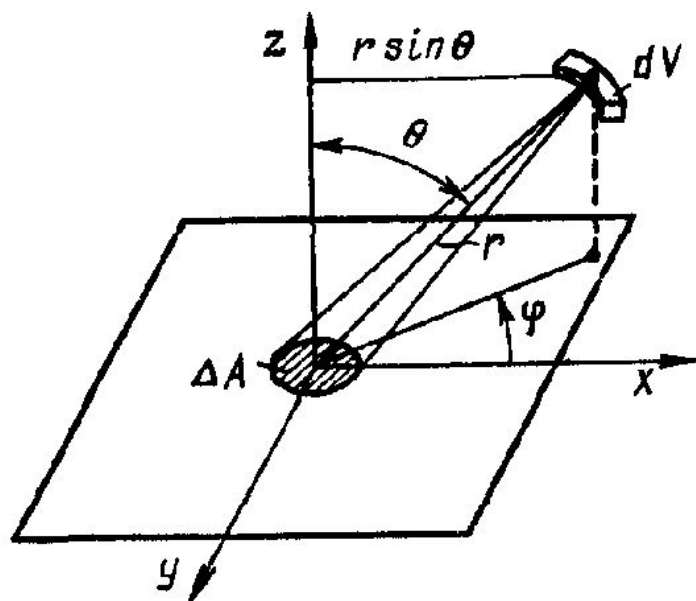


Рис. 1.1. Расчетная схема для определения давления

центра dV видна площадка ΔA :

$$dN = n \frac{d\omega}{4\pi} dV. \quad (1.2)$$

Согласно второму закону Ньютона, давление молекулы на поверхность твердого тела

$$p = \frac{\Delta K}{\Delta A \Delta t} = \frac{2mv \cos \theta}{\Delta A \Delta t}, \quad (1.1)$$

где ΔA — площадь поверхности; Δt — время взаимодействия молекулы с поверхностью.

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

Телесный угол

$$d\omega = \cos \theta \Delta A / r^2, \quad (1.3)$$

где r — расстояние между поверхностью и выделенным объемом (рис. 1.1).

Для объема dV в полярной системе координат справедливо выражение

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

Давление газа на поверхность твердого тела найдем интегрированием по объему полусферы, из которой молекулы достигают поверхности за время Δt , с радиусом $R = v\Delta t$.

С учетом выражения (1.1)

$$p = \int_{\dot{v}} \frac{2mv \cos \theta}{\Delta A \Delta t} dN. \quad (1.5)$$

Подставляя (1.2), (1.3), (1.4) в (1.5), получим

$$p = \frac{nmv}{2\pi\Delta t} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta \int_0^R dr = \frac{nmv^2}{3}. \quad (1.6)$$

Согласно принятым постулатам, существует распределение молекул по скоростям, поэтому в (1.6) вместо постоянной введем среднеквадратичную скорость молекул $v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2$. Тогда урав-

нение для расчета давления газа примет вид

$$p = nmv_{\text{кв}}^2/3. \quad (1.7)$$

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

Условия равновесия, использованные при выводе уравнения (1.7), могут не выполняться. Примером является конденсирующая поверхность, с которой из-за очень большого времени адсорбции не происходит десорбции молекул газа. Тело, вылетевшее в космическое пространство из земной атмосферы, десорбирует с поверхности молекулы газа. Количеством же молекул, ударяющихся о поверхность этого тела, можно пренебречь. Для точного расчета давления газа на поверхности твердого тела нужно знать соотношение потоков падающих и вылетающих молекул газа.

§ 1.2. Газовые законы

Если в объеме находится смесь из K химически не взаимодействующих газов, то для определения давления смеси $p_{\text{см}}$ необходимо подсчитать сумму:

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^K \frac{1}{3} m_i n_i v_{\text{кв}i}^2. \quad (1.8)$$

Сравнивая (1.7) и (1.8), можно записать

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^K p_i. \quad (1.9)$$

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

Воспользовавшись определением температуры как величины, пропорциональной средней кинетической энергии молекул газа, можно записать $mv_{\text{кв}}^2/2 = cT$, где c — постоянная. Тогда уравнение (1.7) для расчета давления газа можно представить в виде $p = \frac{2}{3} ncT$. Если обозначить $k = 2c/3$, то

$$p = nkT, \quad (1.10)$$

а средняя кинетическая энергия молекул

$$\frac{mv_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (1.11)$$

Уравнение (1.10) известно под названием уравнения газового состояния. Оно связывает между собой три основных параметра состояния газа: *давление, молекулярную концентрацию и температуру.*

