

отсчитываемая по какому-либо термометру, называется *эмпирической температурой*, а соответствующая шкала температур — *эмпирической температурной шкалой*. Таким образом, в зависимости от выбора термометрической величины a , можно осуществить бесконечное множество эмпирических температурных шкал. Они будут совпадать между собой, вообще говоря, только в основных реперных точках, принятых при построении температурной шкалы (т. е. в тройной точке воды, когда шкала строится по одной реперной точке, или в нормальных точках плавления льда и кипения воды, если шкала строится по двум реперным точкам). Во всех остальных точках, как правило, шкалы совпадать не будут. Это означает, что различные термометры, например ртутный и спиртовый или термометры сопротивления с железной и медной проволокой, при измерении температуры одного и того же тела будут давать, как правило, разные показания. Для устранения возникшей неоднозначности можно было бы условно принять какой-либо определенный термометр за основной и по нему градуировать все остальные термометры. Но какой термометр следует принять за основной?

§ 4. Идеально-газовая шкала температур

1. При предварительном решении поставленного вопроса можно воспользоваться тем обстоятельством, что достаточно разреженные, так называемые *идеальные газы* с большой точностью подчиняются закону Бойля — Мариотта: *произведение объема V данной массы газа на его давление P зависит только от температуры*. Это произведение можно принять за термометрическую величину a , а самый газ — за термометрическое тело. Таким путем приходят к *идеально-газовой шкале температур*. Идеально-газовая температура — это температура, отсчитываемая по газовому термометру, наполненному сильно разреженным газом. Температуру по идеально-газовой шкале будем обозначать большой буквой T . При этом формула (3.1) переходит в

$$PV = CT, \quad (4.1)$$

где C — постоянная, зависящая только от массы и химической природы газа.

Преимущество идеально-газовой шкалы температур перед всеми прочими эмпирическими температурными шкалами состоит в том, что, как показывает опыт, температура T , определенная по формуле (4.1), очень слабо зависит от химической природы газа, который наполнен резервуар газового термометра. Показания различных газовых термометров при измерении температуры одного и того же тела очень мало отличаются друг от друга. Поэтому, впрямь до более совершенного определения (см. § 31), мы будем понимать под температурой T величину, измеряемую с помощью идеально-газового термометра.

Практически газовый термометр можно реализовать двумя способами. В одном способе объем газа V поддерживается постоянным, индикатором температуры служит давление P . Во втором способе поддерживается постоянное давление газа, измерение температуры сводится к измерению объема V . Принципиально оба способа равноправны. Но первый способ более удобен, а поэтому он и применяется на практике.

2. Принцип устройства газового термометра можно понять из схематического рис. 3. Уровень ртути в левом колене манометра

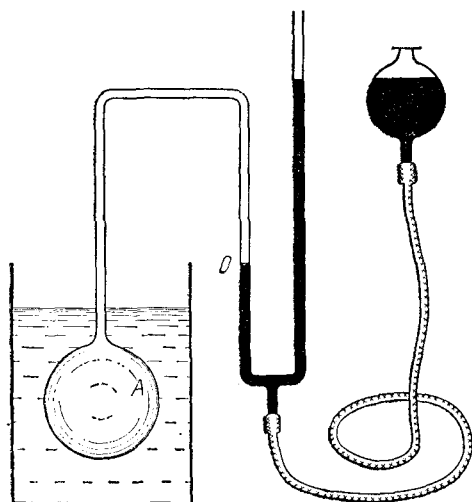


Рис. 3.

при измерениях доводится до постоянной отметки 0, чтобы обеспечить постоянство объема газа в баллоне А. В действительности газовый термометр представляет собой весьма сложное устройство, а измерение температуры с помощью этого термометра — нелегкую экспериментальную процедуру, требующую большой тщательности. Не останавливаясь на этих вопросах, ограничимся общим замечанием, что газовый термометр представляет собой стеклянный, кварцевый или металлический баллон неизменного объема, запол-

ненный реальным газом и соединенный с манометром при помощи капилляра. В качестве термометрического газа раньше употреблялся водород. В настоящее время применяется гелий и азот (последний в области высоких температур, где гелий не годится, так как он проходит сквозь стенки баллона). Давление газа измеряется манометром, находящимся при стандартной температуре. По давлению газа вычисляется измеряемая температура с учетом поправок на изменение объема баллона, неидеальность газа и пр.

3. При $T = 0$ уравнение (4.1) дает $PV = 0$. На этом основании заключают, что при такой температуре $P = 0$, так как объем V в нуль обращаться не может. Далее, говорят, что это есть наиболее низкая из всех возможных температур, называемая *абсолютным нулем температуры*. Хотя это заключение и правильно, однако приведенная аргументация основана на экстраполяции и не имеет доказательной силы. По мере приближения к абсолютному нулю наблюдаются все более и более заметные отступления от законов

идеальных газов. Все газы начинают конденсироваться еще до достижения абсолютного нуля. Строгое доказательство существования абсолютного нуля температуры основано на *втором начале термодинамики* (см. § 31).

