Основные термодинамические процессы идеального газа

В технической термодинамике изучаются следующие основные термодинамические процессы:
изохорный,
изобарный,
изотермический,
адиабатный
политропный.

Охарактеризуем по приведенной выше схеме каждый из перечисленных термодинамических процессов.

Изохорный процесс

Процесс, протекающий при постоянном объеме, называется **изохорным.**

Кривая процесса называется **изохорой.**

1) Уравнение процесса $\boldsymbol{v = const}$.

2) Связь параметров вытекает из уравнения Клапейрона-Менделеева, записанного для двух состояний:

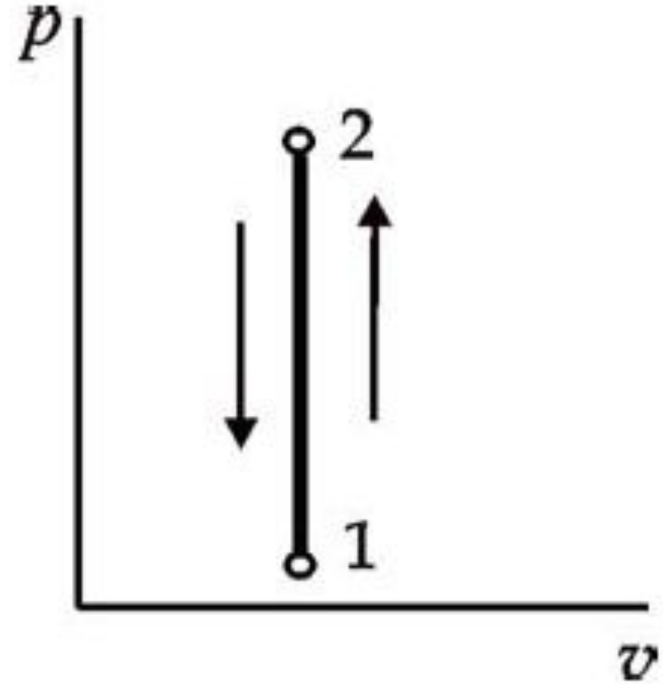
$$p_1 v_1 = RT_1, \; p_2 \cdot v_2 = RT_2.$$

Откуда:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Зако́н Ша́рля

3) По графику процесса в координатах p-v видно, что площадь под изохорой равна нулю. На графике процесс 1-2 – подвод тепла; процесс 2-1 – отвод тепла.



Аналитический метод определения работы газа при v = const дает тот же результат - работа равна нулю, так как dv = 0:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0.$$

4) Изменение внутренней энергии из

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1).$$

5) Изменение энтальпии

$$\Delta h = c_p(T_2 - T_1).$$

6) Изменение энтропии

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{dh}{T} = \frac{c_p dT}{T};$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

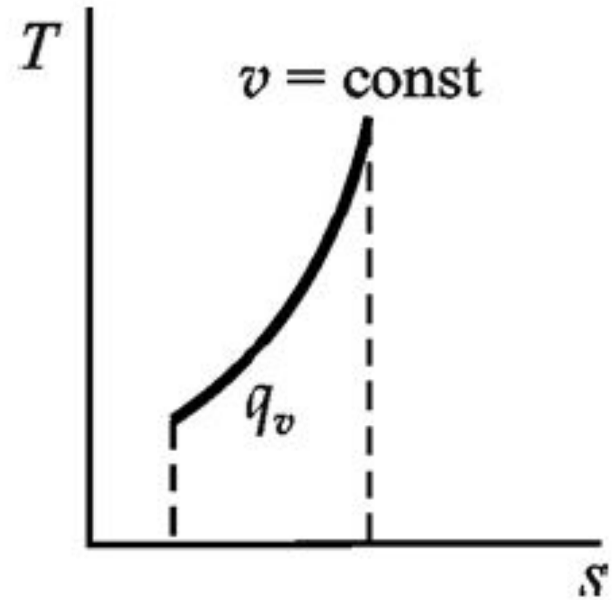
7) По первому закону термодинамики количество теплоты, участвующее в процессе:

$$dq = du + dl.$$

Так как

$$dl = 0,\ dq = du;\ q = \Delta u$$

Графический метод определения количества теплоты, участвующей в процессе, предусматривает построение графика процесса в координатах $T - s$. Количество теплоты, подведенной (или отведенной) к системе в изохорном процессе, численно равно площади под изохорой.



Изобарный процесс

Процесс, протекающий при постоянном давлении, называют **изобарным.** Кривая процесса называется **изобарой.**

1) Уравнение процесса p = const;

2) Связь параметров вытекает из уравнения Клапейрона-Менделеева, записанного для двух состояний:

$$p_1 v_1 = RT_1, p_2 v_2 = RT_2$$

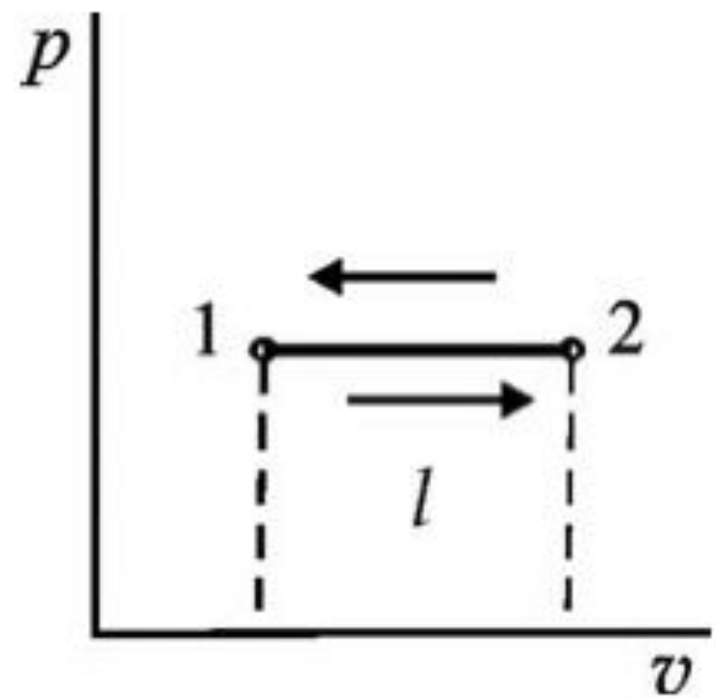
Откуда:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Закон Гей-Люссака

3) По графику процесса в координатах *p-v* работа изменения объема численно равна площади под изобарой. На графике: процесс 1-2 – подвод тепла;
процесс 2-1 – отвод тепла.
Аналитический метод определения удельной работы газа при p = const:

$$l = p\int^{v_2} dv = p(v_2 - v_1)$$



4) Изменение внутренней энергии $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$.

5) Изменение энтальпии $\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$.

6) Изменение энтропии

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{dh}{T} = \frac{c_p dT}{T};$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

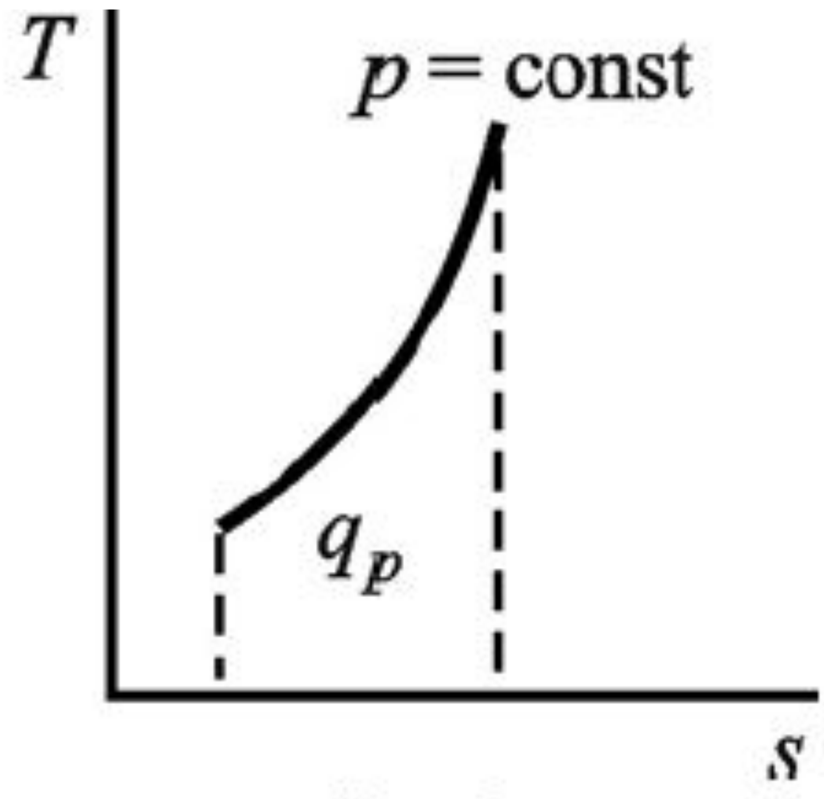
7) По первому закону термодинамики количество теплоты участвующее в процессе:

$$dq = dh - v dp.$$

Так как $dp = 0$, $dq = dh$;

$$q = \Delta h$$

Графический метод определения количества теплоты, участвующей в процессе, предусматривает построение графика процесса в координатах $T - s$. Количество теплоты, подведенной (или отведенной) к системе в изобарном процессе, численно равно площади под изобарой.