Постоянная k называется постоянной Больцмана, и ее экспериментальное значение равно $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Уравнение (1.10) можно представить также в другой записи:

$$p = \frac{Nm}{VM} RT, \quad (1.12)$$

где M — молекулярная масса газа; V — объем газа; R — универсальная газовая постоянная, $R = kN_A = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(К·моль), N_A — число Авогадро, $N_A = M/m = 6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹.

Следствием (1.10) или (1.12) является то, что при постоянной массе и неизменном давлении объем газа пропорционален его абсолютной температуре (*закон Гей-Люсака*). Если же постоянны масса газа и его объем, то давление газа пропорционально его абсолютной температуре (*закон Шарля*). При постоянных массе и температуре газа произведение его давления на объем остается неизменным (*закон Бойля — Мариотта*). При постоянном давлении и температуре газа молекулярная концентрация не зависит от рода газа (*закон Авогадро*).

§ 1.3. Частота соударений молекул газа с поверхностью и единицы давления

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

$$N_q = \int_V \frac{dN}{\Delta A \Delta t} = \frac{n}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \Theta \cos \Theta d\Theta \int_0^{R=v\Delta t} \frac{dr}{\Delta t} = \frac{nv}{4}, \quad (1.13)$$

где dN определяется согласно (1.2) — (1.4).

С учетом функции распределения молекул по скоростям имеем

$$N_q = nv_{ap}/4, \quad (1.14)$$

где v_{ap} — среднеарифметическая скорость молекул газа.

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

$$V_q = N_q/n = v_{ap}/4. \quad (1.15)$$

Полученное выражение не зависит от давления и определяет максимальную быстроту действия идеального вакуумного насоса, откачивающего все молекулы газа, которые попадают в него через входное отверстие.

Единицей давления в СИ является Па (паскаль), численно равный 1 Н/м^2 . Иногда применяют единицу $1 \text{ гПа} = 10^2 \text{ Па}$.

В литературе по вакуумной технике можно встретить также и ряд других единиц давления. Наиболее распространенной внесистемной единицей давления является миллиметр ртутного столба (торр). Давление газа 1 мм рт. ст. равно давлению, которое создает столбик ртути высотой 1 мм при условии, что плотность ртути равна $13595,1 \text{ кг/м}^3$ (при 0°C), а земное ускорение соответствует нормальному $9,80665 \text{ м/с}^2$ на широте 45° . Давление столба жидкости $p = \rho gh$, тогда $1 \text{ мм рт. ст.} = 13595,1 \cdot 9,80665 \cdot 10^{-3} = 133,32239 \text{ Н/м}^2$.

В метеорологии в качестве единицы давления часто используется 1 бар $= 10^5 \text{ Па}$. Отношения между различными единицами давления даны в табл. 1.1.

Соотношение между единицами давления

Единицы давления	1 Па	1 мм рт. ст.	1 дин/см ²	1 физ. ат.	1 кгс/см ²	1 кал/м ³
1 Па	1	$7,50 \cdot 10^{-3}$	10	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-1}$
1 мм рт. ст.	$1,33 \cdot 10^2$	1	$1,33 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^2$
1 дин/см ²	$1,00 \cdot 10^{-1}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	1	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$
1 физ. ат.	$1,01 \cdot 10^5$	$7,60 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^5$	1	$1,03 \cdot 10^0$	$2,39 \cdot 10^4$
1 кгс/см ²	$9,81 \cdot 10^4$	$7,36 \cdot 10^2$	$9,81 \cdot 10^5$	$9,68 \cdot 10^{-1}$	1	$2,34 \cdot 10^4$
1 кал/м ³	$4,19 \cdot 10^0$	$3,14 \cdot 10^{-2}$	$4,19 \cdot 10^1$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^5$	1

Для описания процессов, в которых давление изменяется в очень широких пределах, удобна логарифмическая единица давления. Она может быть, например, задана в виде $pA = -\lg p$, где p — давление в физических атмосферах. Значение $pA = 0$ соответствует 1 физ. ат, $pA = 1$ соответствует 0,1 физ. ат и т. д.