Классическая физика полагала, что при абсолютном нуле атомно-молекулярное движение прекращается. В действительности это не так. Предположение о полном покое атомов и молекул противоречит *принципу неопределенности Гайзенберга*. При абсолютном нуле остается еще весьма интенсивное движение частиц, из которых состоит тело. Ему соответствует минимальная энергия, которая от тела уже не может быть отнята (если остаются постоянными объем и прочие внешние параметры, определяющие состояние тела). Но это движение уже не является тепловым. Соответствующая ему энергия называется *нулевой энергией*. Наличием нулевой энергии объясняются многие явления. Так, нулевая энергия жидкого гелия столь велика (в три раза больше, чем теплота испарения), что кристалл гелия, находящийся под давлением собственных насыщенных паров, становится нестабильным и переходит в жидкое состояние. Затвердевание гелия возможно лишь при повышенном давлении. Под влиянием давления атомы гелия сближаются, и силы молекулярного притяжения возрастают. Это обстоятельство и делает возможным переход гелия в твердое состояние.

Таким образом, *абсолютный нуль может быть определен как такая температура, при которой в теле прекращается тепловое движение и остается только движение частиц, связанное с нулевой энергией*. Абсолютный нуль является самой низкой и «холодной» из всех возможных температур. Температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, называется *абсолютной температурой*. До недавнего времени единица температуры в идеально-газовой абсолютной шкале называлась *градусом Кельвина* в честь английского физика лорда Кельвина (1824—1907), предложившего термодинамическую шкалу температур, тождественную с идеально-газовой шкалой. Недавно, в целях сокращения, такую единицу стали называть просто *кельвин* (сокращенно К). Эта единица однозначно определяется требованием, чтобы температура тройной точки воды была равна 273,16 К.

4. Мы еще не дали точных определений понятиям «более холодный» и «более горячий». Полагаться на чувственные восприятия, приводящие к такого рода представлениям, нельзя по причинам, о которых сказано выше. Точное определение использует понятие энергии. Тело *A* называется *более горячим* или *более нагретым*, чем тело *B*, если при приведении этих тел в тепловой контакт энергия переходит от тела *A* к телу *B*; тело же *B* в этом случае называется *более холодным* или *менее нагретым*.

5. Поскольку обе величины *P* и *V* для идеальных газов не могут быть отрицательными, абсолютная температура *T*, определяемая

соотношением (4.1), может быть либо только положительной, либо только отрицательной. Первый случай реализуется, когда в качестве постоянной C взята положительная величина, второй — когда эта постоянная отрицательна. Так как условились температуру тройной точки воды считать положительной, то при таком соглашении второй случай отпадает. (Можно было бы поступать наоборот, тогда все абсолютные температуры были бы отрицательными.) Таким образом, абсолютная температура, определенная с помощью идеально-газового термометра, может быть *только положительной*. Более нагретым телам соответствуют более высокие, а менее нагретым — более низкие температуры.

6. Существование абсолютного нуля, как температуры, ниже которой тело охладить нельзя, конечно, не зависит ни от каких определений. Однако то обстоятельство, что такой температуре приписывается значение нуль градусов, является всего лишь произвольным соглашением. Можно было бы температуру определить так, чтобы абсолютному нулю соответствовало любое, наперед выбранное число градусов. Действительно, температурой можно было бы назвать не обязательно величину T , определяемую соотношением (4.1), а любую функцию этой величины. Например, за температуру можно было бы принять логарифм T . Тогда температура абсолютного нуля выражалась бы числом $-\infty$, а температурная шкала заполняла бы весь бесконечный интервал от $-\infty$ до $+\infty$. Однако нет оснований отступать от традиционного определения.

7. Наряду с абсолютной температурной шкалой в физике употребляется также *шкала Цельсия* (1701—1744), строящаяся известным способом по двум основным реперным точкам — нормальной точке плавления льда и нормальной точке кипения воды. Шкала Цельсия отличается от абсолютной шкалы положением нуля. Если t — температура в градусах Цельсия, а T — абсолютная температура в кельвинах, то приближенно

$$t = T - 273,15 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.2)$$

Пользуясь этим выражением, уравнение (4.1), выражающее закон Бойля — Мариотта, можно записать в виде

$$PV = P_0V_0(1 + \alpha t), \quad (4.3)$$

где P_0 и V_0 — давление и объем газа при температуре $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, а α — постоянный коэффициент, численное значение которого приближенно равно

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Этому коэффициенту можно дать двоякое физическое толкование. Если давление газа поддерживать постоянным, то формула (4.3) переходит в $V = V_0(1 + \alpha t)$ и показывает, что α есть *коэффициент*

объемного расширения газа. Наоборот, если поддерживать постоянным объем газа, то $P = P_0 (1 + \alpha t)$. Отсюда видно, что α есть приращение давления газа $P - P_0$, отнесенное к единице приращения температуры $t - t_0$, когда в качестве исходной взята температура $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Так определяемая величина называется *термическим коэффициентом давления газа*. Мы видим, что для идеальных газов коэффициент объемного расширения и термический коэффициент давления совпадают.

