



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 5. Второй закон термодинамики



Второй закон термодинамики так же, как и первый, не имеет никаких доказательств, кроме человеческого опыта в земных условиях. Если первый закон термодинамики количественно характеризует термодинамические процессы, то второй закон термодинамики дает качественную их оценку. Он отвечает на вопросы, в каком направлении и до какого предела идет тот или иной процесс, при каких условиях возможно преобразование теплоты в работу, что необходимо для передачи теплоты от холодного тела к горячему, что характеризует реальные процессы и т.п.



Поскольку в природе происходит множество термодинамических процессов, то единой формулировки второго закона термодинамики быть не может. Однако к каждому классу этих процессов можно дать свою трактовку второго закона термодинамики.

Вот некоторые из формулировок второго закона термодинамики, данные разными авторами.

Р. Клаузиус: Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более нагретому телу.



В. Томсон – лорд Кельвин: В круговом процессе теплота горячего источника не может быть полностью превращена в работу.

В. Томсон – лорд Кельвин: Наиболее холодное тело системы не может служить источником работы.

Л.Больцман: Все естественные процессы являются переходом системы от менее вероятных состояний к более вероятным состояниям.

Л.Больцман: Любой реальный процесс необратим.



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



Изучение второго закона термодинамики возможно только на конкретных процессах. Применительно к этим процессам и даются формулировки второго закона термодинамики. Поэтому изложение материала по этой теме идет параллельно со знакомством с новыми термодинамическими процессами и изучением второго закона термодинамики, объясняющего возможность и особенности прохождения этих процессов.



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*.

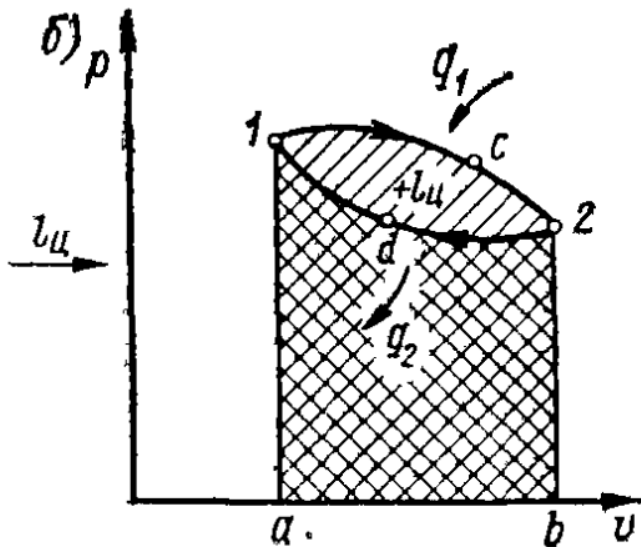
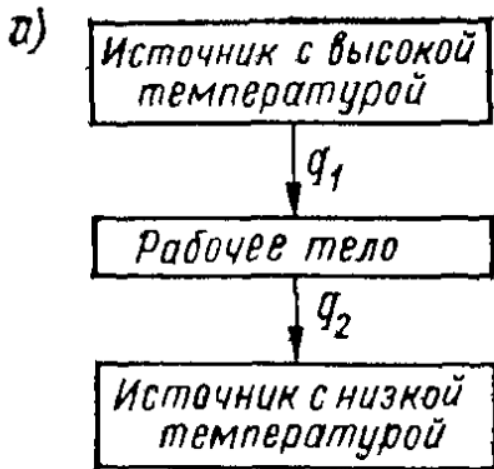
Циклы подразделяются на *прямые* и *обратные*.

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 и тепловые насосы).

Циклы могут состоять из различных процессов. Внутренне равновесные циклы могут изображаться во всех термодинамических диаграммах.



