

# Теоретические основы преобразования энергии в тепловых двигателях. Циклы ПТУ, ГТУ и ДВС.

Автор – доцент каф. ТиГ ВятГУ  
Суворов Дмитрий Михайлович  
*E-mail: dmilar@mail.ru*

# 1. Основные понятия термодинамики

- Термодинамическая система и окружающая среда
  - **Термодинамическая система** — это совокупность тел, находящихся во взаимодействии как между собой, так и с окружающей средой.
  - **Окружающая среда** — совокупность внешних тел и систем тел, взаимодействующих с рассматриваемой термодинамической системой.
  - Из всех возможных видов взаимодействия между системой и окружающей средой в технической термодинамике рассматриваются два — **механическое взаимодействие** (обмен механической энергией, т.е. совершение механической работы  $L$ ) и **тепловое взаимодействие** (обмен тепловой энергией  $Q$ ).  
Также между термодинамической системой и окружающей средой возможно **массовое взаимодействие** (обмен веществом, т.е. массой  $M$ ).

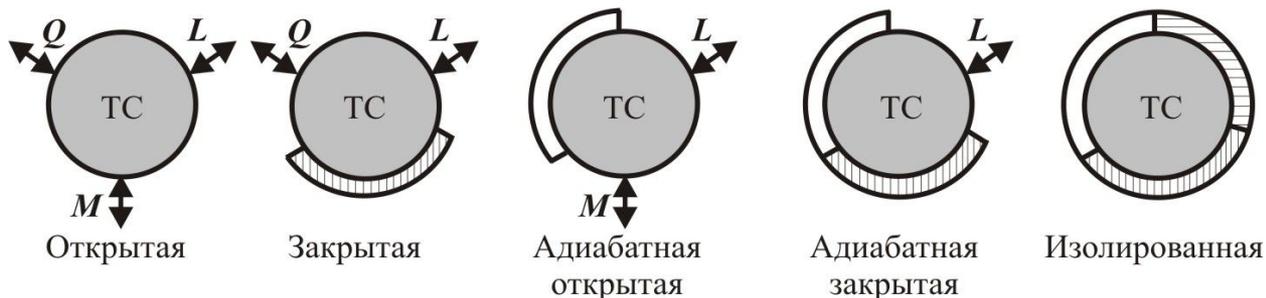
Для теплового взаимодействия термодинамической системы с окружающей средой вводятся понятия теплоотдатчика и теплоприёмника.

- **Теплоотдатчик** — это внешнее тело (система тел) *окружающей среды*, которая сообщает (отдаёт) *термодинамической системе* тепловую энергию.
- Соответственно, **теплоприёмник** — внешнее тело (тела) *окружающей среды*, которое воспринимает тепловую энергию от *термодинамической системы*.

# 1. Основные понятия термодинамики.

## Термодинамическая система и окружающая среда

- **Открытая система** – термодинамическая система, у которой кроме механического и теплового взаимодействия, также происходит обмен веществом с окружающей средой.
- **Закрытая система** – система, у которой есть механическое и тепловое взаимодействие, а обмен веществом с окружающей средой отсутствует.
- **Адиабатная система** – система, у которой есть механическое взаимодействие, но
- **Изолированная система** – система, у которой отсутствует обмен как механической и тепловой энергией, так и веществом с окружающей средой.



# 1. Основные понятия термодинамики

- **Тепловой машиной** называют техническое устройство, в котором возможно непрерывное взаимное преобразование тепловой и механической энергии через тепловое и механическое взаимодействие тепловой машины с окружающей средой (в том числе с *теплотдатчиком* и с *теплоприёмником*).
  - Вещество (газ или пар), посредством которого тепловая энергия в *тепловой машине* преобразуется в работу (механическую энергию) или наоборот, работа преобразуется в тепловую энергию, называется **рабочим телом** и оно считается *термодинамической системой тепловой машин*

# 2. Первый закон термодинамики

## ■ 2.1. Термодинамические процессы

Состояние газа, при котором во всех точках занимаемого им объема его параметры имеют одно и то же значение, называют **равновесным состоянием**.

В результате взаимодействия *рабочего тела* (системы) и *окружающей среды* будет изменяться состояние рабочего тела. Непрерывная последовательность разных состояний рабочего тела образует **термодинамический процесс**.