Изотермический процесс

Процесс, протекающий при постоянной температуре, называют **изотермическим (*T = const, dT = 0*).** Кривая процесса называется изотермой.

1) Уравнение процесса T = const; (p · v = const)

2) Связь параметров вытекает из уравнения Клапейрона-Менделеева, записанного для двух состояний: $p_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1, \quad p_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2 = const$

Откуда: $\dfrac{p_1 v_1}{p_2 v_2} = 1, \qquad \dfrac{p_1}{p_2} = \dfrac{v_2}{v_1}$ (закон Бойля-Мариотта).

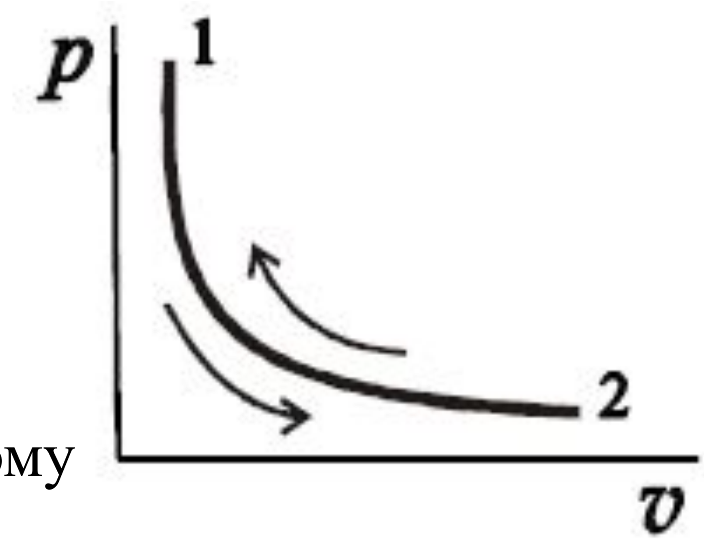
3) По графику процесса в координатах *p-v* работа изменения объема численно равна площади под изотермой:

процесс 1-2 – подвод тепла;

процесс 2-1 – отвод тепла.

Аналитический метод определения удельной работы газа при $T = const$:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv,$$



Из уравнения изотермы имеем

$pv = p_1 v_1$, или $p = \frac{p_1 v_1}{v}$, поэтому

$$l = \int_{v_1}^{v_2} RT \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

4) Изменение внутренней энергии $\Delta u = 0$.

5) Изменение энтальпии $\Delta h = 0$.

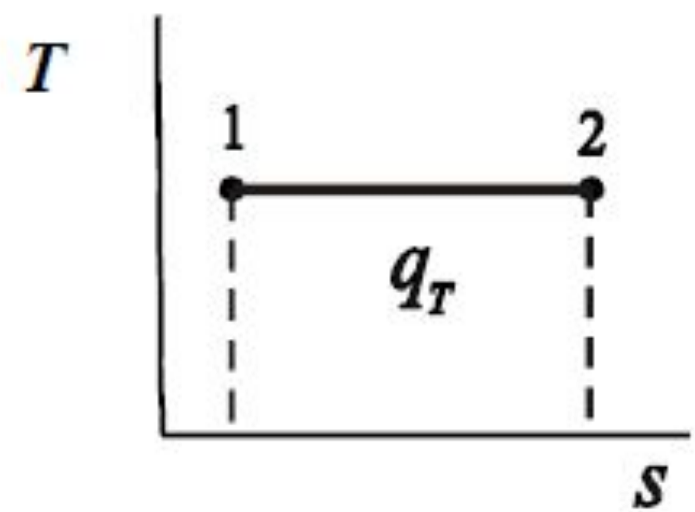
6) Количество теплоты, определенное аналитическим методом по первому

закону термодинамики: $dq = du + dl;\ q = l$

7) Изменение энтропии:

$$ds = \frac{dq}{T};\ \Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \frac{q}{T} = R\ln\frac{v_2}{v_1} = R\ln\frac{p_1}{p_2}.$$

По графику процесса в координатах $T - s$ количество теплоты, участвующее в изотермическом процессе, численно равно площади под изотермой, т.е. $q = T(s_2 - s_1)$.



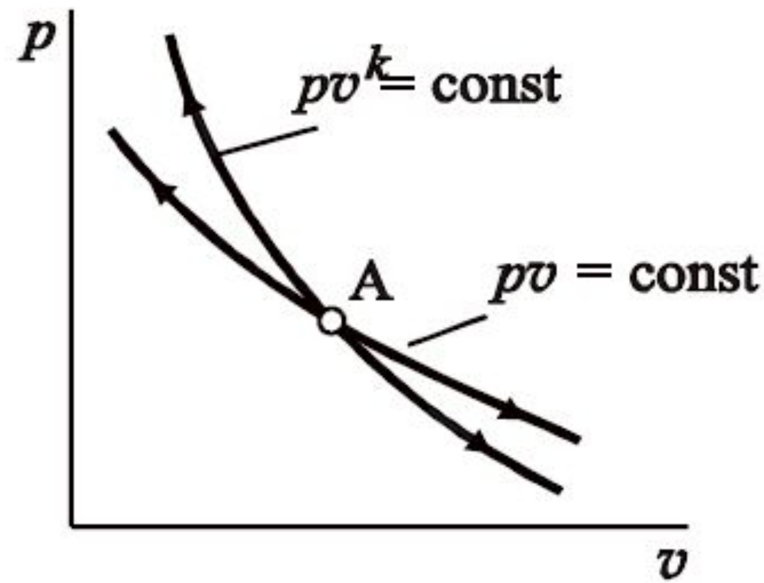
Адиабатный процесс

Процесс, протекающий без подвода или отвода теплоты, т.е. при отсутствии теплообмена рабочего тела с окружающей средой, называют **адиабатным,** кривая этого процесса называется **адиабатой.**

1) Уравнение процесса $p \cdot v^k = const$.

2) Связь параметров $\frac{p_1}{p_2} = (\frac{v_2}{v_1})^k$; $\frac{T_2}{T_1} = (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k-1}{k}}$; $\frac{T_2}{T_1} = (\frac{v_1}{v_2})^{k-1}$

3) Адиабата в координатах *p* - *v* идет круче изотермы, так как k > 1:



Работа изменения объема, определенная графическим методом, численно равна площади под адиабатой.

4) Изменение внутренней энергии $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$.

5) Изменение энтальпии $\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$.

6) Количество теплоты

$$dq = du + dl = 0.$$

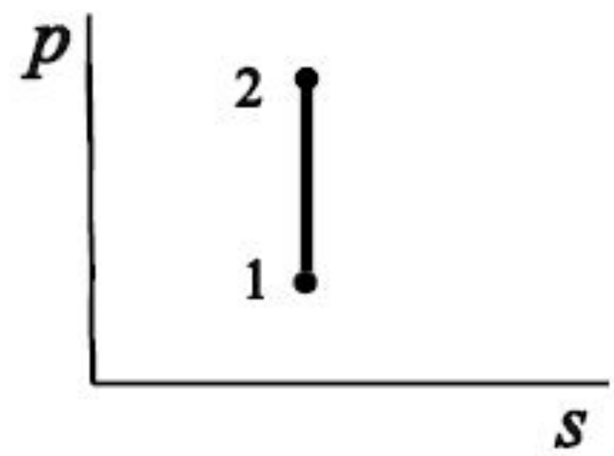
Работа совершается за счет убыли внутренней энергии: $dl = -du$.

$$l = -\Delta u = -c_v(T_2 - T_1) = c_v(T_1 - T_2)$$

$$l = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{k-1}.$$

7) Изменение энтропии $ds = \dfrac{dq}{T} = 0$, следовательно, s = const.

На графике в координатах *p – s:*
адиабата расширения – сверху вниз (2-1),
адиабата сжатия – снизу вверх (1-2).