§ 1.4. Распределение молекул газа по скоростям

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

$$dn_v = 4n\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{(mv)^2}{2kT}} dv, \quad (1.16)$$

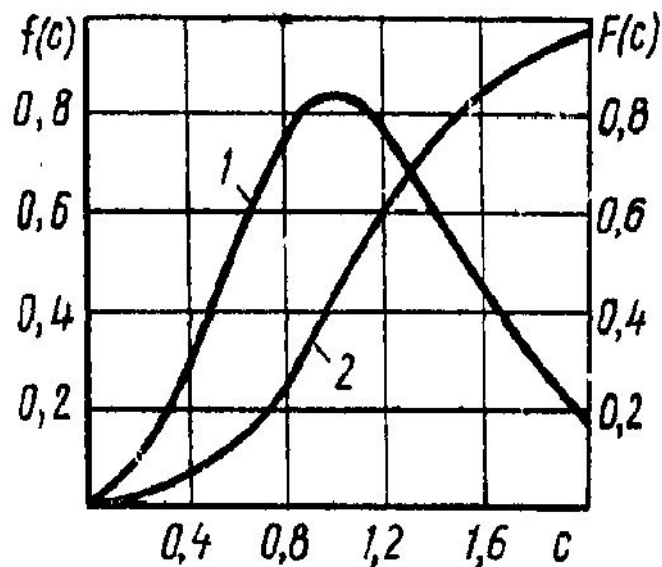


Рис. 1.2. Дифференциальная $f(c)$ и интегральная $F(c)$ функции распределения молекул по скоростям:

1 — $f(c)$, 2 — $F(c)$

где dn_v — число молекул, скорости которых заключены в пределах от v до $v + dv$.

Скорость, при которой наблюдается максимум функции распределения, называется наиболее вероятной скоростью:

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{2kT/m}. \quad (1.17)$$

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

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

Безразмерные функции $f(c) = dn_v / (nc)$ и $F(c) = \int_0^c f(c) dc$

представлены на рис. 1.2. Функция $F(c)$ численно равна доле общего числа молекул, скорости которых не превышают c .

В вакуумных расчетах часто используют скорости: среднеарифметическую

$$v_{ар} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v dn_v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}; \quad (1.18)$$

среднеквадратичную

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{1}{n} \int_0^{\infty} v^2 dn_v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (1.19)$$

Соотношение между скоростями $v_{\text{вер}}$, $v_{\text{ар}}$ и $v_{\text{кв}}$ равно 1:1,128:1,225. Так, указанные скорости для молекул азота при 0°C составляют $v_{\text{вер}}=402$ м/с, $v_{\text{ар}}=453$ м/с, $v_{\text{кв}}=492$ м/с. Среднеарифметические скорости молекул некоторых газов при различных температурах приведены в табл. 1.2.

Согласно (1.14), для воздуха при $T=300$ К и $M=29$ кг/кмоль при атмосферном давлении поток газовых молекул $N_g=2,9 \times 10^{23}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$, а из (1.15) объем молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, $V_g=11,6 \cdot 10^{-3}$ м 3 /(с·см 2).

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

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

Здесь $E = mv_{\text{кв}}^2/2$ — энергия поступательного движения молекулы; dn_E — число молекул, энергия которых лежит в интервале от E до $E + dE$. Вводя переменную $x = E/(kT)$, получим

$$f(x) = \frac{d(n_E/n)}{dx} = \sqrt{\frac{4x}{\pi}} \times e^{-x}. \quad (1.20)$$

