

фектов, которые мало отличимы от флуктуаций самого измерительного прибора. (Такие флуктуации, создаваемые прибором, называют шумами, поскольку они затрудняют измерения.) Например, крутильный маятник трудно использовать для измерения моментов, значительно меньших, чем моменты, создаваемые внутренними флуктуациями самой измерительной системы. Точно так же, в случае сопротивления, присоединенного к усилителю, трудно измерить напряжение на сопротивлении, если оно меньше, чем величина внутренних флуктуаций напряжения, которые всегда существуют на самом сопротивлении \*).

## 1.5. Темплота и температура

Неизолированные макроскопические системы могут взаимодействовать и обмениваться энергией. Одним из простых очевидных примеров такого взаимодействия является совершение макроскопической работы одной системой над другой. Например, на рис. 1.28

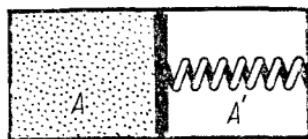


Рис. 1.28. Когда поршень смещается на некоторое макроскопическое расстояние, пружина  $A'$  совершает работу над газом  $A$ .



Рис. 1.29. Сжатый газ  $A'$  совершает работу над газом  $A$  при макроскопическом перемещении поршня.

показана пружина  $A'$ , которая давит на поршень, ограничивающий объем газа  $A$ . На рис. 1.29 газ  $A'$ , находящийся под большим давлением, действует на поршень. Если поршень продвинется на некоторое расстояние, то система  $A'$  совершит некоторую работу над системой  $A$  \*\*).

Возможно, однако, и такое взаимодействие двух макроскопических систем, которое происходит без совершения макроскопической работы. Этот тип взаимодействий, который мы будем называть *тепловым*, возникает в результате обмена энергиями между системами в молекулярном масштабе. Энергия, переданная таким образом, называется *тепловой*. Предположим, что поршень на рис. 1.29 закреплен неподвижно. В этом случае одна система не может совершать макроскопическую работу над другой системой, независимо от того, какая сила действует на поршень. С другой стороны, атомы системы  $A$  постоянно взаимодействуют в момент соударений

\* ) Например, напряжение в один микровольт и меньше уже трудно измерить. Однако усреднением большого числа измерений можно выделить полезный сигнал, использовав то обстоятельство, что он не флуктуирует во времени.

\*\*) Термин *работа* используется здесь в своем обычном механическом смысле, т. е. работа равна произведению силы на путь, на котором действует эта сила.

друг с другом и таким образом обмениваются энергией \*). То же самое можно сказать и о системе  $A'$ . Но кроме того, система  $A$  взаимодействует с атомами поршня, который является общей границей для обеих систем, а атомы поршня взаимодействуют между собой и с атомами системы  $A'$ . Поэтому энергия может передаваться от  $A$  к  $A'$  (или от  $A'$  к  $A$ ) как результат многих последовательных взаимодействий между атомами этих систем.

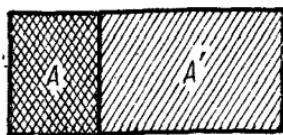


Рис. 1.30. Две системы,  $A$  и  $A'$ , находящиеся в тепловом контакте друг с другом.

Рассмотрим любые две системы  $A$  и  $A'$ , находящиеся в тепловом взаимодействии друг с другом. Это могут быть уже рассмотренные нами два газа,  $A$  и  $A'$ , или в качестве системы  $A$  можно взять, например, кусок меди, погруженный в систему  $A'$ , представляющую собой сосуд, наполненный водой. Обозначим через  $E$  энергию системы  $A$  (т. е. полную энергию, кинетическую плюс потенциальную, всех атомов в системе  $A$ ), а через  $E'$  — энергию системы  $A'$ . Так как составная система  $A^* = A + A'$ , состоящая из  $A$  и  $A'$ , предполагается изолированной, то полная энергия

$$E + E' = \text{const.} \quad (8)$$

Возникает вопрос, как эта полная энергия \*\*) распределяется между системами  $A$  и  $A'$ . Предположим, что эти системы находятся в равновесии друг с другом (т. е. сложная система  $A^*$  тоже находится в равновесии). За исключением небольших флуктуаций, это равновесное состояние системы должно соответствовать наиболее случайному распределению энергии в системе. Рассмотрим сначала простой пример, когда системы  $A$  и  $A'$  представляют собой идеальный газ, состоящий из одинаковых молекул, например, молекул азота ( $N_2$ ). Наиболее случайная ситуация в системе  $A^*$  будет соответствовать равномерному распределению полной энергии  $E + E'$  между молекулами систем  $A$  и  $A'$ . Каждая молекула в  $A$  и в  $A'$  будет иметь при этом одно и то же среднее значение энергии. Это значит, что среднее значение энергии в молекул газа  $A$  будет таким же, как и среднее значение энергии в молекул газа  $A'$ , т. е. в равновесии