Политропный процесс

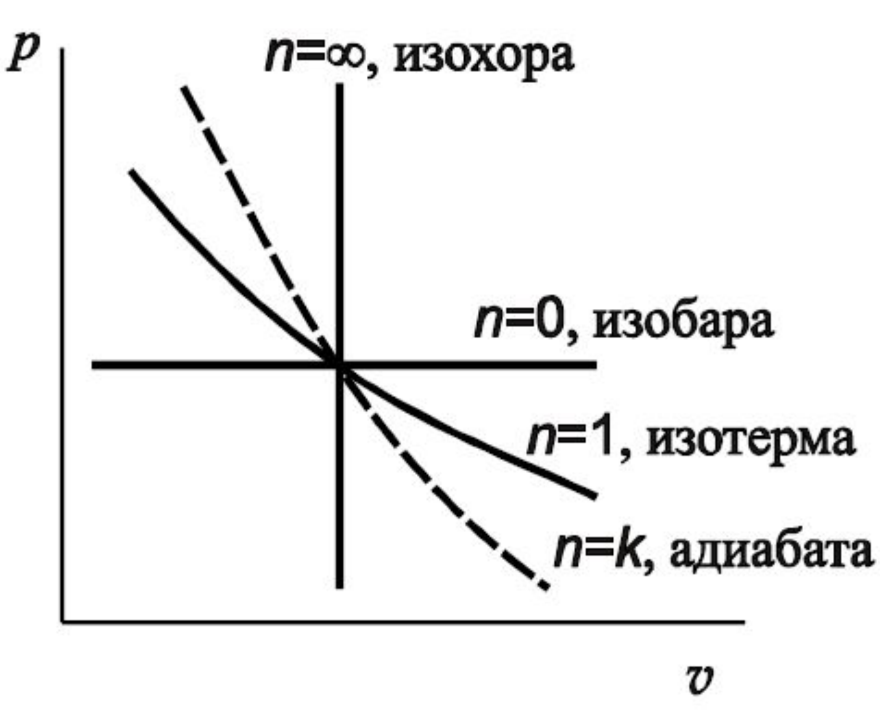
Всякий процесс идеального газа, в котором удельная теплоемкость является постоянной величиной, называют **политропным процессом, а кривую** процесса – **политропой.**

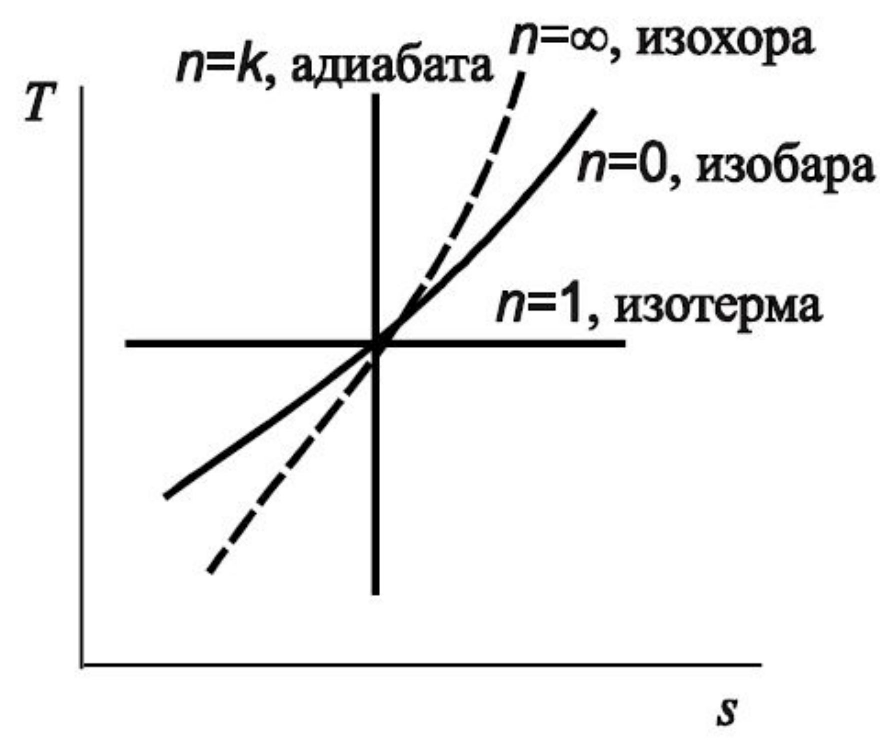
Термодинамические процессы – изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный, если они протекают при постоянной удельной теплоемкости, являются частными случаями политропного процесса.

1) Уравнение процесса $pv^n = \text{const}$.

Показатель политропы ***n*** принимает для каждого процесса определенное значение:

Изохорный: $\boldsymbol{n} = \pm\infty$;
Изобарный: $\boldsymbol{n} = 0$;
Изотермический: $\boldsymbol{n} = 1$;
Адиабатный: $\boldsymbol{n} = k$.





2) Связь параметров: $\frac{p_2}{p_1} = (\frac{v_1}{v_2})^n$; $\frac{T_2}{T_1} = (\frac{v_1}{v_2})^{n-1}$; $\frac{T_2}{T_1} = (\frac{p_2}{p_1})^{(n-1)/n}$.

3) Работа в политропном процессе по аналогии с адиабатным процессом равна:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1^n}{v^n} dv = p_1 v_1^n \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^n} = \frac{p_1 v_1^n}{1-n}(v_2^{1-n} - v_1^{1-n}) = \frac{1}{n-1}(\frac{p_1 v_1^n}{v_1^{n-1}} - \frac{p_2 v_2^n}{v_2^{n-1}}) = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

4) Изменение внутренней энергии $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$.

5) Изменение энтальпии $\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$.

6) Изменение энтропии

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_{\text{п}} dT}{T}. \quad \Delta s = \int_{T_1}^{T_2} c_{\text{п}} \frac{dT}{T} = c_{\text{п}} \ln\frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln\frac{T_2}{T_1}$$

7) Количества тепла, подведенного к рабочему телу

$$dq = c_{\text{п}} dT; \quad q = c_{\text{п}}(T_2 - T_1) = c_v \frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1)$$

Второй закон термодинамики

Закон, позволяющий указать направление теплового потока и устанавливающий максимально возможный предел превращения теплоты в работу в тепловых машинах, представляет собой **второй закон термодинамики.**

В 1850 году Р. Клаузиус :
«Теплота не может переходить от холодного тела к более нагретому сама собой без компенсации».

в 1851 г. В. Томсон: «Не вся теплота, полученная от теплопередатчика, может перейти в работу, а только некоторая ее часть. Часть теплоты должна быть отдана теплоприемнику».

В.Ф. Оствальд дал такую формулировку 2-го закона термодинамики: «Невозможно построить тепловую машину, которая имела бы КПД=1».

Тепловую машину, работающую при наличии одного лишь источника теплоты, В.Ф. Оствальд назвал *вечным двигателем второго рода (в отличие от вечного двигателя первого* рода, работающего вопреки закону сохранения работы).

Следовательно, для получения работы необходимо иметь источник теплоты с высокой температурой, или **теплопередатчик, и источник теплоты с** низкой температурой, или **теплоприемник.**

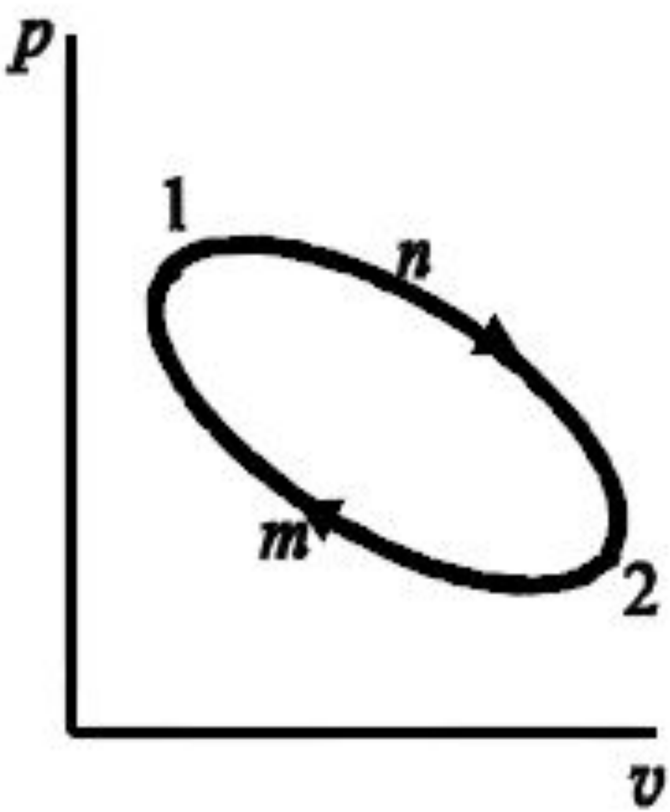
Круговые термодинамические процессы (циклы)

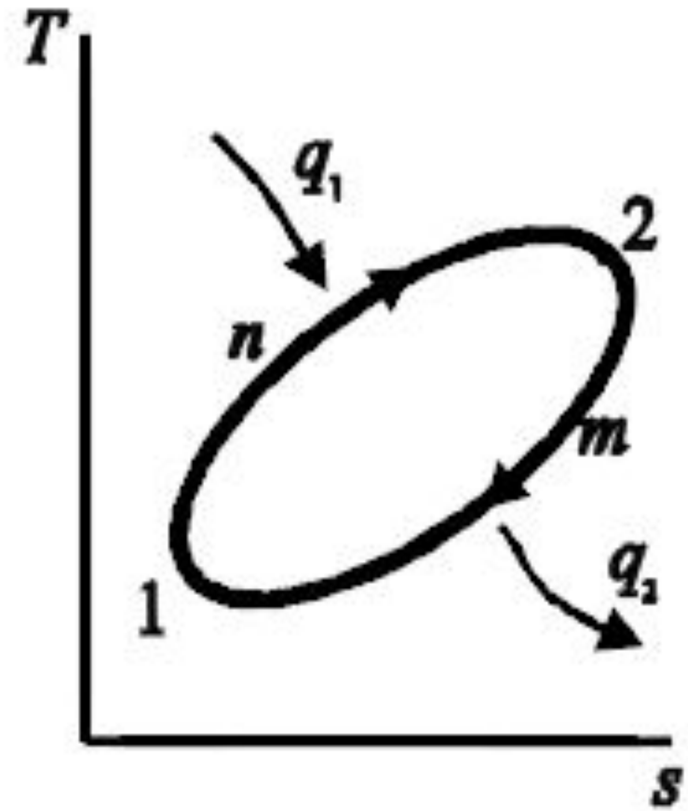
Для реализации процесса превращения теплоты в работу используют механизмы, которые называются тепловыми машинами или тепловыми двигателями.

