мируем (20.3), а затем продифференцируем полученное выражение. Имеем

$$\frac{dT}{T}+(n-1)\frac{dv}{v}=0,$$

отсюда

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_n=-\frac{1}{n-1}\,\frac{v}{T}. \tag{20.5}$$

Производная $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$ определяется выражением (17.13). Подставляем (20.5) и (17.13) в (20.4). Имеем

$$c_n=c_v+T\frac{p}{T}\,\frac{1}{n-1}\,\frac{v}{T}=c_v+\frac{R}{n-1}, \tag{20.6}$$

или, в связи с тем, что $R=c_p-c_v$ и $\frac{c_p}{c_v}=\varkappa$, окончательно

$$c_n=c_v\frac{n-\varkappa}{n-1}. \tag{20.7}$$

Формула (20.7) при соответствующем выборе n приводит к известным выражениям теплоемкостей простейших процессов. Действительно,

$$n=0 \text{ (изобара)}, \quad c_p=\varkappa c_v;$$
$$n=\pm\infty \text{ (изохора)}, \quad c_v=c_v;$$
$$n=1 \text{ (изотерма)}, \quad c_T=\infty;$$
$$n=\varkappa \text{ (адиабата)}, \quad c_s=0.$$

§ 21. Термодинамическая шкала температур

Шкалы термометров с различными термометрическими телами различны и отражают физические особенности этих тел. В термодинамике температура является весьма важной физической величиной — термическим потенциалом — и поэтому, естественно, возникает вопрос о построении такой шкалы температур, которая не была бы связана со свойствами какого бы то ни было термометрического вещества. Такого рода шкалу можно считать абсолютной в смысле ее независимости от свойств вещества.

Метод построения абсолютной, термодинамической шкалы температур был разработан в свое время Томсоном (лордом Кельвином). Основная идея этого метода глубоко связана с принципами преобразования теплоты в работу. Поэтому при изучении проблемы абсолютной шкалы температур необходимо предварительно рассмотреть принципиальные основы теории теплового двигателя.

Тепловой двигатель — это система, имеющая две степени свободы — тепловую и механическую (деформационную), совершающая круговой процесс между двумя телами разных температур и преобразующая теплоту в механическую работу.

Пусть система (рабочее тело) в процессе работы взаимодействует с двумя телами с температурами T_1 и T_2. Возникают следующие вопросы:

1) как можно установить различие температур двух тел без измерения температуры? (Измерять температуру мы не можем, так как шкала температур еще не установлена);

2) в какой координатной системе нужно исследовать процесс?

3) каким должен быть в этой системе круговой цикл, чтобы он отвечал требованию независимости его вида от физических свойств системы? (Вырабатывается метод построения шкалы, не связанной со свойствами какого бы то ни было вещества.)

Ответим последовательно на поставленные вопросы.

1. Для установления различия температур двух тел вовсе не обязательно производить термометрические измерения, т. е. использовать прибор со шкалой. В этом случае достаточно воспользоваться прибором без шкалы — термоскопом. Различие в положении индикатора прибора, приведенного в тепловое равновесие с телами *1* и *2*, будет свидетельствовать о наличии разности температур.

Итак, для выбора двух тел разной температуры достаточно иметь термоскоп.

2. Круговой цикл, который будет совершать тепловой двигатель, может быть представлен либо в координатной системе pV, либо в координатной системе TS. В нашем случае, когда мы поставили задачу построения шкалы температур, целесообразно выбрать ту координатную систему, в которой в качестве одной из координат высту-

пает температура. Следовательно, рассмотрение должно вестись в координатной системе TS.

3. В координатной системе TS одинаковым образом, независимо от физических свойств системы, изображаются изотермические и адиабатические процессы. Поэтому круговой цикл должен быть построен из двух изотерм и двух адиабат (цикл Карно).

После выяснения этих вопросов можно переходить к изучению намеченного цикла. Изобразим на плоскости чертежа координатную систему TS (рис. 11). Нанесем в произвольном масштабе, в произвольном месте по отношению к оси абсцисс (нуль шкалы неизвестен), разность температур двух тел (тел *1* и *2*), установленную при помощи термоскопа (численное значение этой разности еще никак не определено). Из концов отложенного отрезка проведем линии равных температур T_1 и T_2 (горизонтальные прямые). Пусть $T_1 > T_2$. Условимся в дальнейшем называть: тело более высокой температуры T_1 — нагревателем, тело более низкой температуры T_2 — холодильником.