- Процесс, состоящий из непрерывной последовательности равновесных состояний рабочего тела, называется **равновесным процессом**.  
Всякий реальный процесс является процессом неравновесным.
- Характерная особенность **обратимых процессов** заключается в том, что для них существуют процессы, в которых рабочее тело в течение обратного процесса проходит в обратной последовательности через все состояния прямого процесса и возвращается в исходное состояние без возникновения изменений в рабочем теле и в окружающей среде.
- Все известные нам процессы, непрерывно протекающие в природе и технике, являются **необратимыми процессами**.

## 2. Первый закон термодинамики

### ■ 2.2. Внутренняя энергия

Рабочее тело в каждом состоянии обладает определенным запасом внутренней энергии, определяемой заданным состоянием рабочего тела, т.е. любыми двумя независимыми параметрами.

- С молекулярной точки зрения **внутренняя энергия** складывается из кинематической энергии поступательного и вращательного движения молекул, потенциальной энергии молекул, т.е. энергии взаимного расположения молекул, обусловленной силами межмолекулярного взаимодействия, и полной энергии колебательного движения атомов, составляющих молекулу.

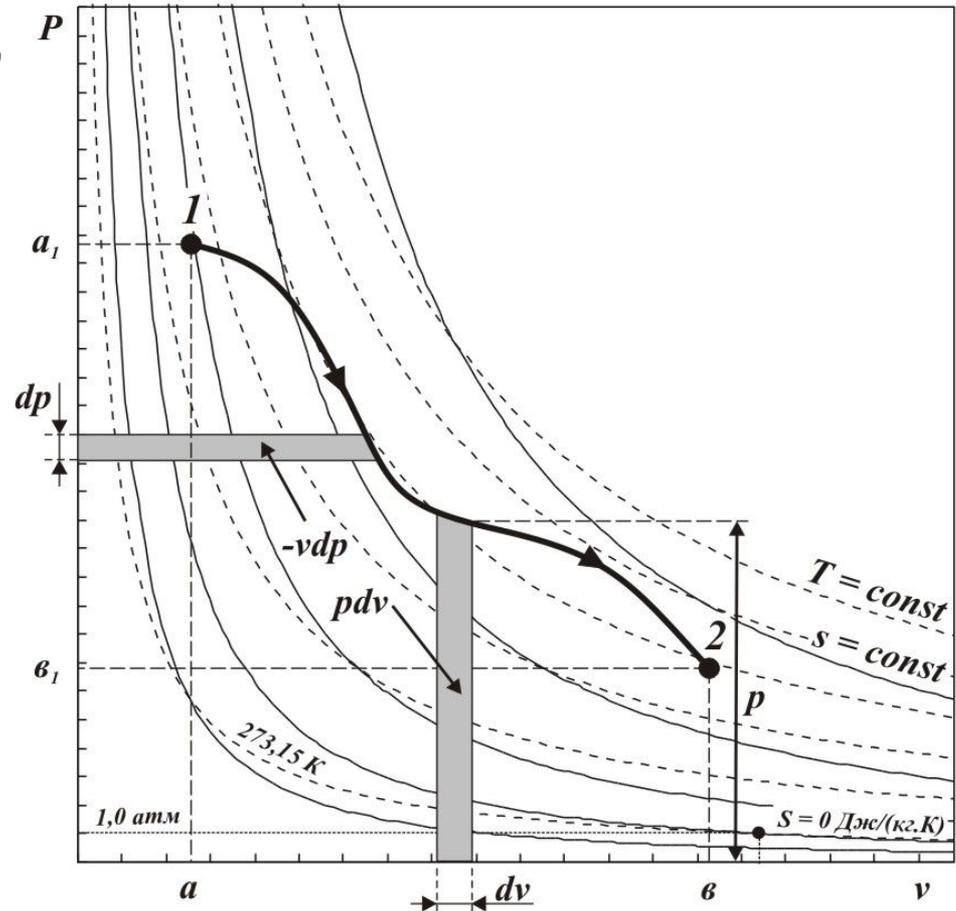
У идеального газа отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия, поэтому потенциальная энергия равна нулю.

Следовательно, внутренняя энергия идеального газа от объема или давления не зависит, а зависит только от температуры газа.

Поэтому внутренняя энергия есть **функция состояния** рабочего тела.