1-c-2 – расширение
2-d-1 – сжатие



Полезная работа цикла равна разности работ расширения и сжатия:

$$l_{\text{ц}} = l_{\text{р}} - |l_{\text{сж}}|. \quad (5.1)$$

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

$$l_{\text{ц}} = q_1 - |q_2|. \quad (5.2)$$



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

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}. \quad (5.3)$$

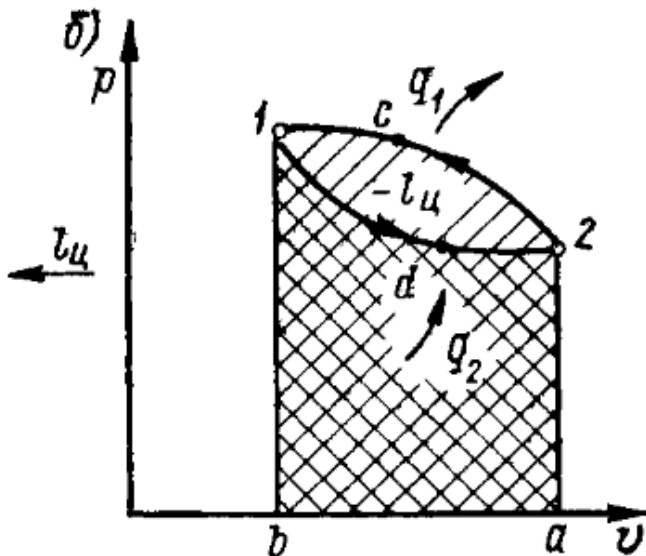
Таким образом, термический КПД показывает долю теплоты, превращаемой в полезную работу, $0 \leq \eta_t < 1$.



а)



б)



1-d-2 – расширение
2-c-1 – сжатие



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 $|l_{\text{ц}}|$.
Для рассматриваемого кругового процесса $1-d-2-c-1$, $\Delta u = 0$, поэтому $\Sigma q = |l_{\text{ц}}|$, или

$$|l_{\text{ц}}| = |q_1| - q_2. \quad (5.4)$$



Эффективность обратных обратимых циклов, в зависимости от их предназначения, характеризуют следующие коэффициенты:

Холодильный цикл, где нижний уровень температур обычно находится ниже температуры окружающей среды, характеризуется *холодильным коэффициентом*:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{|l_{\text{ц}}|}. \quad (5.5)$$



Этот коэффициент показывает, какое количество теплоты можно отвести от низкотемпературного источника, затратив единицу работы.

Холодильный коэффициент может быть как меньше, так и больше единицы:

$$0 \leq \varepsilon \leq \infty.$$



Отопительный цикл, где нижний уровень температур обычно соответствует температуре окружающей среды, а верхний - температуре потребителя теплоты, характеризуется отопительным коэффициентом:

$$\varepsilon = \frac{q_1}{|l_{\text{ц}}|}. \quad (5.6)$$

где q_1 - теплота, подведенная к потребителю (полезный продукт), $l_{\text{ц}}$ - работа, затраченная на осуществление цикла (затраты на получение полезного продукта).



Отопительный коэффициент всегда больше единицы.

Хотя отопительный и холодильный коэффициенты больше единицы, противоречий ни с первым, ни со вторым законами термодинамики нет. Эти коэффициенты нельзя называть КПД, поскольку полезного действия в виде работы в обратных циклах нет. В этом случае мы получаем теплоту более высокого температурного потенциала за счет преобразования работы в теплоту.



Для КПД мы не можем иметь величину даже равную единице, т.е. целиком преобразовать q_1 в работу нельзя, обязательно должны быть потери теплоты q_2 .

Исходя из вышесказанного для обратных циклов, получаем следующую трактовку второго закона термодинамики:

