## § 39. Принцип динамического отопления

1. *Применим неравенство Клаузиуса к проблеме отопления помещений.* При обычных способах отопления тепло, получающееся в топке от сгорания топлива, непосредственно поступает в отапливаемое помещение. Значительная доля тепла, уносимая нагретыми газами, бесполезно расходуется на обогревание окружающей атмосферы. Имеются и другие потери тепла. Но мы отвлечемся от них и будем иметь в виду идеальную отопительную систему, когда все тепло, полученное в топке, поступает на обогревание помещения. Вильям Томсон предложил другую схему отопления, названную *динамическим отоплением*. Теоретически этот способ отопления более выгоден, чем обычный. Хотя динамическое отопление по техническим причинам и не получило практического осуществления, разбор его принципа представляет интерес как любопытный пример применения законов термодинамики. Кроме того, не исключено, что по мере дальнейшей централизации отопления идея динамического отопления найдет и практическое воплощение.

2. При динамическом отоплении только часть тепла, получаемого в топке, поступает в обогреваемое помещение. Остальная часть затрачивается на работу, производимую тепловой машиной (двигателем). Нагревателем в двигателе служит топка, а холодильником — отапливаемое помещение. Эта работа используется для приведения в действие холодильной машины, включенной между окружающей средой и помещением. Холодильная машина отбирает тепло от окружающей среды и передает его помещению.

Таким образом, помещение получает тепло и от горячей топки и от холодной окружающей среды. Общее количество тепла может превзойти тепло, полученное от топки при обычном способе отопления. В этом и состоит выгода динамического способа отопления.

Пусть $T_1$, $T_2$, $T_3$ — температуры топки, отапливаемого помещения и окружающей среды соответственно. Пусть топка отдала двигателю тепло $Q_1$. Из этого тепла часть $Q_2$ поступила на отопление помещения. Двигатель произвел работу $A = Q_1 - Q_2$. Холодильная машина отобрала тепло $Q_3$ от окружающей среды, передала помещению тепло $Q_2'$. На это затрачена работа $A' = Q_2' - Q_3$. Если обе машины — идеальные, то вся работа двигателя тратится на приведение в действие холодильной машины. В этом идеальном случае $A = A'$, т. е. $Q_1 - Q_2 = Q_2' - Q_3$. В реальных машинах есть потери на трение и прочие потери. В этом случае $A > A'$, т. е. $Q_1 - Q_2 > Q_2' - Q_3$. Таким образом, всегда $Q_1 - Q_2 \geqslant Q_2' - Q_3$, или $Q_3 \geqslant Q_2 + Q_2' - Q_1$.

Двигатель и холодильную машину вместе можно рассматривать как одну термодинамическую систему, совершившую круговой процесс. В этом круговом процессе система получила:

тепло $Q_1$ от топки при температуре $T_1$;

тепло $-(Q_2+Q_2')$ от помещения при температуре $T_2$;

тепло $Q_3$ от окружающей среды при температуре $T_3$.

На основании неравенства Клаузиуса

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2+Q_2'}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} \leqslant 0.$$

Исключая $Q_3$ с помощью неравенства

$$Q_3 \geqslant Q_2 + Q_2' - Q_1,$$

получим

$$(Q_2+Q_2')\left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2}\right) - Q_1\left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}\right) \leqslant 0.$$

Принимая во внимание, что $T_1 > T_2 > T_3$, отсюда находим

$$Q_2 + Q_2' \leqslant \frac{\dfrac{1}{T_3} - \dfrac{1}{T_1}}{\dfrac{1}{T_3} - \dfrac{1}{T_2}} Q_1. \tag{39.1}$$

Величина $q = Q_2 + Q_2'$ есть тепло, поступающее в отапливаемое помещение. В идеальном случае, когда все процессы квазистатические,

$$q = \frac{\dfrac{1}{T_3} - \dfrac{1}{T_1}}{\dfrac{1}{T_3} - \dfrac{1}{T_2}} Q_1. \tag{39.2}$$

Так как $T_1 > T_2$, то $\dfrac{1}{T_3} - \dfrac{1}{T_1} > \dfrac{1}{T_3} - \dfrac{1}{T_2}$, и формула (39.2) дает $q > Q_1$. На рис. 29 представлена зависимость величины $q/Q_1$ от температуры помещения $T_2$ при фиксированных температурах «нагревателя» $T_1$ и «холодильника» $T_2$. Если процессы — не квазистатические, то тепло, полученное помещением, будет меньше. Однако и в этом случае можно осуществить такие условия, что $q$ будет больше $Q_1$, так как на коэффициенты полезного действия тепловых машин теоретически не наложено никаких ограничений, помимо ограничения, накладываемого второй теоремой Карно.

