Физико-технический институт

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Лекция 5. Второй закон термодинамики

26 февраля 2016

1. Л. Больцман: природа стремится к переходу от менее вероятных состояний к более вероятным.

2. Любой реальный самопроизвольный процесс необратим.

3. М. Планк: невозможно построить периодически действующую машину, результатами действия которой были бы только получение механической работы и охлаждение источника теплоты.

4. Невозможно осуществить вечный двигатель второго рода.

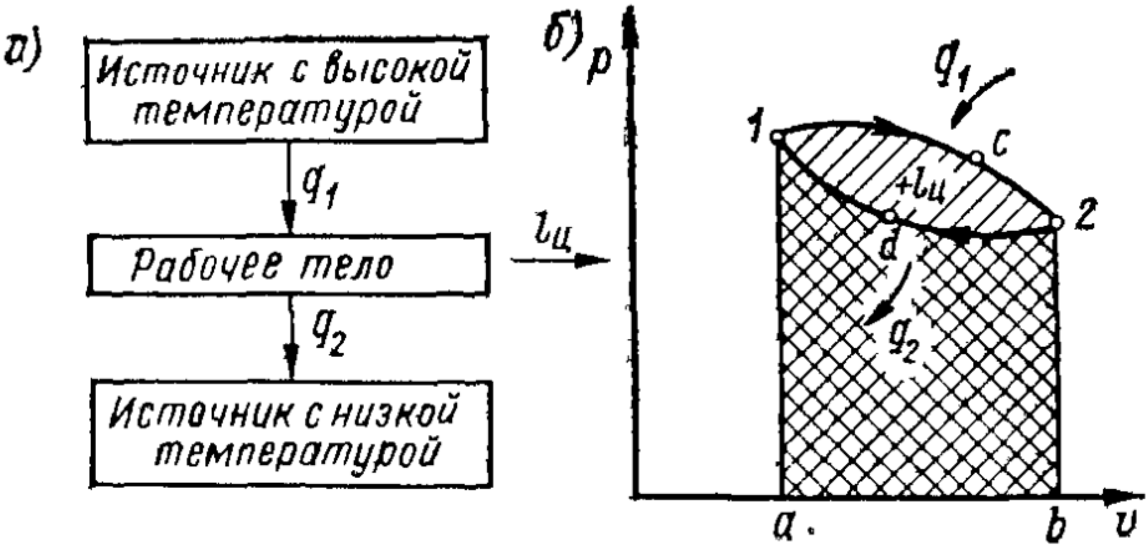
5. Р. Клаузиус: теплота не может самопроизвольно переходить от холодного тела к более нагретому.

Последовательный ряд термодинамических процессов, в которых рабочее тело претерпевает изменения и в результате возвращается в первоначальное состояние, называется **круговым процессом** или **циклом**.

Циклы могут быть **обратимыми**, состоящие из обратимых процессов, и **необратимыми**.

Циклы подразделяются на **прямые** и **обратные**. Прямыми называются циклы, в которых теплота преобразуется в работу, обратными в которых теплота передается от более холодного тела к более нагретому.

Прямые циклы в диаграммах изображаются происходящими по часовой стрелке (по таким циклам работают все тепловые двигатели), обратные против часовой стрелки (по таким циклам работают холодильные машины).



1-c-2 – расширение
2-d-1 – сжатие

Полезная работа цикла равна разности работ расширения и сжатия:

$$l_{ц} = l_{р} - |l_{сж}| \tag{1}$$

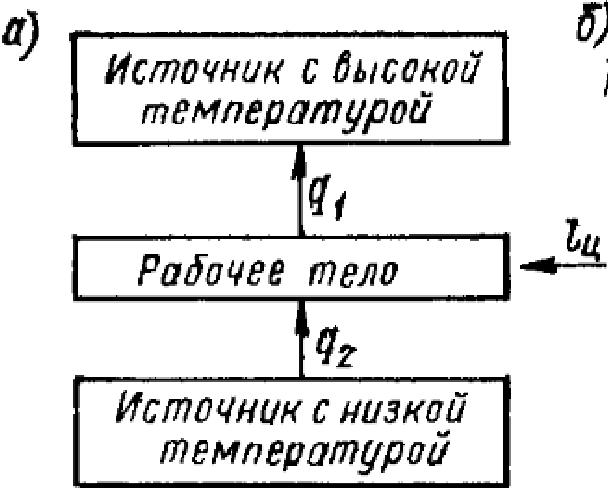
В соответствии с первым законом термодинамики $\Sigma q = \Delta u + l$. Для процесса *1-c-2-d-1* $\Delta u = 0$, поэтому $\Sigma q = l$, или