## 2. Первый закон термодинамики

- Работа изменения объема, производимая рабочим телом, против действия внешних сил при его расширении, называется **работой расширения**, а работа, производимая внешними силами, над рабочим телом при его сжатии – **работой сжатия**.
- В двух процессах, происходящих между одинаковыми начальными и конечными состояниями, работа различна. Следовательно, работа зависит от характера термодинамического процесса, т.е. она является **функцией процесса**.



## 2. Первый закон термодинамики

### Уравнение первого закона термодинамики

- Первый закон термодинамики представляет собой закон сохранения и превращения энергии в применении к задачам, решаемым термодинамикой.
- Если к рабочему телу подводится некоторое количество тепла, то часть тепла может пойти на увеличение внутренней энергии рабочего тела, а остальная часть – на совершение работы. Отсюда для любого процесса можно сформулировать закон – **первый закон термодинамики: Теплота, подведенная к рабочему телу в каком - либо термодинамическом процессе, расходуется на изменение внутренней энергии рабочего тела и на совершение работы.**

$$dq = du + dl ,$$

$$dQ = dU + dL ,$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 + l_{12} .$$

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + L_{12} .$$

- В развернутом виде уравнение первого закона термодинамики запишется так:

$$dq = du + p \cdot dv$$

## 2. Первый закон термодинамики

- Для удобства теплотехнических расчетов сумму  $(u+pv)$  рассматривают как термодинамический параметр состояния – **энтальпию**:

$$h = u + pv ,$$

где  $u$  - внутренняя энергия, Дж/кг;

$p$  - абсолютное давление, Па;

$v$  - удельный объем, м<sup>3</sup>/кг.

## 2. Первый закон термодинамики

- **Передача части внутренней энергии тела в термодинамическом процессе может происходить в форме теплоты или в форме работы.**

- **Теплота**, представляет собой одну из форм передачи части внутренней энергии от одного тела к другому и, одновременно, количество энергии, переданной данным способом. Характерной особенностью этой формы передачи энергии является то, что осуществляется она энергетическим взаимодействием между молекулами, участвующими в процессе тел, т.е. при этом отсутствует видимое движение тел.

Так как теплота представляет собой часть внутренней энергии, передаваемой в термодинамическом процессе, обычно условно считается, что теплота подводится или отводится от тела. При этом энергия, отведенная в форме теплоты (отведенная теплота), считается *отрицательной*, подводимая в форме теплоты (подведенная теплота) - *положительной*.

- **Работа**, являющаяся также одной из форм подачи части внутренней энергии, отличается от теплоты тем, что эта форма связана с видимым, направленным движением тел. Работа, так же как и теплота, представляет собой часть внутренней энергии тел, передаваемой в термодинамическом процессе.

По принятому в термодинамике условному правилу считается, что если энергия в форме работы отводится от тела, то при этом тело совершает *положительную* работу, и наоборот, если к телу подводится энергия в форме работы, то работа совершается над телом и эта работа считается *отрицательной*.

Теплота, так же как и работа, является функцией термодинамического процесса.

# 3. Второй закон термодинамики

- **Содержание второго закона термодинамики и его формулировки**

В применении к задачам технической термодинамики второй закон термодинамики может быть сведен к следующему положению:  
***невозможно осуществить цикл в результате только подвода теплоты к рабочему телу или только отвода от него.***

Первый закон термодинамики отмечает возможность перехода теплоты в работу и определяет их количественную зависимость, но не касается условий, при которых возможен переход теплоты в работу. Второй закон термодинамики устанавливает эти условия. *Условиями перехода теплоты в работу является наличие холодильника наряду с наличием источника теплоты, т.е. наличие температурного перепада.*

Разные авторы дают различные формулировки второго закона термодинамики в зависимости от того, куда они его применяют (их множество). Формулировка второго закона термодинамики применительно к тепловым двигателям гласит, что ***нельзя построить «вечный двигатель второго рода», т.е. двигатель, который бы полностью преобразовывал подведенную теплоту в работу***

# 3. Второй закон термодинамики

- Итак, в результате действия второго закона термодинамики в прямом цикле только часть теплоты, подводимой к рабочему телу, превращается в работу. Для оценки экономичности цикла используют отношение работы за цикл к подводимой теплоте.
- Это отношение называют **термическим коэффициентом полезного действия цикла** (термическим к.п.д. цикла)

$$\eta_t = \frac{l}{q_1},$$

но так как  $l = q_1 - q_2$ , то  $\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$