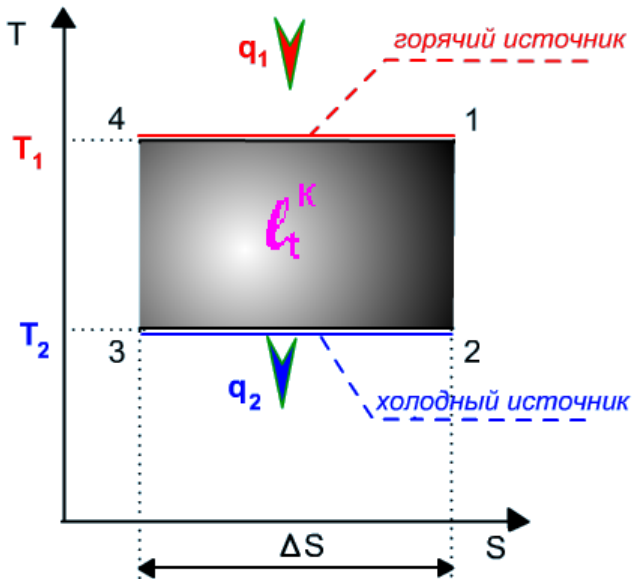
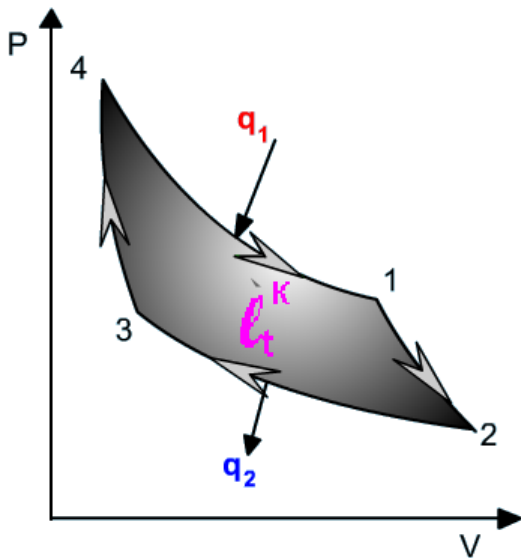
Для передачи теплоты от холодного тела к горячему необходим дополнительный компенсационный процесс (например, совершение работы).



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 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 $T_1 = \text{const}$ и $T_2 = \text{const}$, так как предполагается, что источники теплоты обладают большим количеством энергии и что подвод или отвод некоторого количества теплоты не изменяет их температуры.





Термический КПД любого прямого цикла определяется по формуле (5.3).

Теплота q_1 , подводимая к рабочему телу (идеальному газу) в изотермическом процессе 4-1, может быть выражена формулой:

$$q_1 = RT_1 \ln \left(\frac{v_1}{v_4} \right). \quad (5.6)$$



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

$$|q_2| = RT_2 \ln \left(\frac{v_2}{v_3} \right). \quad (5.7)$$

Следовательно, формула (5.3) преобразуется к виду:

$$\eta_t = \frac{RT_1 \ln \left(\frac{v_1}{v_4} \right) - RT_2 \ln \left(\frac{v_2}{v_3} \right)}{RT_1 \ln \left(\frac{v_1}{v_4} \right)}. \quad (5.8)$$



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

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

Сравнивая эти уравнения, получаем

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



Заменив в уравнении (5.8) $\frac{v_3}{v_4}$ на $\frac{v_2}{v_1}$, после преобразований получим

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.9)$$

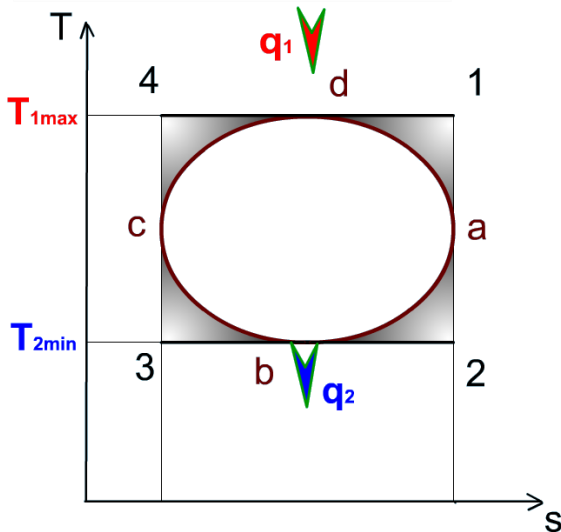
Анализируя выражение (5.9) для прямого цикла Карно, приходим к следующим выводам:



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.