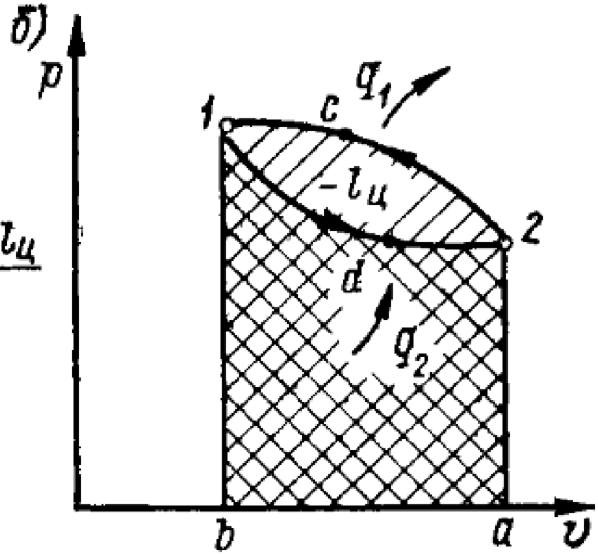
$$l_{ц} = q_1 - |q_2| \tag{2}$$

Для оценки степени совершенства прямых циклов используют **термический коэффициент полезного действия**, под которым понимают отношение работы, полученной в цикле, к затраченной теплоте:

$$\eta_t = l_{ц}/q_1 = \left(q_1 - |q_2|\right)/q_1 = 1 - |q_2|/q_1 \tag{3}$$

Таким образом, термический КПД показывает долю теплоты, превращаемой в полезную работу, $0 \le \eta_t < 1$.


а)
Источник с высокой температурой
q1
Рабочее тело
lц
q2
Источник с низкой температурой


б)
p
1
c
q1
-lц
2
d
q2
b
a
v

В результате совершения обратного цикла теплота отбирается от источника с низкой температурой и передается к источнику с высокой температурой, при этом в цикле затрачивается работа $|l_ц|$. Для рассматриваемого кругового процесса *1-d-2-c-1*, $\Delta u = 0$, поэтому $\Sigma q = |l_ц|$, или

$$|l_ц| = |q_1| - q_2 \qquad (4)$$

Для оценки степени совершенства обратного цикла вводится понятие **холодильного коэффициента**:

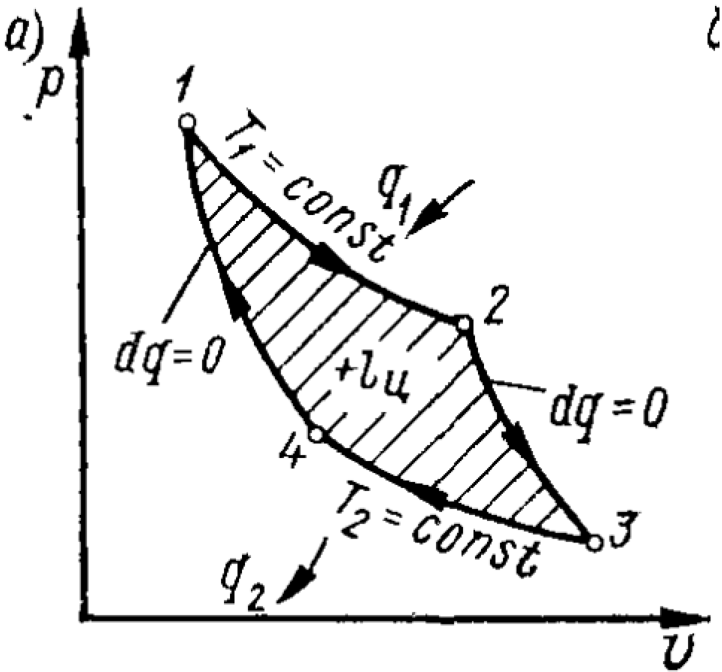
$$\varepsilon = q_2/|l_ц| \qquad (5)$$

Этот коэффициент показывает, какое количество теплоты можно отвести от низкотемпературного источника, затратив единицу работы, $0 \leq \varepsilon \leq \infty$.

В 1824 г. была опубликована работа французского инженера Сади Карно, которая затем стала основой теории тепловых машин. В этой работе Карно рассмотрел цикл теплового двигателя, который назван его именем и служит эталоном для оценки совершенства идеальных циклов, так как он имеет максимальное значение термического КПД в системе, имеющей два изотермических источника теплоты.

Прямой цикл Карно. Прямой цикл Карно может быть представлен следующим образом. Существуют два источника теплоты: источник с более высокой температурой T_1 и источник с более низкой температурой T_2, причем T_1 = const и T_2 = const, так как предполагается, что источники теплоты обладают большим количеством энергии и что подвод или отвод некоторого количества теплоты не изменяет их температуры.

Прямой и обратный циклы Карно



Термический КПД любого прямого цикла определяется по формуле (3).