### 3. Второй закон термодинамики

- Обратные или холодильные циклы используются для переноса теплоты от тел менее нагретых к более нагретым. Этот процесс, согласно второму закону термодинамики, не может протекать без затраты работы.
- В качестве основной характеристики эффективности обратных циклов принимается величина так называемого холодильного коэффициента, равного отношению теплоты, отводимой от охлаждаемого тела, к затраченной для этого работе

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

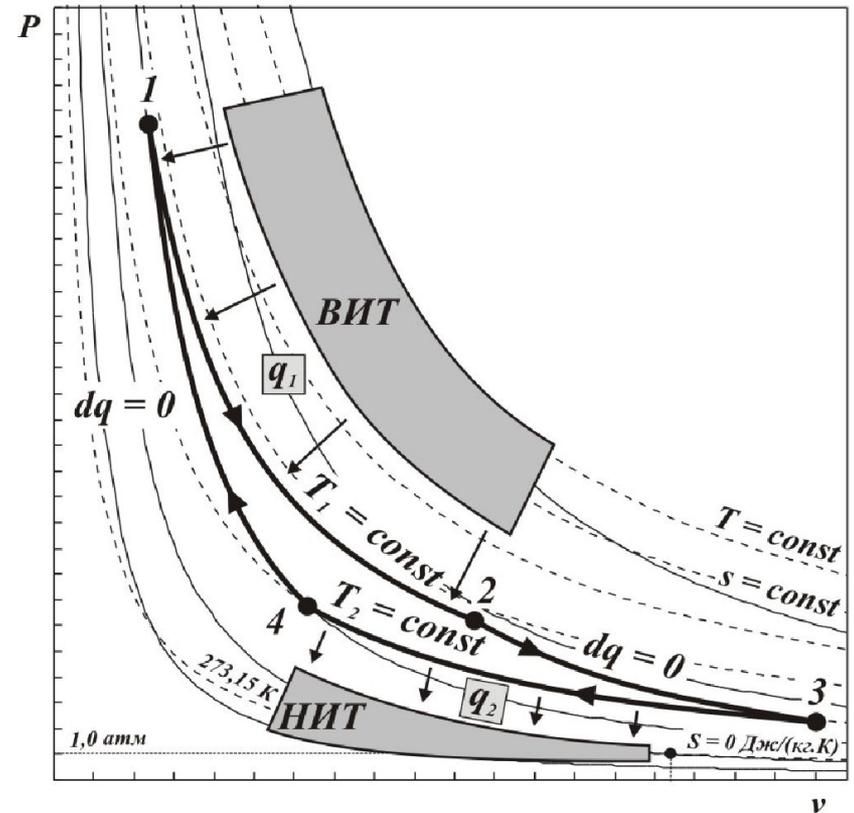
# 3. Второй закон термодинамики

- В термодинамике рассматриваются идеальные циклы, поэтому они только условно могут характеризовать работу реальных тепловых двигателей или тепловых установок. Несмотря на это, исследование их экономичности имеет большое значение. Термические к.п.д. этих циклов оказывают решающее влияние на общую экономичность установок.
- Циклы, так же как и разомкнутые термодинамические процессы, могут быть **обратимыми циклами** и **необратимыми циклами**. Для необратимости цикла в целом достаточно, чтобы процесс протекал необратимо хотя бы на части цикла.
- При осуществлении обратимого цикла будет получена максимальная полезная работа и она всегда будет больше работы необратимого цикла, протекающего в той же системе, в какой протекал обратимый цикл. При этом в обратимом цикле большая часть подведенной к рабочему телу теплоты будет превращена в полезную работу. Таким образом, у обратимого цикла, по сравнению с необратимым, термический коэффициент полезного действия будет выше.