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

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx. \quad (1.21)$$

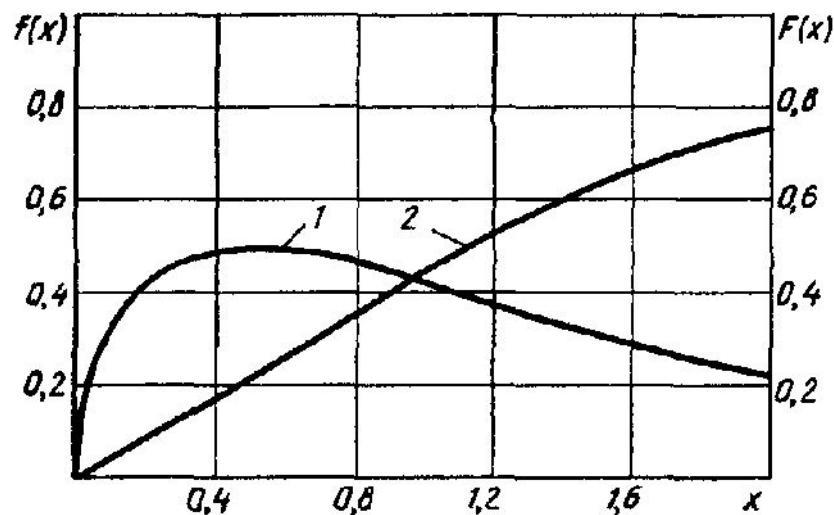


Рис. 1.3. Дифференциальная $f(x)$ и интегральная $F(x)$ функции распределения молекул по энергиям:

1 — $f(x)$, 2 — $F(x)$

§ 1.5. Атмосферное давление

Атмосферный воздух — это основная газовая смесь, с которой приходится иметь дело в вакуумной технике (табл. 1.4). Он состоит в основном из азота, кислорода и паров воды. При 25°C и 50% влажности парциальное давление паров воды составляет 12 гПа.

Таблица 1.4

Состав сухого атмосферного воздуха

Газы	Состав. %	Парциальное давление, гПа (общее давление 10^3 гПа)	Газы	Состав. %	Парциальное давление, гПа (общее давление 10^3 гПа)
N ₂	78,1	781	CH ₄	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
O ₂	21	210	Kr	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Ar	0,9	9	N ₂ O	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
CO ₂	0,03	0,3	H ₂	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	Xe	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$
He	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$			

В качестве нормальных условий приняты давление 10^5 Па и $t=273$ К. При этом, согласно уравнению (1.12), объем, занимаемый 1 кмоль равен $22,4$ м³. При нормальных условиях молекулярная концентрация воздуха $n=2,7 \cdot 10^{25}$ м⁻³. При среднеарифметической скорости $v_{ар}=400$ м/с частота соударений молекул с поверхностью твердого тела $N_q=2,7 \cdot 10^{27}$ м⁻²·с⁻¹, а объем газа, ударяющийся о поверхность твердого тела, $V_q=100$ м³/(с·м²).

Большинство составляющих воздуха при нормальных условиях являются газами. В виде пара присутствуют лишь Н₂О, СО₂ и Хе. При $T=77$ К, которую имеют поверхности вакуумных ловушек, охлаждаемые жидким азотом, большинство составляющих воздуха переходит в парообразное состояние и лишь Не, Н₂ и Ne остаются газами.

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

$$\frac{dp}{p} = -\frac{m}{kT} dz.$$

После интегрирования имеем

$$\ln p = -\frac{mg}{kT} z + C \quad \text{или} \quad p = C \times \exp\left(-\frac{mg}{kT} z\right).$$

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

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{mg}{kT} z\right). \quad (1.36)$$

Полученное выражение называется формулой Больцмана, из которой следует, что при подъеме на каждые 15 км давление воздуха уменьшается примерно на один порядок. На рис. 1.4 показано изменение атмосферного давления на различной высоте от поверхности Земли.

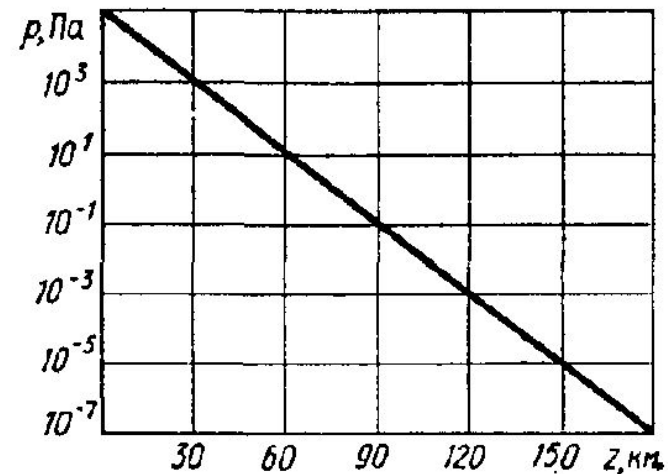


Рис. 1.4. Атмосферное давление на различных высотах от поверхности Земли