При передаче какого-либо количества теплоты в случае однократного расширения газа в цилиндре можно получить лишь ограниченное количество работы.

При любом процессе расширения газа в цилиндре наступает момент, когда температура и давление рабочего тела становятся равными температуре и давлению окружающей среды. На этом совершение работы прекращается.

Для повторного совершения работы необходимо в процессе сжатия возвратить рабочее тело в первоначальное состояние, что сопровождается отводом теплоты и уменьшением энтропии

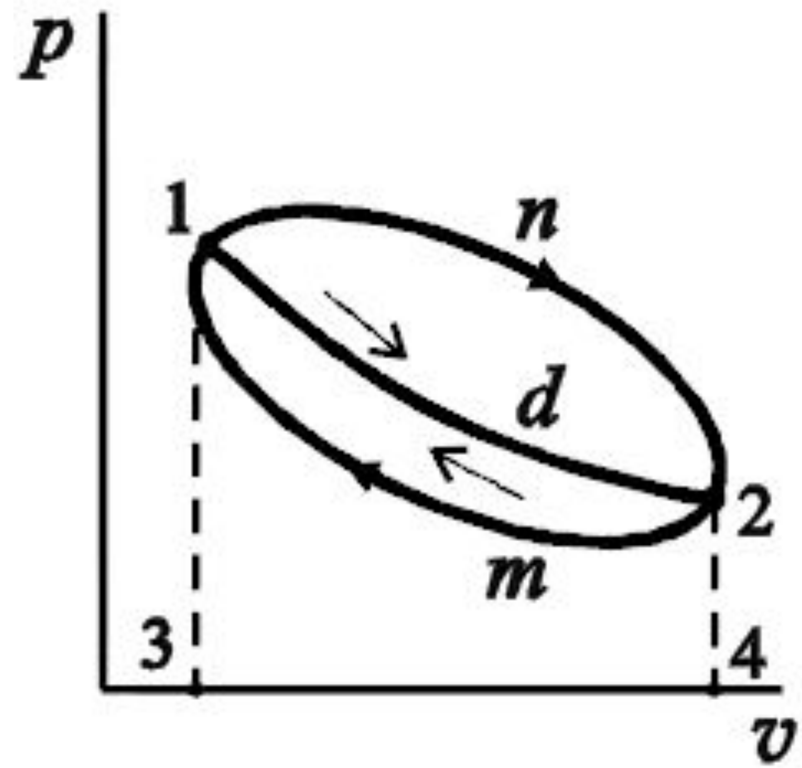




Если рабочее тело расширяется по кривой 1-*d-2, то оно* производит работу, изображаемую на *pv-диаграмме площадью 1d243*.

По достижении точки 2 рабочее тело должно быть возвращено в начальное состояние (в точку 1), для того, чтобы оно снова могло произвести работу.

Процесс возвращения тела в начальное состояние может быть осуществлен тремя путями.

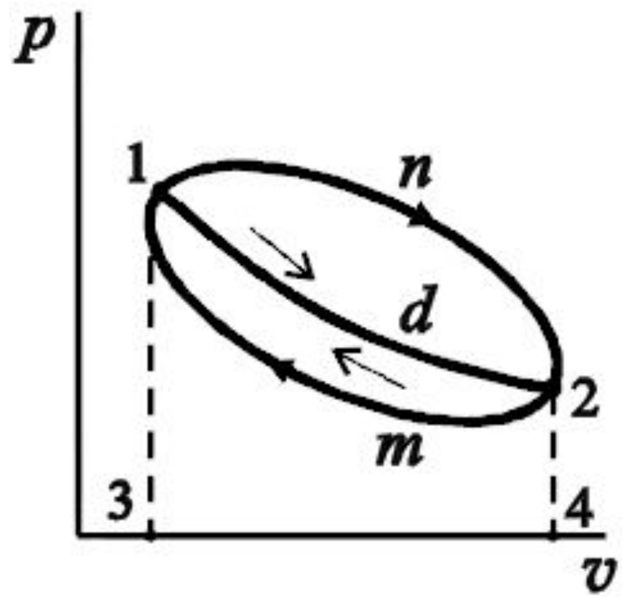


Процесс возвращения тела в начальное состояние может быть осуществлен тремя путями

1. Кривая сжатия 2-*d-1 совпадает с кривой* расширения 1-*d-2. Вся полученная при* расширении работа (площадь 1*d243) равна работе сжатия* (площадь 2*d134) и полезная работа равна нулю*.

2. Кривая сжатия 2-*n-1 располагается над линией* расширения 1-*d-2. На сжатие затрачивается* большее количество работы (площадь 42*n13), чем ее* будет получено при расширении (площадь 31*d24)*.

3. Кривая сжатия 2-*m-1 располагается под линией* расширения 1-*d-2. Работа расширения (площадь* 31*d24) будет больше работы сжатия (площадь 42m13). В результате вовне будет* отдана положительная работа, изображаемая площадью 1*d2m1 внутри* замкнутой линии кругового процесса, или цикла.



Повторяя цикл неограниченное число раз, можно за счет подводимой теплоты получить любое количество работы.

Цикл, в результате которого получается положительная работа, называется **прямым циклом (или циклом теплового двигателя). В нем** работа расширения больше работы сжатия.

Цикл, в результате которого расходуется работа, называется **обратным, в** нем работа сжатия больше работы расширения. По обратным циклам работают холодильные установки.

Циклы бывают обратимые и необратимые. Цикл, состоящий из равновесных обратимых процессов, называют **обратимым. Рабочее тело в** таком цикле не должно подвергаться химическим изменениям.

Если хоть один из процессов, входящих в состав цикла, является необратимым, то и весь цикл будет **необратимым.**

Эффективность работы любой тепловой машины может быть оценена коэффициентом полезного действия (термическим КПД) прямого цикла:

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

Чем больше η_t, тем большая часть подведенного удельного количества теплоты превращается в полезную работу. Термический КПД цикла всегда меньше единицы

КПД мог бы быть равным единице, если бы $q_1 \to \infty$

или $q_2 = 0$,чего осуществить нельзя:

$$\text{КПД} < 1; \text{ или } \eta_t < 1.$$

Нельзя создать тепловую машину с КПД > 1.

В обратном цикле от теплоприемника к рабочему телу подводится удельное количество теплоты q_2 и затрачивается удельная работа *l*, переходящая в равное удельное количество теплоты, которые вместе передаются теплопередатчику:

$$q_1 = q_2 + l.$$

Без затраты работы сам собой такой переход невозможен. Степень совершенства обратного цикла определяется так называемым холодильным коэффициентом цикла:

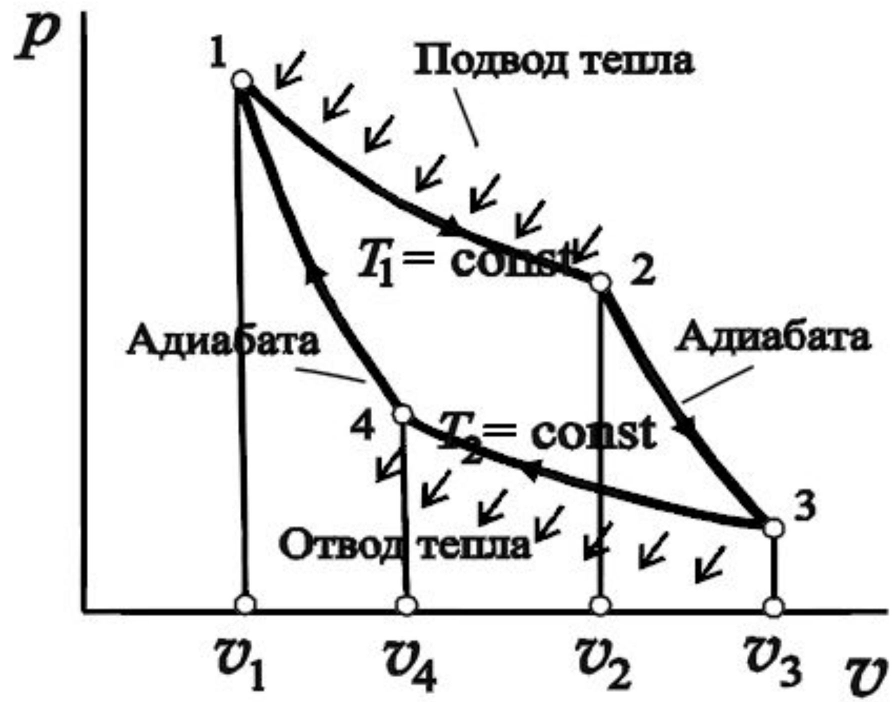
$$\varepsilon = \frac{q_2}{l}.$$

Холодильный коэффициент показывает, какое количество теплоты отнимается от теплоприемника при затрате одной единицы работы. Его величина, как правило, больше единицы.