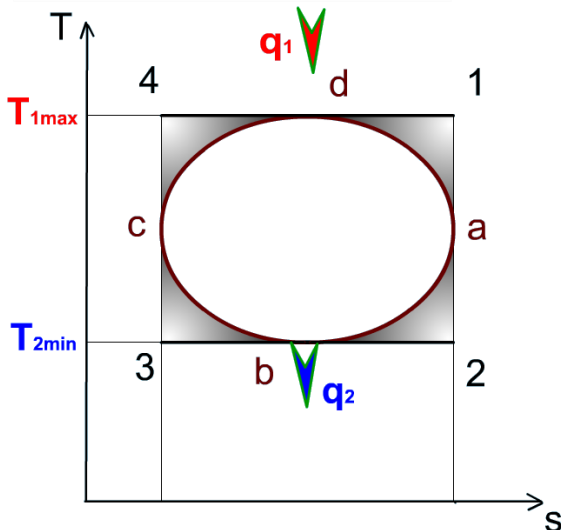


4. Термический КПД цикла Карно при изотермических источниках имеет максимальное значение в заданном интервале температур по сравнению с другими циклами и, следовательно, является эталоном, с которым сравнивают циклы существующих тепловых машин. Реальный тепловой двигатель тем совершеннее, чем ближе значение его КПД к КПД цикла Карно в том же интервале температур.



Четвертое положение
легко доказать, показав
сравниваемые циклы в
 T, s диаграмме. Сравним
термический КПД
произвольного цикла
 $abcda$ (η_t) с КПД цикла
Карно 12341 (η_t^K),

проходящего в интервалах максимальной T_{1max} и
минимальной T_{2min} температур данного цикла
 $abcda$.



Из рисунка видно, что $q_1^K > q_1$ на величину площади $1ad$ и $4dc$, а $q_2 > q_2^K$ на величину площади $a2b$ и $3cb$. В

результате имеем $\frac{q_2}{q_1} > \frac{q_2^K}{q_1^K}$,

следовательно, получаем соотношение:

$$\eta_t^K = 1 - \frac{q_2^K}{q_1^K} > \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \quad (5.10)$$

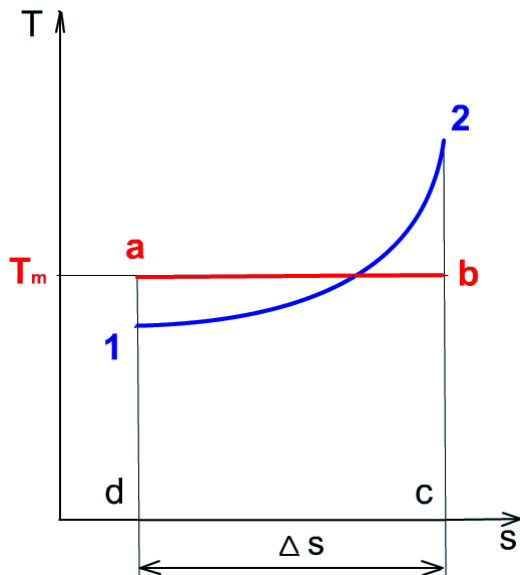


Термический КПД цикла Карно зависит только от температур горячего и холодного источников теплоты (T_1 и T_2). Зная температуры цикла Карно, легко определить его КПД и сопоставить его с КПД другого цикла Карно.



Любой обратимый цикл можно представить в виде *эквивалентного цикла Карно*, т.е. цикла с такими же q_1 и q_2 , а соответственно и с такой же работой и термическим КПД, как у исходного цикла. Понятие эквивалентного цикла Карно позволяет сопоставить между собой термические КПД различных по конфигурации обратимых циклов, используя только T_1 и T_2 .

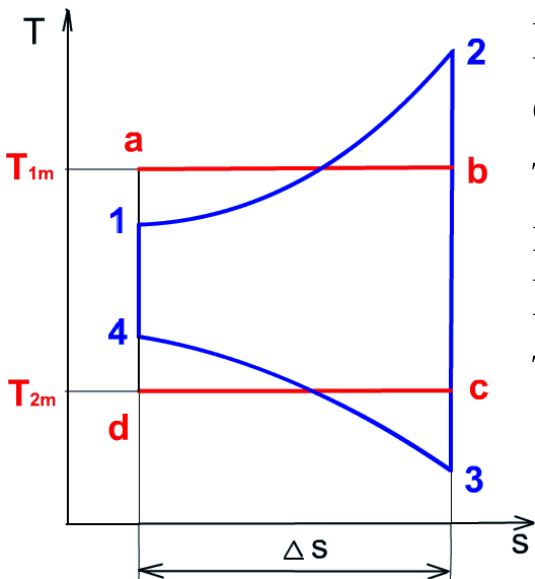
Для преобразования произвольного обратимого цикла в эквивалентный цикл Карно вводится понятие среднетермодинамической температуры.