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}' \quad (9)$$

Если газ  $A$  содержит  $N$  молекул, а газ  $A'$  содержит  $N'$  молекул, то

$$\bar{\varepsilon} = \frac{E}{N} \text{ и } \bar{\varepsilon}' = \frac{E'}{N'} \quad (10)$$

\*) Если молекула газа состоит более чем из одного атома, то молекулы могут обмениваться энергией при соударениях; кроме того, энергия отдельной молекулы может быть по-разному распределена между ее атомами в результате взаимодействий между ними.

\*\*) В случае системы, показанной на рис. 1.29, мы для простоты полагаем, что стенки поршня и сосуда столь тонкие, что их энергией по сравнению с энергией газа можно пренебречь.

Поэтому равенство (9) принимает такой вид:

$$\frac{E}{N} = \frac{E'}{N'}.$$

Предположим, что газы  $A$  и  $A'$  первоначально отделены друг от друга и находятся в равновесии. Обозначим их энергии в этом случае соответственно через  $E_i$  и  $E'_i$ . Допустим, что теперь системы приведены в соприкосновение, так что они могут обмениваться

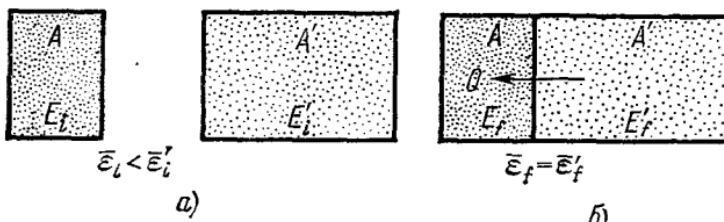


Рис. 1.31. Два газа,  $A$  и  $A'$ , состоящие из одинаковых молекул, первоначально не находятся в контакте друг с другом (a). Затем они приводятся в тепловой контакт (b) и обмениваются теплом до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие. Энергия газа обозначена через  $E$ , а средняя энергия одной молекулы через  $\bar{\varepsilon}$ .

энергией путем теплового взаимодействия. Могут возникнуть два случая, которые мы и рассмотрим:

1. В первый момент начальные значения энергий  $E_i$  и  $E'_i$  такие, что среднее начальное значение энергии  $\bar{\varepsilon}_i = E_i/N$  молекул в  $A$  не равно среднему начальному значению энергии  $\bar{\varepsilon}'_i = E'_i/N'$  молекул в  $A'$ , т. е. первоначально

$$\bar{\varepsilon}_i \neq \bar{\varepsilon}'_i. \quad (11)$$

В этом случае первоначальное распределение энергии в составной системе  $A^*$  не будет случайным и такая ситуация не останется неизменной. Системы  $A$  и  $A'$  будут обмениваться энергией до тех пор, пока не будет достигнута равновесная ситуация, соответствующая наиболее случайному распределению энергии, при котором средняя энергия молекулы одна и та же для обеих систем. Энергии  $E_f$  и  $E'_f$  систем  $A$  и  $A'$  в конечной равновесной ситуации должны быть такими, чтобы

$$\bar{\varepsilon}_f = \bar{\varepsilon}'_f \quad \text{или} \quad \frac{E_f}{N} = \frac{E'_f}{N'}. \quad (12)$$

В результате процессов взаимодействия, которые приводят составную систему к равновесию, система с меньшим значением начальной средней энергии на одну молекулу увеличивает эту энергию, а система с большим значением этой средней энергии теряет ее. Конечно, полная энергия изолированной системы должна оставаться постоянной:

$$E'_f + E_f = E'_i + E_i,$$

т. е.

$$\Delta E + \Delta E' = 0 \quad (13)$$

или

$$Q + Q' = 0, \quad (14)$$

где мы обозначаем:

$$\left. \begin{array}{l} Q = \Delta E = E_f - E_i, \\ Q' = \Delta E' = E'_f - E'_i. \end{array} \right\} \quad (15)$$