Цикл Карно. Теорема Карно

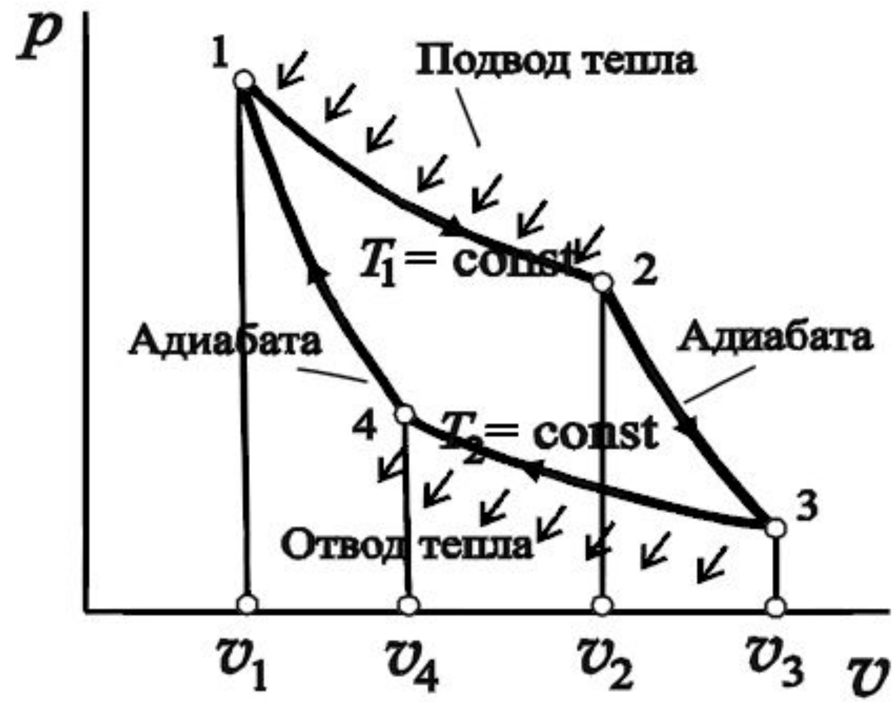
Согласно второму закону термодинамики для осуществления цикла должно быть как минимум два источника теплоты:

- верхний (теплопередатчик) с постоянной температурой T_1
- нижний (теплоприемник) *с постоянной* температурой T_2 $(T_2 < T_1)$.



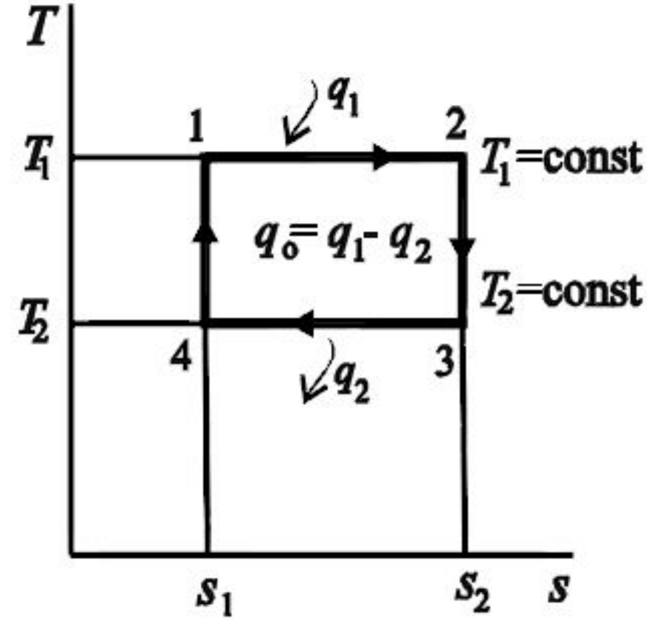
Простейший обратимый цикл должен состоять
из двух изотерм 1-2 и 3-4
и двух адиабат 2-3 и 4-1.

Такой цикл впервые был впервые предложен французским инженером С. Карно (1824 г.) и получил название **цикла Карно.**



Количество **подведенной** в цикле теплоты

$$q1 = \text{пл.}12s_2s_11 = T_1(s_2 - s_1),$$



отведенной:

$$q_2 = \text{пл.}34s_1s_23 = T_2(s_2 - s_1).$$

Термический КПД цикла Карно

$$\eta_t^K = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2(s_2 - s_1)}{T_1(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

зависит только от абсолютных температур верхнего и нижнего источников теплоты и не зависит от свойств рабочего тела, т.е. не зависит от того, будет ли рабочим телом идеальный или какой-либо другой газ. Это **теорема Карно.**

Величина термического КПД цикла Карно будет тем больше, чем выше температура теплопередатчика и ниже температура теплоприемника.

Его величина всегда меньше единицы, так как для получения КПД равного единице, необходимо, чтобы $T_2 = 0$ *или* $\mathrm{T}_1 = \infty$ *,*что неосуществимо.

При $\mathrm{T}_1 = T_2$ КПД равен нулю, т.е. если тела находятся в тепловом равновесии, то невозможно теплоту превратить в работу.

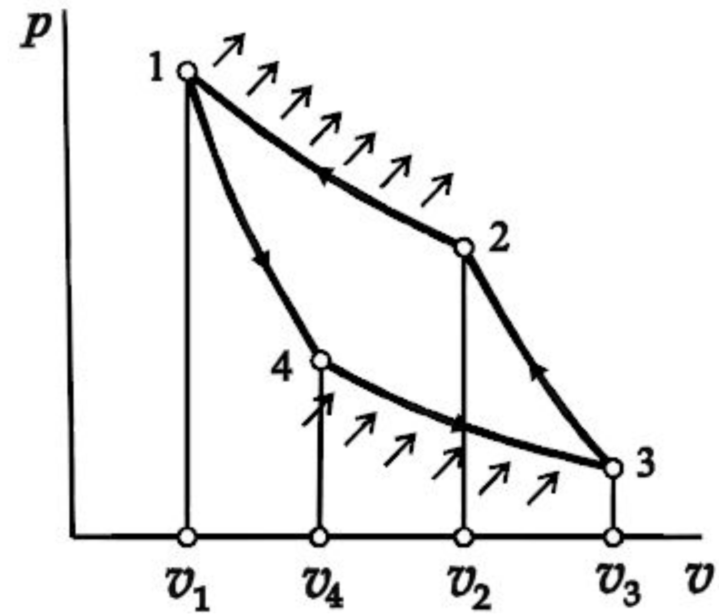
Обратный цикл Карно

Сжатый газ (т.1), расширяется по **адиабате 4-1**, производя работу, температура понижается от T_1 *до* T_2.

Затем осуществляется **изотермическое расширение 4-3** (T_2 = *const),* газ отбирает теплоту из холодного источника.

За счет работы, подводимой от какой-либо внешней машины, осуществляется процесс **адиабатного сжатия 3-2**, температура повышается от T_2 *до* T_1.

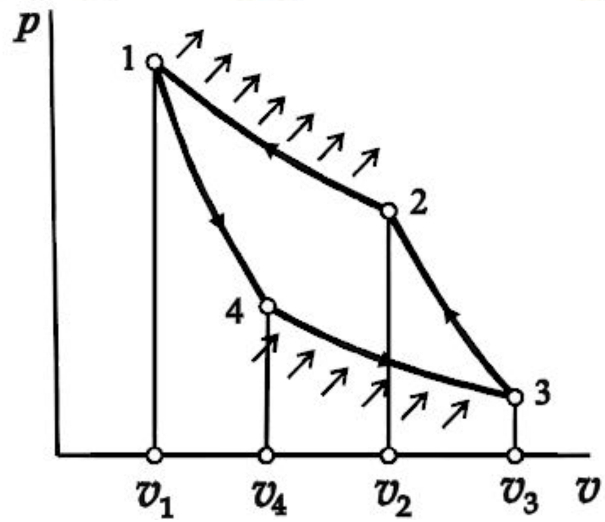
Процесс сжатия газа **2-1** осуществляется **по изотерме** T_1 = const с отводом теплоты к горячему источнику. В результате газ возвращается в исходную точку 1.



В результате осуществления обратного цикла теплота от холодного тела переходит к более нагретому за счет затраты работы извне l_0 эквивалентной пл.34123 и равной $l_0 = l_1 - l_2$.

Для обратного цикла Карно холодильный коэффициент

$$\varepsilon^K = \frac{1}{\dfrac{q_1}{q_2} - 1} = \frac{1}{\dfrac{T_1(s_3 - s_2)}{T_2(s_3 - s_2)} - 1} = \frac{1}{\dfrac{T_1}{T_2} - 1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$



Теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

Двигателем внутреннего сгорания (ДВС) называется тепловая машина, в которой непосредственно внутри рабочего цилиндра происходит превращение химической энергии топлива в механическую работу.

