

также является универсальной постоянной и носит название постоянной Больцмана. При $R = 8,31$ кДж/(кмоль·К) и $N_0 = 6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹ имеем $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К = $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

Вводя постоянную Больцмана, мы можем переписать выражение для средней кинетической энергии одной молекулы (18.19) в виде

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост}} = \frac{mc^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (18.21)$$

Таким образом, оказывается, что средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре и является мерой интенсивности теплового движения молекул при заданной температуре. Тем самым формула (18.21) выявляет молекулярно-кинетический смысл понятия температуры. *Температура тела есть количественная мера энергии теплового движения молекул, из которых состоит это тело.* Закономерная связь (18.21) между абсолютной температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул идеального газа показывает, кроме того, что *при одинаковой температуре средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы, несмотря на различие масс молекул разных газов.*

Подставляя (18.21) в (18.9), мы можем преобразовать основное уравнение кинетической теории газов к виду

$$p = nkT, \quad (18.22)$$

связывающему давление газа p с концентрацией молекул n и абсолютной температурой T .

§ 19. Температура и методы ее измерения. Абсолютный нуль температуры

Остановимся более подробно на определении понятия температуры. Первоначальные представления о степени нагретости тел мы получаем из непосредственного чувственного опыта. Дотрагиваясь до нескольких тел, мы можем сказать, какое из них теплее, а какое — холоднее. Соответственно этому мы скажем, что первое из тел имеет более высокую температуру, чем второе.

Однако возможности нашего непосредственного восприятия весьма ограничены. Для определения температуры тел в большом диапазоне ее изменения, а также для точного количественного суждения о ней необходимо прибегать не к непосредственному ощущению, а к приборам.

Рассмотрим две какие-либо системы, состоящие из большого числа молекул (газы, жидкости или твердые тела). Приведем их в соприкосновение таким образом, чтобы они химически не реаги-

ровали друг с другом, чтобы не происходило переноса вещества из одной системы в другую, чтобы одна система не могла расширяться за счет другой, и вообще, чтобы они *не могли обмениваться механической энергией макроскопических движений*. Для этого в большинстве случаев обе системы необходимо разделить тонкой, но непроницаемой стенкой.

При этом еще остается возможным *переход энергии микроскопических, хаотических движений молекул, составляющих эти системы*. Другими словами, остается возможным обмен *внутренней энергией соприкасающихся систем*. Такой обмен может происходить либо при непосредственном соприкосновении, либо через стенку, отделяющую системы одну от другой.

Суммарную энергию, отданную таким путем одним телом другому, мы будем называть количеством переданной теплоты.

Соприкосновение тел, при котором возможна лишь передача тепла от одного тела к другому, будем называть *тепловым контактом* этих тел.

При передаче тепла от одного тела к другому будет изменяться энергия хаотического теплового движения молекул в обоих телах, что приведет к изменению ряда физических характеристик этих систем, связанных с тепловым движением. Так, например, как мы видели в предыдущем параграфе, для идеального газа, заключенного в сосуде постоянного объема, с ростом энергии молекулярного движения будет увеличиваться давление [формула (18.13)], а также и его температура.

Мы говорим, что *две системы имеют равные температуры, если при тепловом контакте их состояния не меняются*.

Если же температуры обеих систем различны, то при их соприкосновении будет происходить передача тепла от более нагретого тела к более холодному, и состояния систем будут меняться до тех пор, пока между ними не установится *тепловое равновесие*. С этого момента температуры обеих систем станут равными.

Если два тела порознь находятся в тепловом равновесии с третьим, то они будут находиться в тепловом равновесии и при непосредственном соприкосновении друг с другом. В этом случае температуры обоих тел одинаковы и равны температуре тела, с которым производится сравнение и которое мы будем называть *термометром*.

Как уже указывалось, температура есть количественная мера энергии хаотического молекулярного движения в телах. С возрастанием энергии этого хаотического движения увеличивается и температура. Поскольку изменение энергии теплового движения молекул всегда приводит к изменению целого ряда других физических характеристик системы, то по численным значениям этих

характеристик можно судить о температуре и устанавливать соответствующие шкалы.