Здесь величина  $Q$  — тепло, поглощенное системой  $A$  в результате процессов теплового взаимодействия; оно равно увеличению энергии системы в результате этого взаимодействия. Такое же определение тепла, поглощенного системой, применимо и к системе  $A'$ . Заметим, что тепло  $Q = \Delta E$ , поглощенное системой, может быть как положительным, так и отрицательным. В самом деле, при тепловом взаимодействии между двумя системами одна система теряет энергию, а другая приобретает ее, таким образом, в уравнении (14) либо  $Q$  положительно, а  $Q'$  отрицательно, либо наоборот. По определению, система, у которой энергия увеличивается при поглощении положительного количества тепла, называется более холодной. С другой стороны, система, которая теряет энергию, поглощая отрицательное количество тепла (т. е. отдает положительное количество тепла), называется более горячей, или более теплой, системой.

2. Рассмотрим частный случай, когда начальные значения энергий  $E_i$  и  $E'_i$  таковы, что средние энергии, приходящиеся на одну молекулу в системе  $A$  и в системе  $A'$ , равны:

$$\bar{e}_i = \bar{e}'_i. \quad (16)$$

В этом случае, когда системы  $A$  и  $A'$  приведены в тепловой контакт, они автоматически обеспечивают наиболее случайную ситуацию и в составной системе  $A^*$ . Таким образом, обе системы находятся в равновесии и между ними не происходит обмена теплом или энергией (на макроскопическом уровне).

*Температура.* Рассмотрим теперь общий случай теплового взаимодействия между двумя системами,  $A$  и  $A'$ . Эти системы могут быть различными газами, состоящими из молекул разной массы с различным числом атомов, или же одна или обе системы могут быть жидкостями или твердыми телами. Хотя закон сохранения энергии (8) и остается в силе, здесь нам уже труднее охарактеризовать равновесную ситуацию, соответствующую наиболее случайному распределению энергии между всеми атомами составной системы  $A^* = A + A'$ . Можно, однако, утверждать что наши предыдущие рассуждения, касающиеся случая двух одинаковых газов, должны быть применены и здесь. То, чего мы можем ожидать (позже это будет доказано), заключается в следующем: каждая система характеризуется параметром  $T$  (условно называемым «абсолютной температурой»), который определяет среднюю энергию, приходящуюся на один атом в системе. В равновесной ситуации, соответствующей наиболее случайному распределению энергии, по аналогии с (9) можно ожидать, что

$$T = T'. \quad (17)$$

Невозможно дать более точное определение понятия абсолютной температуры, пока мы не уточнили понятие случайности (в применении к распределению энергии между неодинаковыми атомами). Однако легко ввести понятие температуры (но не «абсолютной температуры»), используя обычный термометр. Под термометром мы понимаем небольшую макроскопическую систему  $M$ , устроенную таким образом, что при отдаче или поглощении тепла у нее может изменяться только один макроскопический параметр. Этот параметр называется *термическим параметром* термометра и обозначается  $\theta$ . Примерами термометров могут служить хорошо известные ртутные или спиртовые термометры. У этих термометров длина  $L$  столба жидкости в стеклянном капилляре зависит от энергии самой жидкости, которая изменяется при поглощении тепла. Итак, термическим параметром таких термометров является длина  $L$ . Если термометр  $M$  находится в тепловом контакте с какой-то системой  $A$  и сам термометр уже достиг состояния равновесия, то его термический параметр  $\theta$  имеет определенное значение  $\theta_A$ , которое называется *температурой системы A, измеренной с помощью термометра M* \*).

Использование термометра позволяет сделать следующие выводы. Допустим, что термометр  $M$  находился в тепловом контакте сначала с системой  $A$ , а затем с системой  $B$ . В каждом случае, после прихода термометра к равновесному состоянию, он будет показывать значения температур  $\theta_A$  и  $\theta_B$ . Возможны два случая: либо  $\theta_A \neq \theta_B$ , либо  $\theta_A = \theta_B$ . Из опыта известно (позже мы докажем это теоретически), что если  $\theta_A \neq \theta_B$ , то системы  $A$  и  $B$  при тепловом контакте будут обмениваться теплом, и если  $\theta_A = \theta_B$ , то теплового обмена не будет.