Все современные поршневые двигатели внутреннего сгорания разделяются на три группы:

1) с быстрым сгоранием топлива при постоянном объеме (**двигатель Отто**);

2) с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении (**двигатель Дизеля**);

3) со смешанным сгоранием топлива частично при постоянном объеме и частично при постоянном давлении (**двигатель Тринклера**).

Основные характеристики цикла двигателя внутреннего сгорания (безразмерные величины):

степень сжатия $\varepsilon = \dfrac{v_1}{v_2}$,

отношение начального удельного объема рабочего тела к его удельному объему в конце сжатия;

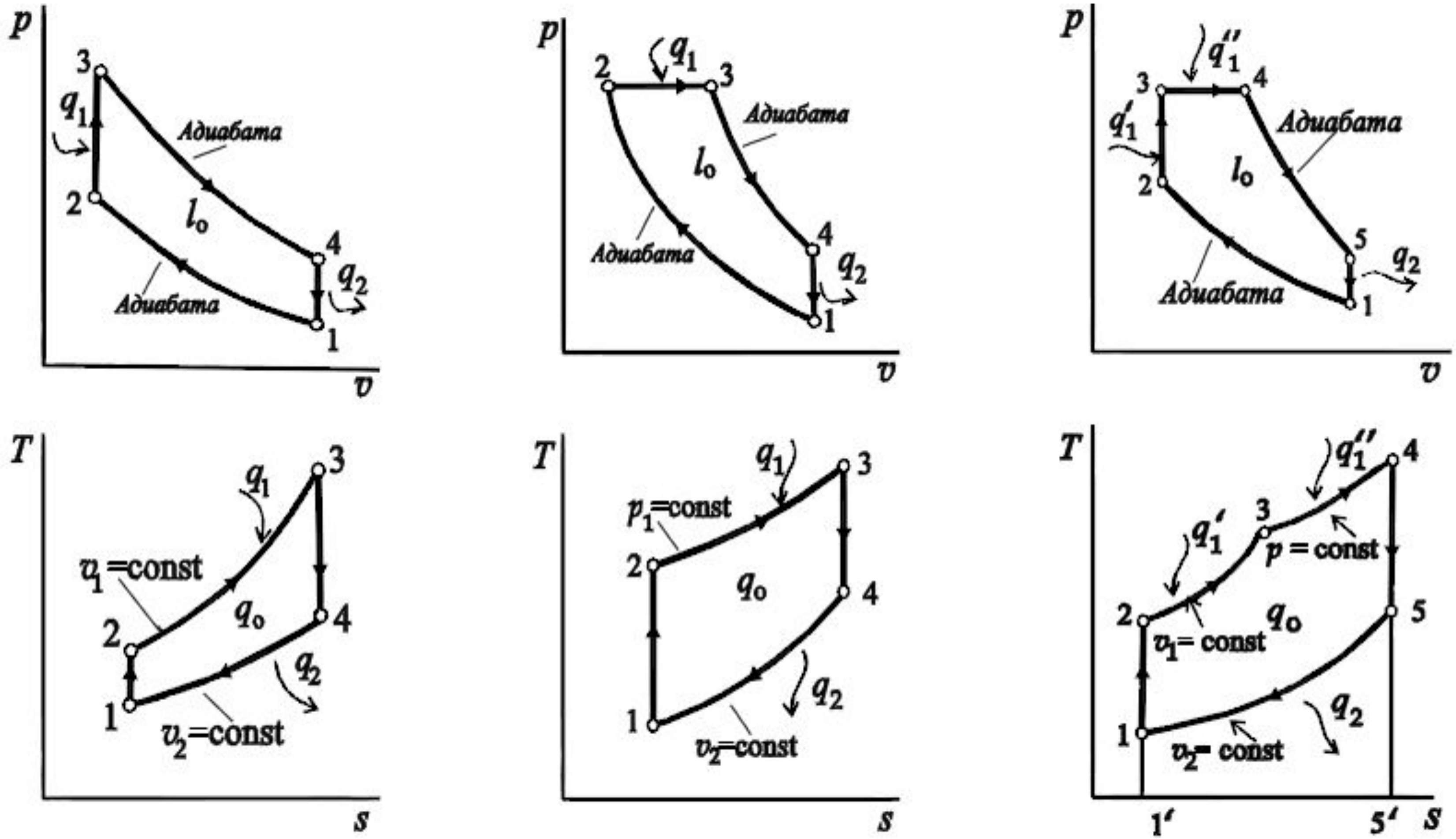
степень повышения давления $\lambda = \dfrac{p_3}{p_2}$

(2-3 для двигателей Отто, Дизеля), отношение давлений в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты;

степень предварительного (изобарного) расширения

$\rho = \dfrac{v_3}{v_2}$ *(для двигателя Дизеля)*

и $\rho = \dfrac{v_4}{v_3}$ *(для двигателя* Тринклера), отношение объемов в конце и в начале изобарного процесса подвода теплоты.



Двигатель Отто:

1-2 – адиабатное сжатие;

2-3 – изохорный подвод тепла q_1;

3-4 – адиабатное расширение;

4-1 – изохорный отвод тепла q_2 (возврат в т.1)

Двигатель Дизеля:

1-2 – адиабатное сжатие;

2-3 – изобарный подвод тепла q_1;

3-4 – адиабатное расширение;

4-1 – изохорный отвод тепла q_2 (возврат в т.1)

Двигатель Тринклера:

1-2 – адиабатное сжатие;

2-3 - изохорный подвод тепла q_1';

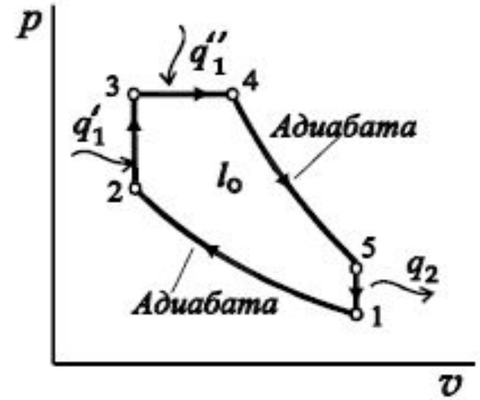
3-4 – изобарный подвод тепла q_1'';

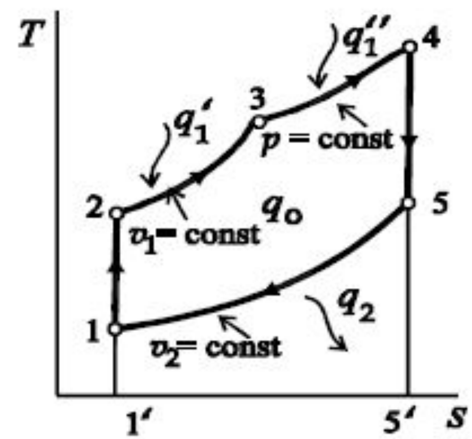
4-5 – адиабатное расширение;

5-1 – изохорный отвод тепла q_2 (возврат в т.1)

Методика расчета ДВС

На примере двигателя Тринклера со смешанным сгоранием топлива частично при постоянном объеме и частично при постоянном давлении. Температуру газа в узловых точках цикла определяют через начальную температуру T_1 и известные характеристики цикла, предполагая, что рабочее тело – идеальный газ.





Двигатель Тринклера:

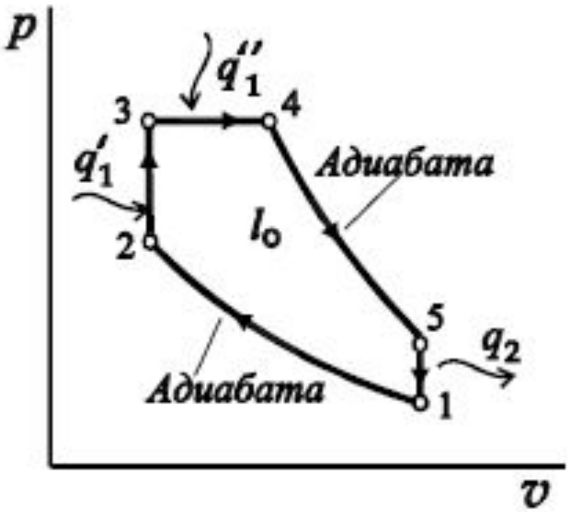
1-2 – адиабатное сжатие;

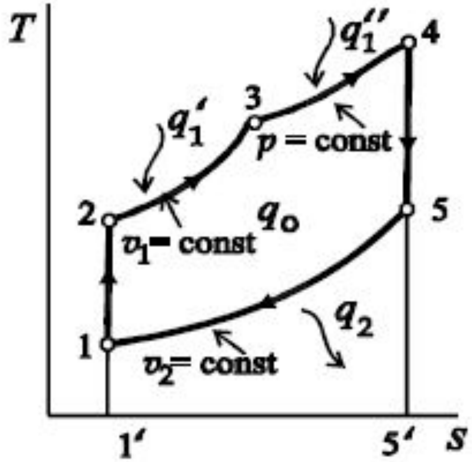
2-3 - изохорный подвод тепла q_1';