Теплота q_1, подводимая к рабочему телу (идеальному газу) в изотермическом процессе *1-2*, может быть выражена формулой:

$$q_1 = RT_1 \ln\left(v_2/v_1\right)$$

Теплота q_2, отводимая в изотермическом процессе *3-4*, определяется аналогично:

$$\left|q_2\right| = RT_2 \ln\left(v_3/v_4\right)$$

Следовательно, формула (3) преобразуется к виду:

$$\eta_t = \frac{RT_1 \ln\left(v_2/v_1\right) - RT_2 \ln\left(v_3/v_4\right)}{RT_1 \ln\left(v_2/v_1\right)} \tag{6}$$

Т.к. процессы *2-3* и *4-1* – адиабатные, то для них:

$$T_2/T_1 = (v_2/v_3)^{k-1} \quad \text{и} \quad T_2/T_1 = (v_1/v_4)^{k-1}$$

Сравнивая эти уравнения, получаем

$$v_2/v_3 = v_1/v_4 \quad \text{или} \quad v_2/v_1 = v_3/v_4$$

Заменив в уравнении (6) v_3/v_4 через v2/v1, после преобразований получим

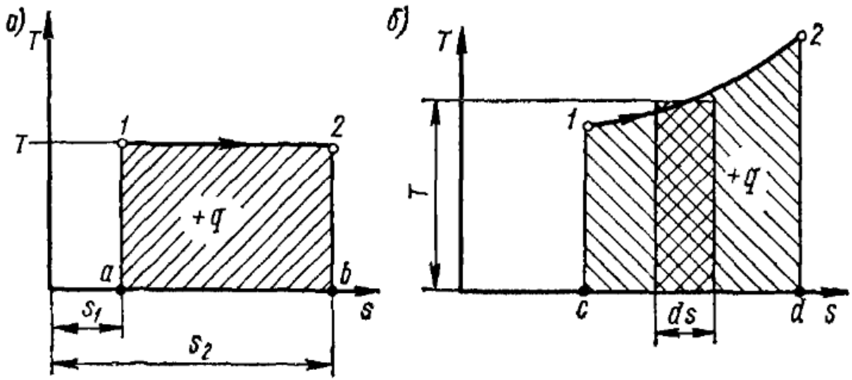
$$\eta_t = (T_1 - T_2)/T_1 \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - T_2/T_1 \qquad (7)$$

Анализируя выражение (7) для прямого цикла Карно, приходим к следующим выводам:

1. Термический КПД цикла зависит только от температур горячего и холодного источников и не зависит от природы рабочего тела.
2. Значение термического КПД цикла тем больше, чем больше разность температур горячего и холодного источников.
3. Термический КПД цикла всегда меньше единицы.
4. Термический КПД цикла Карно при изотермических источниках имеет максимальное значение в заданном интервале температур по сравнению с другими циклами и, следовательно, является эталоном, с которым сравнивают циклы существующих тепловых машин.

Реальный тепловой двигатель тем совершеннее, чем ближе значение его КПД к КПД цикла Карно в том же интервале температур.

Понятие энтропии позволяет ввести очень удобную для исследования термодинамических процессов и циклов – диаграмму состояний, в которой по оси абсцисс откладывают значения энтропии, по оси ординат – абсолютную температуру, условно принимают энтропию равной нулю в каком-либо состоянии тела.

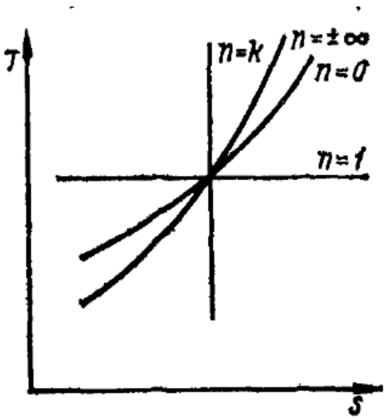


В *Ts*-диаграмме состояние рабочего тела изображается точками, термодинамические процессы – линиями, а теплота, участвующая в процессе, площадью под линией процесса.

В процессе подвода теплоты *1-2* при постоянной температуре (рис. а) имеем

$$s_2 - s_1 = q/T \quad \text{или} \quad q = T\left(s_2 - s_1\right)$$

В *Ts*-диаграмме графически можно изобразить все термодинамические процессы: изотермы ($n = 1$) – горизонтальные линии, адиабаты ($n = k$) – вертикальные, изохоры и изобары изображаются линиями, которые описываются уравнениями:



$$ds = \left[\frac{dq}{T}\right]_{v=\text{const}} \quad ; \quad ds = \left[\frac{dq}{T}\right]_{p=\text{const}}$$

Например, для 1 кг идеального газа изменение энтропии при изменении температуры от T_1 до T_2 составит

$$\Delta s_{v=const} = \int_1^2 \left[\frac{dq}{T}\right]_{v=const} = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} = c_v \ln\frac{T_2}{T_1}$$

Например, для 1 кг идеального газа изменение энтропии при изменении температуры от T_1 до T_2 составит

$$\Delta s_{v=const} = \int_1^2 \left[\frac{dq}{T}\right]_{v=const} = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} = c_v \ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$\Delta s_{p=const} = \int_1^2 \left[\frac{dq}{T}\right]_{p=const} = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} = c_p \ln\frac{T_2}{T_1}$$

Т.к. $c_p > c_v$ ($c_p - c_v = R$), то изобары в *Ts*-диаграмме более пологи, чем изохоры