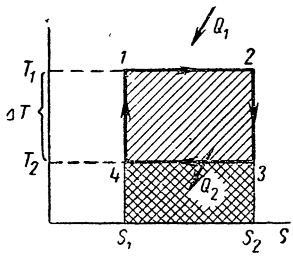

Рис. 11

Приведем рабочее тело в соприкосновение с нагревателем, дождемся установления теплового равновесия и отметим это начальное состояние системы точкой *1* на диаграмме. Пусть в начальном состоянии энтропия системы S_1. Будем производить изотермический подвод тепла к рабочему телу при температуре T_1. Пусть рабочее тело получит от нагревателя количество теплоты Q_1. Его энтропия должна соответствующим образом увеличиться. На графике перемещение точки, отображающей состояние системы будет совершаться вправо, по линии $T_1 = \text{const}$. Допустим, что процесс подвода тепла закончится в некотором состоянии, обозначаемом точкой *2*, в котором энтропия системы достигнет значения S_2.

В состоянии *2* рабочее тело изолируется от нагревателя и начинается процесс адиабатического изменения объема, связанный с охлаждением рабочего тела (расширение для нормального тела, сжатие — для аномального) до температуры холодильника T_2. На графике процесс адиабатического изменения объема изобразится вертикальным отрезком *2—3*.

В состоянии *3* рабочее тело приводится в соприкосновение с холодильником и производится изотермическое изменение его объема (сжатие или расширение) до тех пор, пока энтропия системы, уменьшаясь, не достигнет значения S_1 в точке *4*. При совершении этого изотермического процесса некоторое количество теплоты Q_2 отводится от рабочего тела к холодильнику.

В состоянии *4* рабочее тело отключается от холодильника и подвергается нагреву посредством адиабатического изменения состояния. Как только температура тела, возрастая, достигает значения T_1, процесс заканчивается. Цикл работы теплового двигателя завершен.

Вычислим Q_1 и Q_2, применяя способ графического определения количества теплоты в системе TS. Из диаграммы TS следует, что

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1); \quad |Q_2| = T_2(S_2 - S_1) \tag{21.1}$$

(площади большого и малого прямоугольника).

Площадь цикла *12341* определит количество теплоты, преобразованной в работу:

$$A = Q_1 - |Q_2| = (T_1 - T_2)(S_2 - S_1). \tag{21.2}$$

Исключив при помсщи (21.2) разность энтропий из (21.1), получим

$$T_1 = (T_1 - T_2)\frac{Q_1}{Q_1 - |Q_2|}; \quad T_2 = (T_1 - T_2)\frac{|Q_2|}{Q_1 - |Q_2|},$$

или

$$T_1 = \Delta T\frac{Q_1}{Q_1 - |Q_2|}; \quad T_2 = \Delta T\frac{|Q_2|}{Q_1 - |Q_2|}. \tag{21.3}$$

Задача построения термодинамической шкалы температур решена. Действительно, величины, определяющие T_1 и T_2, могут быть найдены способом, не требующим измерения температуры. Так, количества теплоты Q_1 и Q_2 можно измерять работами, эквивалентными им. Можно произвести определение отношений $\frac{Q_1}{Q_1 - |Q_2|}$ и $\frac{Q_2}{Q_1 - |Q_2|}$ через отношение масс веществ, переведенных из одного агрегатного состояния в другое, при сообщении (соответственно отводе) количеств теплоты Q_1 и Q_2.

Разность температур $\Delta T = T_1 - T_2$ можно приравнять любому произвольно выбранному значению.

Для получения некоторой конкретной шкалы нужно условиться: 1) в отношении выбора реперных точек *1* и *2*; 2) в отношении выбора единицы измерения температуры.

Если в качестве реперных точек выбрать точку таяния льда и точку кипения воды при нормальном давлении, то точно проведенный опыт дал бы значения

$$\frac{Q_1}{Q_1 - |Q_2|} = 3{,}7316;$$

$$\frac{Q_2}{Q_1 - |Q_2|} = 2{,}7316.$$

Если далее условиться в качестве одного градуса шкалы принять $^1/_{100}$ интервала между реперными точками, то очевидно,

$$T_1 = 373{,}16^\circ\,\mathrm{K}; \quad T_2 = 273{,}16^\circ\,\mathrm{K},$$

где К (Кельвин) — символ абсолютной шкалы.

§ 22. Тождественность газовой и термодинамической температур

В предыдущем изложении мы не различали температуру термодинамическую — величину, играющую роль теплового потенциала, и газовую температуру — температуру, отсчитываемую по шкале газового термометра, т. е. термометра, основанного на использовании свойств идеального газа (следовательно, вещества, обладающего двумя свойствами: 1) оно удовлетворяет уравнению состояния Клапейрона; 2) его внутренняя энергия не зависит от объема). Несомненно, тождество этих температур не является непосредственно очевидным. Покажем, что они действительно тождественны.

Условимся пока различать газовую и термодинамическую температуру. С этой целью будем обозначать газовую — буквой Θ, а термодинамическую — буквой T. Тогда уравнение (16.16) перепишется в виде

$$pv = R\Theta. \tag{22.1}$$

Мы еще не знаем тождественны ли эти температуры, но отчетливо понимаем, что между ними должна существовать взаимно однозначная зависимость. Иначе