3-4 – изобарный подвод тепла q_1'';

4-5 – адиабатное расширение;

5-1 – изохорный отвод тепла q_2 (возврат в т.1)





Двигатель Тринклера:

1-2 – адиабатное сжатие;

2-3 - изохорный подвод тепла q_1';

3-4 – изобарный подвод тепла q_1'';

4-5 – адиабатное расширение;

5-1 – изохорный отвод тепла q_2 (возврат в т.1)

Для адиабатного процесса сжатия 1-2: $T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$;

для изохорного процесса 2-3: $T_3 = \lambda T_2 = T_1 \lambda \cdot \varepsilon^{k-1}$;

для изобарного процесса 3-4: $T_4 = \rho T_3 = T_1 \lambda \cdot \rho \cdot \varepsilon^{k-1}$;

для адиабатного процесса расширения 4-5:

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_4}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_4}{v_2}\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_4}{v_3}\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \rho^{k-1}\frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

$$T_5 = T_4 \rho^{k-1}\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \lambda \rho^k.$$

Количество подводимой и отводимой теплоты в цикле со смешанным подводом соответственно:

$$q_1 = q_1' + q_1'' = c_{vm}(T_3 - T_2) + c_{pm}(T_4 - T_3) = c_{vm}[T_1\varepsilon^{k-1}(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)];$$

$$q_2 = c_{vm}(T_5 - T_1) = c_{vm}T_1(\lambda\rho^k - 1).$$

Тогда термический КПД цикла со смешанным подводом теплоты:

$$\eta_{t,v,p} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_{vm}T_1(\lambda\rho^k - 1)}{c_{vm}T_1\varepsilon^{k-1}[(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]} = 1 - \frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

При ρ=1 цикл со смешанным подводом теплоты обращается в цикл с изохорным подводом теплоты, термический КПД которого:

$$\eta_{t,v} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

При λ=1 цикл со смешанным подводом теплоты обращается в цикл с изобарным подводом теплоты с КПД:

$$\eta_{t,p} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Сравнение циклов ДВС

Из сравнения выражений для термического КПД циклов ДВС видно, что при одинаковых степенях сжатия цикл с изохорным подводом теплоты имеет больший КПД, чем цикл с изобарным подводом теплоты. Однако практически для двигателей с изобарным подводом теплоты характерна более высокая степень сжатия, поэтому они более экономичны, чем двигатели с изохорным подводом теплоты.

Целесообразно сравнивать эти циклы при одинаковых конечных давлениях и температурах, т.е. в условиях одинаковых допустимых термических и механических напряжений.

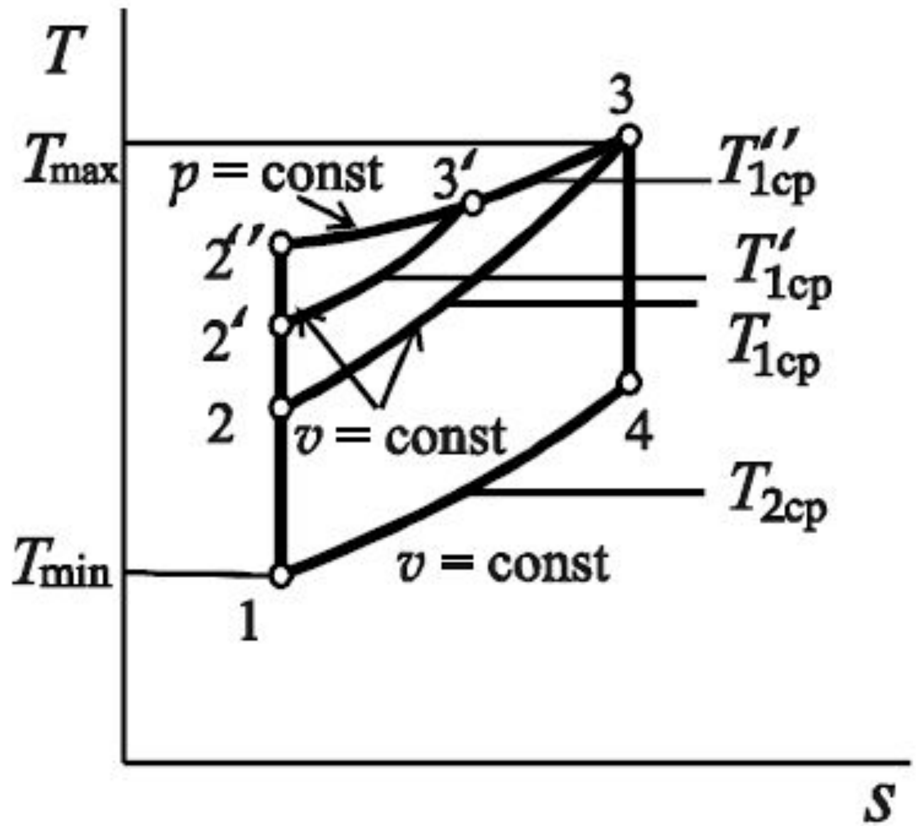
$$\eta_{t,\mathrm{v,p}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_{\mathrm{vm}} T_1 (\lambda \rho^k - 1)}{c_{\mathrm{vm}} T_1 \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]} = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

$$\eta_{t,v} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

$$\eta_{t,p} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

На рисунке изображены циклы с изохорным, изобарным и смешанным подводами теплоты в одном и том же интервале температур.

Средняя температура подвода теплоты $T_{1ср}$" в цикле p = const больше, чем $T_{1ср}$ в цикле v = const, поэтому КПД цикла p = const выше, чем КПД цикла v = const.

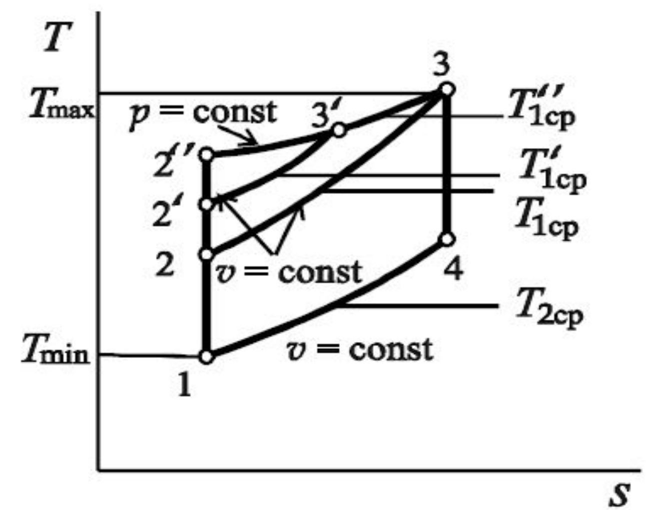


Однако ДВС с изобарным подводом теплоты имеет ряд существенных конструктивных недостатков: наличие специального компрессора для распыления топлива, сложное устройство форсунок.

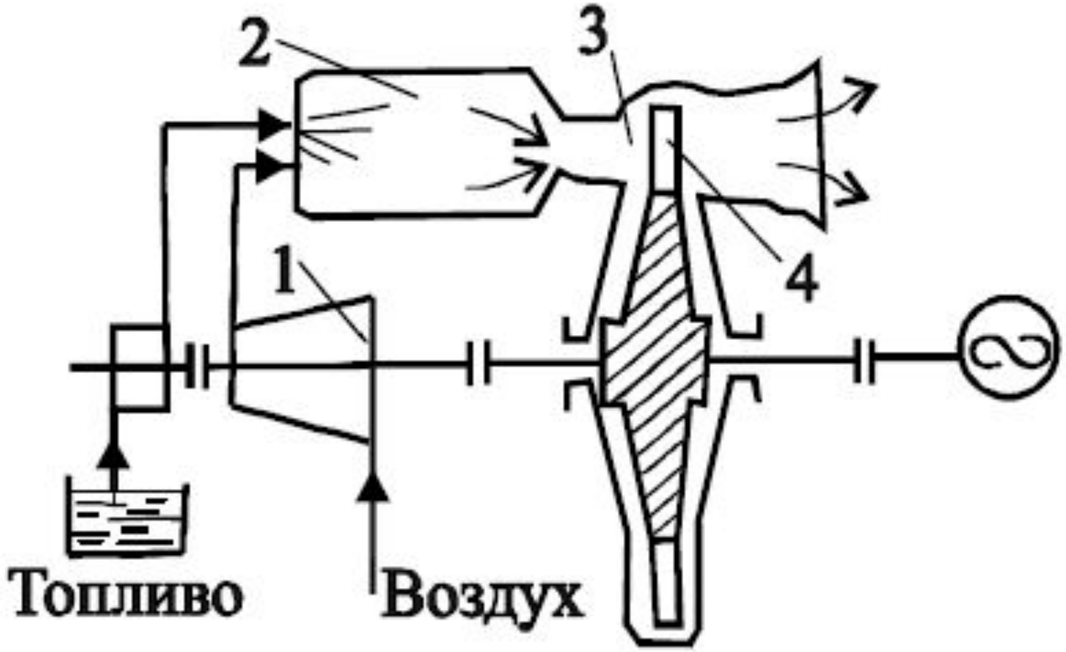
Цикл со смешанным сгоранием топлива позволяет работать без компрессора, подача топлива к форсунке осуществляется топливным насосом под высоким давлением.