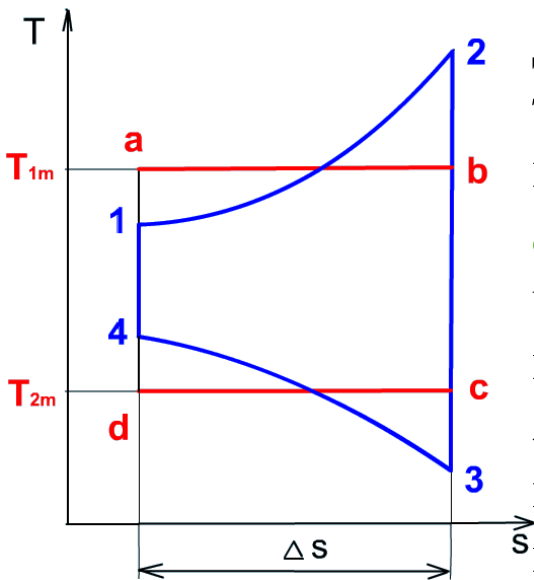
Среднетермодинамической температурой T_m называется частное от деления теплоты процесса на изменение его энтропии:

$$T_m = \frac{q}{\Delta S}. \quad (5.11)$$

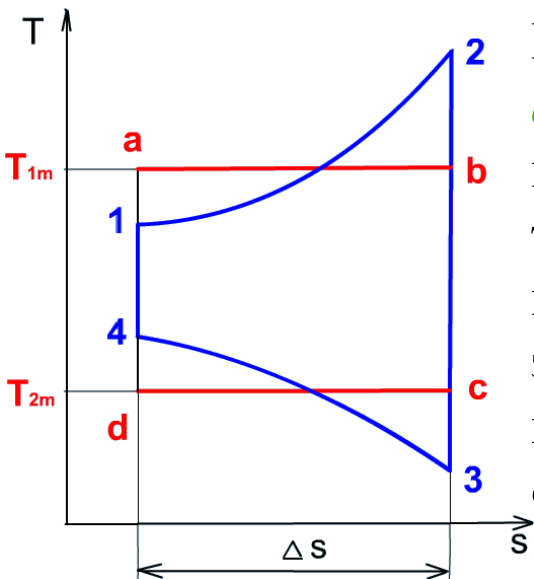
В диаграмме T, s значению T_m соответствует высота прямоугольника $abcd$, равновеликого площади $12cd$.



Используя понятие среднетермодинамической температуры, представим в виде эквивалентного цикла Карно произвольный обратимый цикл **1234**.



Для этого процесс подвода теплоты в цикл **12** заменим изотермическим процессом **ab** со среднетермодинамической температурой T_{1m} , а процесс отвода теплоты **34** заменим изотермическим процессом **cd** со среднетермодинамической температурой T_{2m} .



Полученный цикл Карно *abcd* имеет q_1 и q_2 , равные подведенной и отведенной теплоте рассматриваемого цикла *1234*, т.е. это эквивалентные циклы, для которых термический КПД определяется по формуле