Формулы (4.3) и (4.1), устанавливающие линейную связь между произведением PV и температурой, не выражают какого-либо физического закона, а являются лишь следствиями выбранного способа построения температурной шкалы. Объективный физический закон состоит в том, что для всех идеальных газов коэффициент α один и тот же. Этот закон называется *законом Гей-Люссака (1778—1850)*. Наличием такого закона, как уже отмечалось выше, и объясняется предпочтение, отдаваемое идеально-газовой шкале температур перед всеми прочими эмпирическими температурными шкалами.

8. Идеально-газовая шкала температур все же не может быть признана вполне удовлетворительной. Идеальных газов в строгом смысле слова не существует. В поведении реальных газов наблюдаются отступления от законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, и притом не одинаковые для различных газов. Поэтому газовые термометры, наполненные различными газами, дают, хотя и близкие, но все же не вполне совпадающие показания. Правда, расхождения между ними стремятся к нулю по мере увеличения степени разрежения газов. Однако это имеет место не для всех температур. При температурах порядка тысячи и нескольких тысяч градусов многоатомные газы начинают диссоциировать, т. е. их молекулы распадаются на атомы. При еще более высоких температурах атомы ионизируются, т. е. распадаются на электроны и положительно заряженные ионы. Благодаря этому газы перестают подчиняться законам Бойля — Мариотта, даже если их степень разрежения сколь угодно велика. Это показывает, что газовый термометр не пригоден для установления температурной шкалы в области очень высоких температур. Газовые термометры не пригодны и для измерения очень низких температур — при понижении температуры все реальные газы в конце концов конденсируются. Самая низкая температура, которая может быть измерена с помощью газового термометра, составляет примерно 1 К при условии, что термометр наполнен гелием при низком давлении.

Рациональная температурная шкала не должна зависеть от индивидуальных свойств термометрического вещества. Она должна строиться так, чтобы в принципе можно было измерять любые температуры, как бы высоки или низки они ни были. Этим требованиям удовлетворяет *абсолютная термодинамическая шкала температур*, построенная на основе *второго начала термодинамики*. Ее

называют также *шкалой Кельвина*. Кельвин впервые предложил эту шкалу в 1848 г. С ней мы подробно познакомимся в § 31.

Абсолютная термодинамическая шкала является *основной температурной шкалой* в физике. Там, где пригоден газовый термометр, эта шкала практически не отличается от идеально-газовой шкалы температур. Поэтому в интервале от 4 до 1338 К (точка затвердевания золота) абсолютная термодинамическая шкала практически осуществляется с помощью газового термометра.

ЗАДАЧА

Газовый термометр постоянного объема наполнен неидеальным газом, уравнение состояния которого имеет вид $P + \pi(V) = \phi(V) T$, где $\pi(V)$ и $\phi(V)$ — произвольные функции объема, а T — температура по шкале идеально-газового термометра. Термометр градуируется обычным способом по двум реперным точкам. Показать, что его показания будут совпадать с показаниями такого же термометра, наполненного идеальным газом, если только температуры реперных точек в обоих случаях выбраны одинаковыми.

§ 5. Виды термометров

1. Среди различных термометров вне конкуренции по чувствительности, точности измерений и воспроизводимости стоит *газовый термометр*, в котором индикатором температуры является *давление газа* при постоянном объеме резервуара термометра. Шкала газового термометра почти точно совпадает с абсолютной термодинамической шкалой Кельвина, что является большим достоинством термометра. Однако устройство газового термометра и работа с ним довольно сложны — термометры имеют большие размеры, громоздки и медленно приходят в состояние теплового равновесия. По этим причинам для технических целей газовые термометры применяются редко. Они довольно редко используются и в физических исследованиях, где с их помощью иногда измеряются низкие температуры. Основное назначение газовых термометров состоит в том, что по ним градуируются другие термометры. В этой связи газовые термометры называются *первичными*, а градуированные по ним термометры, применяющиеся при практических измерениях, — *вторичными*. Не каждый вторичный термометр должен градуироваться непременно по газовому термометру. Газовые термометры используются для градуировки главным образом в бюро стандартов, метрологических институтах и в некоторых исследовательских лабораториях. Обычно же для градуировки термометров применяются достаточно точные вторичные термометры, уже проградуированные по газовому.

Из вторичных термометров наибольшее значение имеют *жидкостные* (главным образом ртутные) *термометры*, *термометры сопротивления* и *термоэлементы*.