Как видно из рисунка, термический КПД цикла со смешанным сгоранием топлива будет занимать промежуточное значение, т.е. $\eta_{t,p} > \eta_{t,v,p} > \eta_{t,v}$.

По циклу со смешанным сгоранием топлива работают все современные ДВС тяжелого топлива (дизеля).



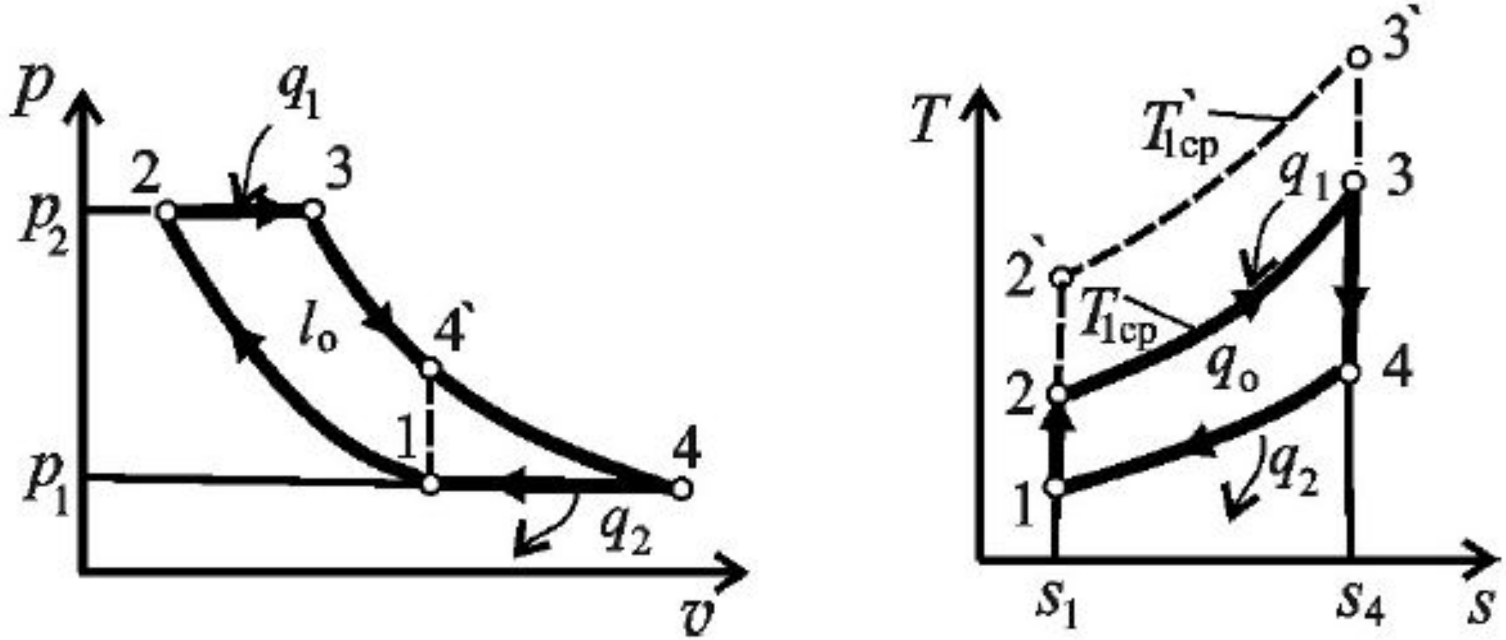
Циклы газотурбинных установок



компрессор 1
камера сгорания 2
сопло 3
рабочие лопатки турбины 4

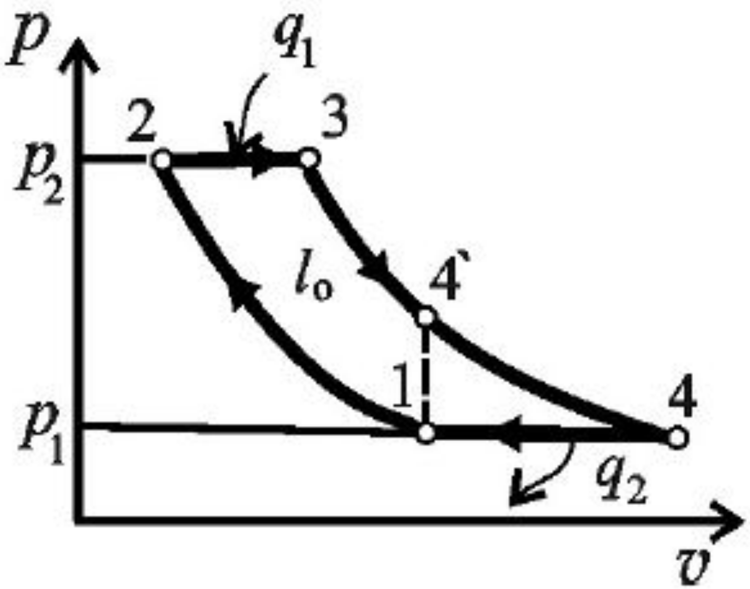
В качестве простейших циклов газотурбинных установок (ГТУ) приняты: цикл с изобарным подводом теплоты и цикл с изохорным подводом теплоты.

Эти циклы отличаются от соответствующих циклов ДВС процессом отвода теплоты – **изохорный процесс отвода заменен изобарным.**

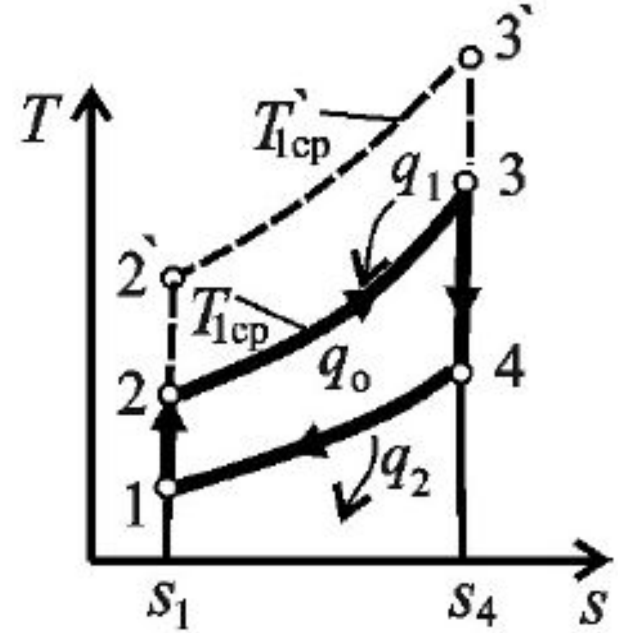


а б

Теоретический цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты состоит из процесса адиабатного сжатия воздуха 1-2 в компрессоре 1, процесса изобарного подвода теплоты 2-3 в камере сгорания 2, процесса адиабатного расширения 3-4 продуктов сгорания в соплах 3 и преобразования кинетической энергии струи газа на рабочих лопатках 4 и процесса отвода теплоты 4-1 от газа в окружающую среду.



а



б

Полезная работа в цикле равна разности между технической работой турбины $l_т$ (площадь $34p_1p_2 3$) и технической работой, затраченной на привод компрессора lк (площадь $12p_2p_1 1$), т.е. $l_0 = l_т – l_к$ = площадь 12341 (рисунок а). Эта же полезная работа равна теплоте q_0, которая вычисляется как разность между количеством подведенной теплоты q_1 (площадь $23s_4s_1 2$) и отведенной q_2 (площадь $41s_1s_4 4$), т.е. $q_0 = q_1 - q_2$ = площадь 12341 (рисунок б).

Техническая работа компрессора:

$$l_K = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1).$$

Теплота, подведенная в цикл:

$$q_1 = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2).$$

Техническая работа турбины:

$$l_T = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4).$$

Теплота, выведенная из цикла:

$$q_2 = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1).$$

Работа цикла:

$$l_\mathrm{t} = l_T - l_K = q_1 - q_2.$$

Термический КПД идеального цикла ГТУ можно определить как:

$$\eta_t^{ГТУ} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}\frac{\dfrac{T_4}{T_1} - 1}{\dfrac{T_3}{T_2} - 1}.$$

Для адиабат 1-2 и 3-4:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}},$$

где $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$ - степень повышения давления в адиабатном процессе сжатия.

Тогда $$\eta_t^{ГТУ} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Как видно, термический КПД цикла газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты увеличивается с увеличением степени повышения давления β. Это объясняется тем, что с увеличением степени повышения давления повышается средняя температура в процессе подвода теплоты от $T_{1ср}$ *до* $T_{2ср}$, как это показано на рисунке б