# 3. Второй закон термодинамики.

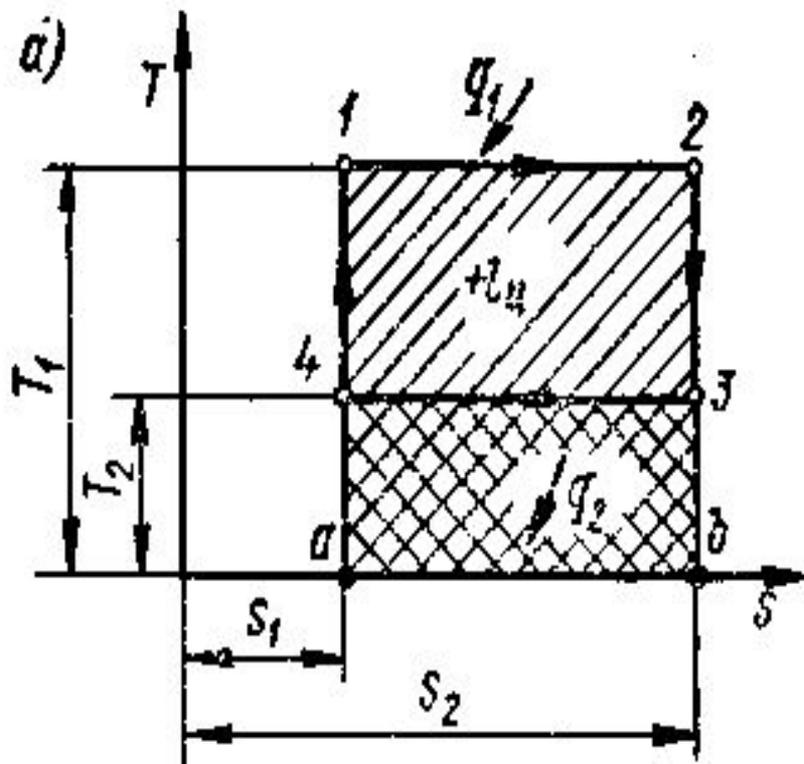
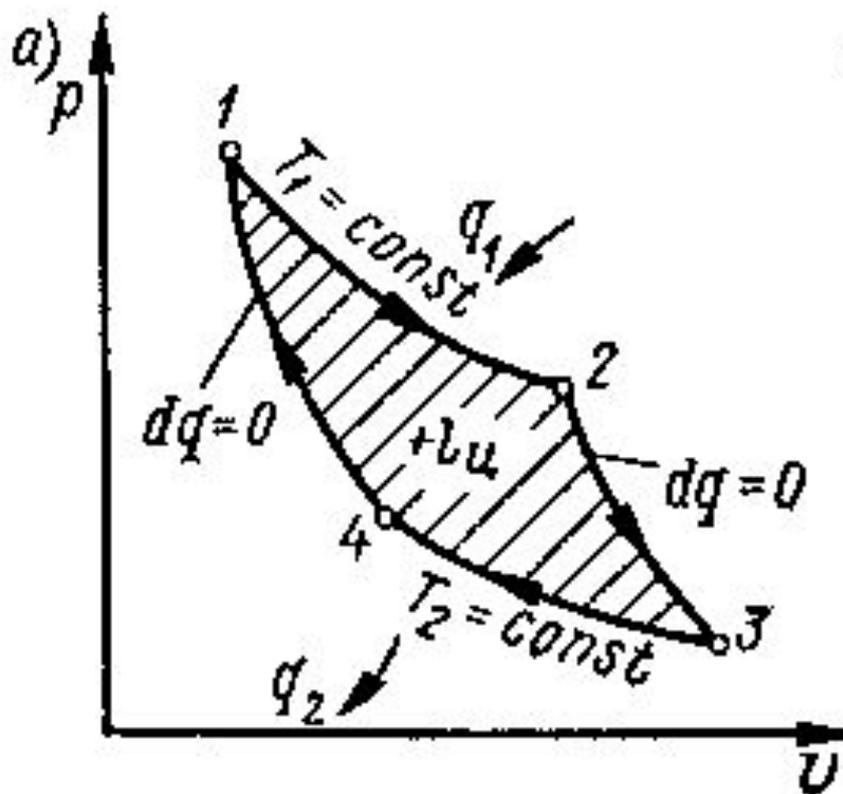
## Цикл Карно