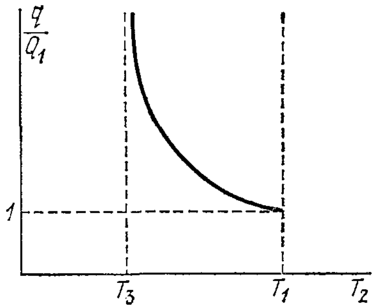


Рис. 29.

3. Динамическое отопление может служить примером процесса, в котором тепло от более холодного тела (окружающая среда) переходит к более теплому телу (отапливаемому помещению). Однако такой процесс не противоречит постулату Клаузиуса, так как он сопровождается компенсацией. Компенсация состоит в том, что одновременно тепло переходит от более нагретого тела (топка) к менее нагретому (помещению).

То обстоятельство, что при динамическом способе отопления отапливаемое помещение может получить больше тепла, чем тепло, развивающееся в топке, на первый взгляд кажется парадоксальным. Однако в основе такого «парадокса» лежит представление теории теплорода, которое мы интуитивно применяем, быть может, помимо своей воли. В действительности никакого общего закона сохранения количества тепла не существует, а потому для существования рассматриваемого «парадокса» нет никаких оснований. Поучительно, однако, посмотреть на принцип динамического отопления с точки зрения представления об *обесценивании тепловой энергии* в естественных необратимых процессах, о котором говорилось в § 37. При обычном способе отопления тепло от топки $Q_1$ при температуре $T_1$ переходит к помещению в виде такого же количества тепла, но при более низкой температуре $T_2$. Это есть процесс *качественного обесценивания тепла.* При динамическом отоплении, и в этом его преимущество, в идеальном случае, когда все процессы квазистатические, такого обесценивания тепла нет. На всех стадиях процесса *энергия сохраняется не только количественно, но и качественно.* Так, тепло $Q_1$ при температуре $T_1$ эквивалентно количественно и качественно меньшему количеству тепла $Q_2$ при температуре $T_2$ и запасенной работе $A$. Точно так же, тепло $Q_3$, заимствованное от холодильника при температуре $T_3$, полностью эквивалентно сумме меньшего количества тепла $Q_2'$ при температуре *помещения $T_2$ и запаса работы $A$.* Первый принцип термодинамики требует выполнения равенства $Q_3 - Q_2' = A$, но он не накладывает никаких ограничений на величину $Q_2'$. Ограничения накладываются вторым началом, которое в случае квазистатических процессов требует

$$\frac{Q_3}{T_3} = \frac{Q_2'}{T_2},$$

и следовательно,

$$Q_2' = \frac{A}{\frac{T_3}{T_2} - 1}.$$

Когда $T_2 \to T_3$, $Q_2' \to \infty$.

## § 40. Равенство Клаузиуса. Энтропия

1. Допустим, что круговой процесс, совершаемый системой, — *квазистатический*. Неравенство Клаузиуса

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leqslant 0 \tag{40.1}$$

справедливо и для такого процесса. Только под $T$ теперь можно понимать температуру *самой системы*, а не окружающей среды, поскольку обе температуры одинаковы.

Квазистатический процесс обратим и притом в узком смысле слова. Он может идти в противоположном направлении. Для обратного процесса также справедливо неравенство Клаузиуса: $\oint \frac{\delta' Q}{T} \leqslant 0$, где $\delta' Q$ обозначают элементарные количества тепла, получаемые системой на отдельных участках такого обратного процесса. Так как при этом система проходит через те же равновесные состояния, что и в прямом процессе, то $\delta' Q = -\delta Q$, а потому $\oint \frac{\delta Q}{T} \geqslant 0$. Это соотношение совместимо с соотношением (40.1) только в том случае, когда взят знак равенства. Таким образом, *для квазистатического процесса неравенство Клаузиуса переходит в равенство*

$$\oint\limits_{\text{кваст}} \frac{\delta Q}{T} = 0. \tag{40.2}$$

На этом равенстве основано введение фундаментального в термодинамике понятия *энтропии*.

2. Пусть система может переходить из начального состояния *1* (рис. 30) в конечное состояние *2* несколькими способами, каждый из которых является квазистатическим процессом. Возьмем два из них — I и II. Эти процессы можно объединить в один квазистатический круговой процесс *1I2II1*. Применим к нему равенство Клаузиуса:

$$\int\limits_{1\mathrm{I}2} \frac{\delta Q}{T} + \int\limits_{2\mathrm{II}1} \frac{\delta Q}{T} = 0,$$