Таким образом, температура  $\theta$  системы  $A$ , измеренная обычным термометром, является параметром, характеризующим систему. Знание температуры позволяет сделать следующее утверждение:

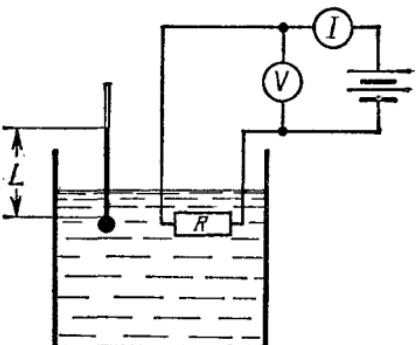


Рис. 1.32. Два различных термометра находятся в тепловом контакте с системой, состоящей из сосуда, наполненного жидкостью. Один термометр ртутный и его термическим параметром является длина столбика ртути в стеклянном капилляре термометра. Другой термометр представляет собой электрическое сопротивление  $R$ , сделанное из платиновой проволоки или из угля. Его термическим параметром является электрическое сопротивление  $R$  (определенное током  $I$ , текущим через сопротивление  $R$  и напряжением  $V$  на нем).

*измеренной с помощью термометра M* \*).

\* ) Считается, что система  $A$  значительно больше, чем термометр  $M$ , так что изменением температуры этой системы в результате контакта с термометром можно пренебречь. Заметим также, что согласно нашему определению температура, измеренная ртутным термометром, является длиной и поэтому измеряется в сантиметрах.

если две системы находятся в тепловом контакте друг с другом, то в случае неравенства их температур они будут обмениваться теплом друг с другом; если же их температуры равны, то теплового обмена не будет.

## 1.6. Численные оценки

Мы показали, что поведение макроскопических систем становится понятным, если принять, что они состоят из молекул и атомов. Наше рассмотрение имело, однако, чисто качественный характер и его следует дополнить выяснением порядка величин, с которыми мы имеем дело. Для ориентации мы произведем оценки скорости

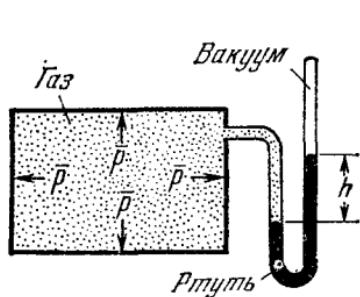


Рис. 1.33. Среднее давление газа  $\bar{P}$  измеряется при помощи манометра, состоящего из U-образной трубы, наполненной ртутью. В трубке устанавливается такая высота  $h$  столбика ртути, чтобы давление, оказываемое этим столбиком, уравновешивалось давлением газа.

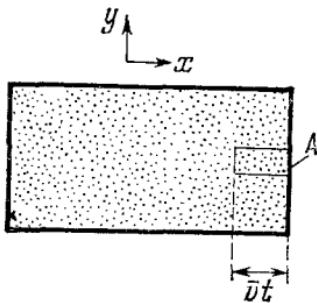


Рис. 1.34. Этот рисунок иллюстрирует столкновение молекул газа с площадкой  $A$  на одной из стенок сосуда. (Ось  $z$  перпендикулярна к плоскости чертежа.)

движения молекул и частоты их столкновений друг с другом. Обратимся опять к простому примеру идеального газа.

**Давление идеального газа.** Если газ находится в каком-то сосуде, то удары молекул газа о стенки сосуда (число таких ударов огромно) приводят к появлению силы, действующей на каждый элемент площади стенок. Сила, приходящаяся на единицу площади, называется **давлением  $P$**  газа. Среднее давление  $\bar{P}$  газа легко измерить с помощью манометра. Его также можно вычислить, если известно число молекул, и обратно, по измеренному давлению можно судить о количестве молекул. Итак, рассмотрим, как приблизительно вычислить давление идеального газа.

Пусть идеальный газ состоит из  $N$  молекул, каждая из которых имеет массу  $m$ . Предположим, что газ находится в равновесии и что он заключен в сосуд, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда и объем  $V$ . Число молекул в единице объема будет равно  $n \equiv N/V^*$ ). Боковые стороны сосуда могут быть параллельны декартовым осям координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , как показано на рис. 1.34.

\*). Через  $n$  раньше обозначалось число молекул в одной из половин сосуда, но это не должно нас смущать. В дальнейшем число молекул в единице объема мы иногда для краткости будем называть концентрацией молекул.