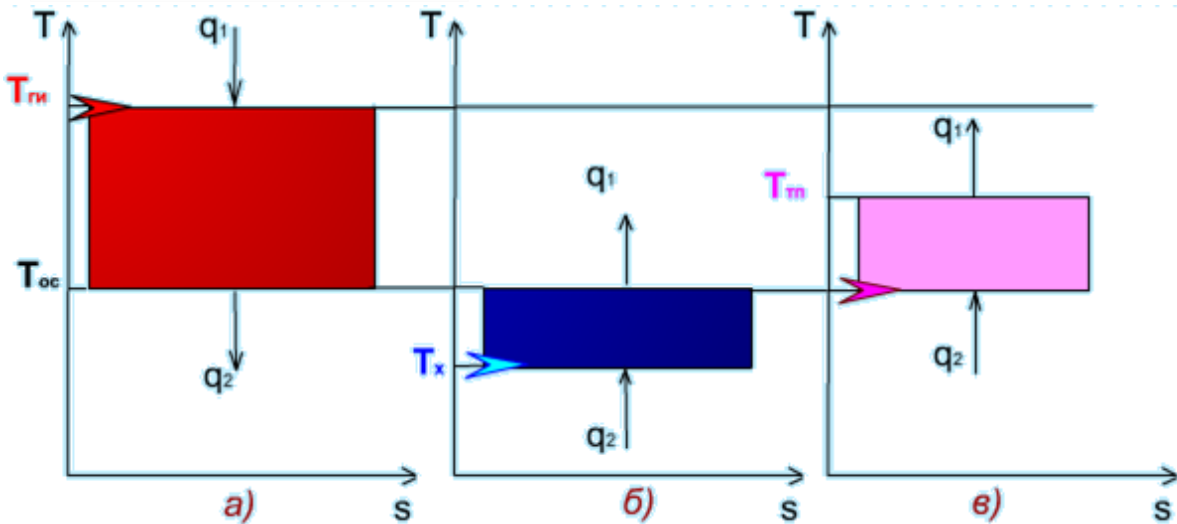
$$\eta_t = 1 - \frac{T_{2m}}{T_{1m}}$$



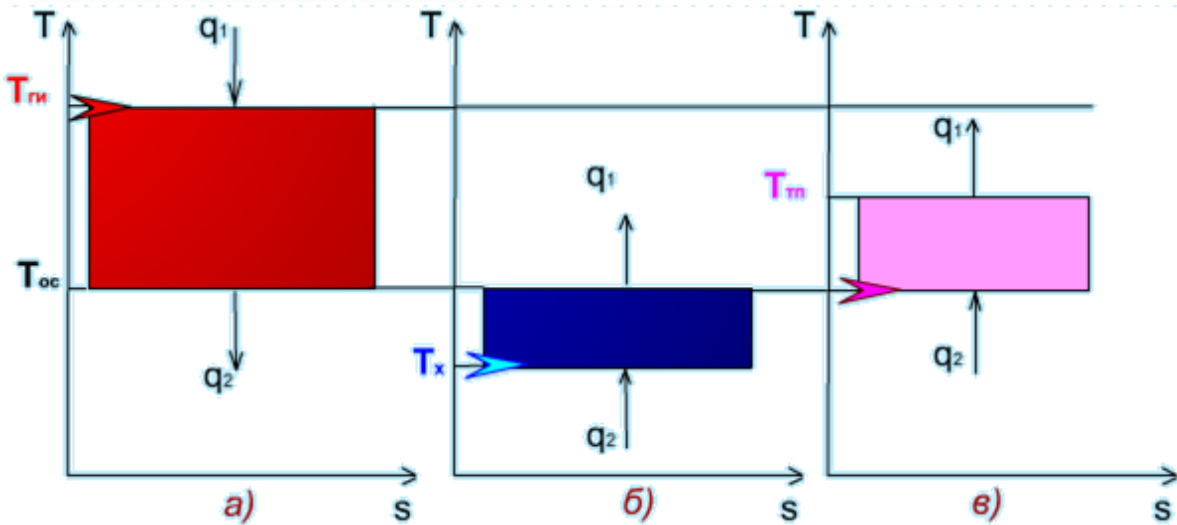
Цикл Карно с протеканием процессов против часовой стрелки называется обратным. Это цикл холодильных машин и тепловых насосов.

Для наглядности сравнения различных типов цикла Карно на рисунке в диаграмме T, s представлены: а) цикл двигателя, б) цикл холодильной машины, в) цикл теплового насоса.

Для всех циклов окружающая среда выступает в зависимости от их назначения в виде горячего или холодного источника теплоты с температурой T_{oc} .



В отличие от цикла двигателя (рис. а), где окружающая среда выступает в качестве холодного источника теплоты, в цикле Карно



холодильной машины (рис. б) окружающая среда является горячим источником теплоты.