Простейшими термометрами являются жидкостные. На рис. 2.13 изображен ртутный термометр, состоящий из небольшого резервуара с ртутью, оканчивающегося тонким капилляром. При нагревании ртуть расширяется и ее уровень h в капилляре поднимается. Шкала и начало отсчета температуры могут быть выбраны произвольно. Наиболее распространенной в международной практике является стоградусная шкала Цельсия. В этом случае за нуль температурной шкалы (0°C) принята температура плавления льда при нормальных условиях, т. е. при давлении $p = 1$ атм, а за 100° — температура кипения воды (при тех же условиях). Разделив тогда высоту капилляра h_{100} между этими двумя точками на 100 равных частей, можно определить температуру t в градусах Цельсия по отношению высоты поднятия ртути в капилляре h_t к интервалу между двумя основными постоянными точками, т. е.

$$t = \frac{h_t}{h_{100}} \cdot 100^\circ\text{C}. \quad (19.1)$$

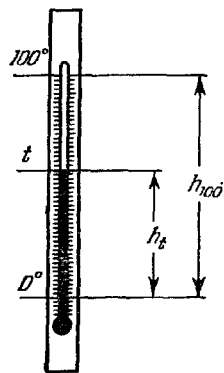


Рис. 2.13.

Такое определение температуры пригодно лишь для грубых измерений в быту. При более точных измерениях обнаруживается, что для разных термометрических жидкостей, например для ртутного и спиртового термометров, при одинаковой температуре численные значения соотношений h_t/h_{100} совпадают друг с другом лишь для выбранных постоянных точек. При промежуточных же температурах показания обоих термометров будут несколько расходиться, так как законы расширения различных жидкостей и сосудов, их содержащих, строго говоря, различны.

Для более точного определения температурной шкалы следует воспользоваться идеальным газом. Поскольку, как мы видели в предыдущем параграфе, идеальный газ должен подчиняться уравнению Менделеева — Клапейрона (18.16), то о температуре газа можно судить по изменению его объема или давления.

В современной технике наиболее удобными являются электрические методы измерения температуры. В так называемых термометрах сопротивления используется изменение сопротивления металлов и полупроводников при их нагревании. Термоэлементами или термопарами измеряется электродвижущая сила, возникающая при нагревании места контакта (спая) двух металлов или полупроводников. Электрические методы измерения температур более подробно будут рассмотрены в томе II.

При любом методе определения температуры на температурной шкале можно отметить некоторую точку, имеющую абсолютное значение. Эта точка отвечает температуре, при которой отсутствует хаотическое (тепловое) движение молекул, и носит название абсолютного нуля температуры ($T = 0^\circ \text{K}$). В случае идеального газа значению $T = 0$ отвечает отсутствие кинетической энергии поступательного теплового движения молекул ($\bar{\epsilon}_{\text{пост}} = \frac{3}{2} kT = 0$) и отсутствие давления ($p = nkT = 0$).

Не следует думать, что при абсолютном нуле температуры прекращается всякое движение частиц вещества. Даже если все молекулы газа остановятся, то внутри них будут двигаться электроны по определенным орбитам вокруг ядер, определенным образом будут участвовать в движении протоны и нейтроны внутри ядер. Ниже мы убедимся, что, например, средняя кинетическая энергия свободных электронов в металле при абсолютном нуле в сотни раз превышает среднюю кинетическую энергию молекул газа при комнатной температуре и т. д.

Абсолютный нуль температуры означает (если не иметь в виду заведомо идеализированный объект — идеальный газ) не отсутствие движения, но такое состояние тела, при котором дальнейшее уменьшение интенсивности этого движения за счет отдачи его энергии окружающим телам невозможно.

Следовательно, при абсолютном нуле система находится в состоянии с наименьшей возможной энергией. Характер этого состояния зависит от конкретных свойств составляющих систему частиц.

§ 20. Скорости газовых молекул. Распределение Максвелла

Согласно (18.21) средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост}} = \frac{mc^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (20.1)$$

Отсюда можно найти среднюю квадратичную скорость молекул

$$c_{\text{квдр}} = \sqrt{c^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{mN_0}}; \quad (20.2)$$

она растет прямо пропорционально квадратному корню из абсолютной температуры. Для нахождения численных значений скоростей газовых молекул необходимо знать их массы и число Авогадро. Однако поскольку произведение

$$mN_0 = \mu \quad (20.3)$$