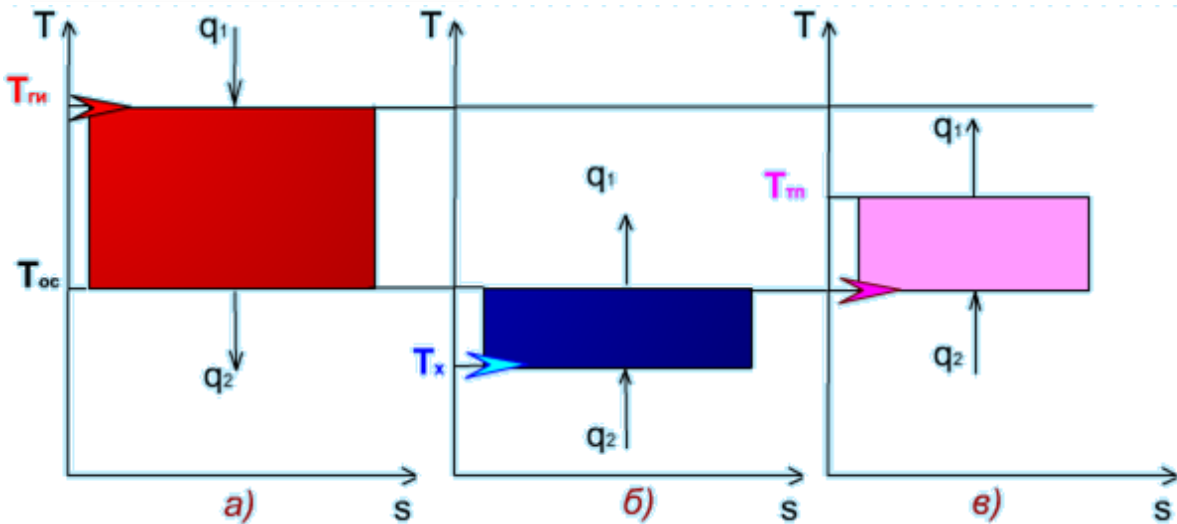


В холодильной установке осуществляется обратный цикл Карно, в котором рабочее тело забирает теплоту q_2 от охлаждаемого тела с температурой T_x и отдает теплоту q_1 в окружающую среду с температурой $T_{oc} > T_x$. Для осуществления передачи теплоты от холодного тела к теплomu затрачивается работа ℓ_t , которая, преобразуясь в теплоту $q_1 = \ell_t + q_2$, вместе с q_2 передается окружающей среде. При заданных температурах охлаждаемого тела и окружающей среды обратный цикл Карно будет самым экономичным циклом холодильной установки.



Его холодильный коэффициент определяется только температурами T_{oc} и T_x и рассчитывается как

$$\varepsilon_t^K = \frac{q_2}{\ell_t} = \frac{T_x}{T_{oc} - T_x}. \quad (5.12)$$



В тепловом насосе тоже осуществляется обратный цикл Карно (рис. в), но в этом цикле окружающая среда выступает в роли холодного источника теплоты.



При работе теплового насоса теплота внешней среды q_2 за счет совершения работы l_t передается потребителю теплоты с температурой $T_{тп} > T_{ос}$, при этом работа l_t преобразуется в теплоту и общее количество теплоты, полученное потребителем, будет представлено величиной

$$q_1 = l_t + q_2.$$



Коэффициент преобразования теплоты, характеризующий эффективность цикла Карно теплового насоса, определяется только температурами T_{oc} и T_{mn} , и рассчитывается как

$$\varphi_t^K = \frac{q_1}{\ell_t} = \frac{T_{тп}}{T_{тп} - T_{oc}}. \quad (5.13)$$

Холодильный коэффициент (5.12) и коэффициент преобразования теплоты (5.13) в циклах Карно при заданной температуре окружающей среды T_{oc} возрастают при увеличении T_x и уменьшении $T_{тп}$.



Обратимые циклы Карно холодильной машины и теплового насоса при постоянных температурах источников теплоты T_{oc} и T_x или T_{oc} и $T_{тп}$ имеют наибольшую экономичность по сравнению с другими циклами с такими же источниками теплоты.

Анализируя обратный цикл Карно, можно привести следующие формулировки второго закона термодинамики:



Передать теплоту от холодного тела к горячему возможно только при затрате работы или другого компенсационного процесса; самопроизвольный переход теплоты от холодного тела к горячему невозможен.

Осуществить на практике обратимый цикл Карно невозможно, поскольку в природе не существует обратимых процессов, но он является эталоном экономичности, к которому должны стремиться реальные циклы с изотермическими источниками теплоты.



Поскольку большинство реальных циклов имеют источники теплоты с переменной температурой, то для получения эквивалентного цикла Карно при таких источниках теплоты пользуются понятием среднетермодинамической температуры и сравнивают его с эталонным циклом Карно.