- Имеется система с двумя источниками теплоты: источник теплоты с температурой  $T_1 = \text{const}$  и холодильник с температурой  $T_2 = \text{const}$ . В такой системе цикл максимальной экономичности должен протекать при подводе теплоты  $q_1$  к рабочему телу по изотерме  $T_1 = \text{const}$  и с отводом теплоты  $q_2$  по изотерме  $T_2 = \text{const}$ . Изменение температуры от  $T_1$  до  $T_2$  и обратно должно происходить по адиабатам 2-3 и 4-1. Все остальные циклы, возможные в рассматриваемой системе, происходящие при нарушении условий равновесия в системе, будут необратимыми и поэтому менее экономичными.
- **Теорема Карно.** Термический к.п.д. цикла Карно не зависит от свойств рабочего тела, а зависит от температур источников тепла, между которыми совершается цикл.
- Согласно сформулированной выше теореме Карно, термический к.п.д. цикла Карно будет одинаков как для идеального газа, так и для любого реального рабочего тела (газ, пар).



# 3. Второй закон термодинамики.

## Цикл Карно



### 3. Второй закон термодинамики

- Термический к.п.д. цикла Карно зависит от значений абсолютных температур источника теплоты и холодильника.
- Чем больше эта разность, тем выше термический к.п.д. цикла Карно.

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

## 4. Идеальные циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

### Общие положения

- Так как рабочие циклы двигателей внутреннего сгорания включают в себя процессы, в течение которых меняется количество рабочего тела и его химический состав, то непосредственный термодинамический анализ этих процессов невозможен.
- Поэтому в термодинамике рабочие циклы реальных двигателей заменяют соответствующими идеальными циклами, предполагая, что химический состав рабочего тела в цикле не меняется (идеальный газ). В таком цикле процессы сгорания топлива и выпуска продуктов сгорания заменяют соответствующими процессами подвода и отвода теплоты.
- Очевидно, что идеальный термодинамический цикл не может быть осуществлен в реальном двигателе, даже если представить идеальные условия его работы. Принимается, что рабочим телом является 1 кг идеального газа и совершаемый в двигателе круговой процесс является замкнутым и обратимым.

## 4. Идеальные циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

- В двигателях внутреннего сгорания применяют следующие циклы:
- - цикл с подводом тепла при постоянном объеме (**цикл Отто**), являющийся теоретическим циклом двигателей с низкой степенью сжатия (карбюраторные двигатели с искровым зажиганием);
- - цикл с подводом тепла при постоянном давлении (**цикл Дизеля**), являющийся теоретическим циклом двигателей с высокой степенью сжатия (компрессорные дизели);
- - цикл со смешанным подводом тепла (**цикл Тринклера**), являющийся теоретическим циклом бескомпрессорных двигателей с высокой степенью сжатия.
- Во всех ДВС отвод тепла от рабочего тела происходит по изохоре .

# 4. Идеальные циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

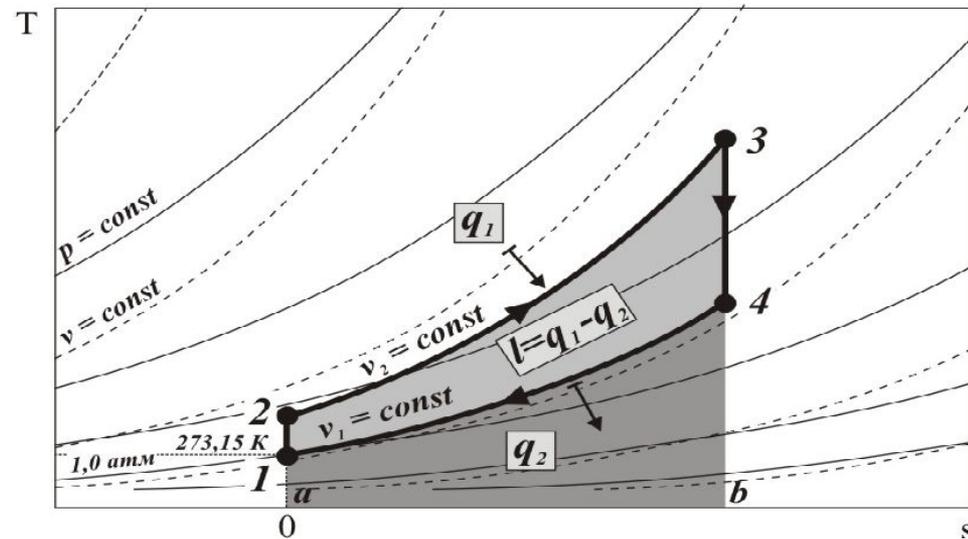
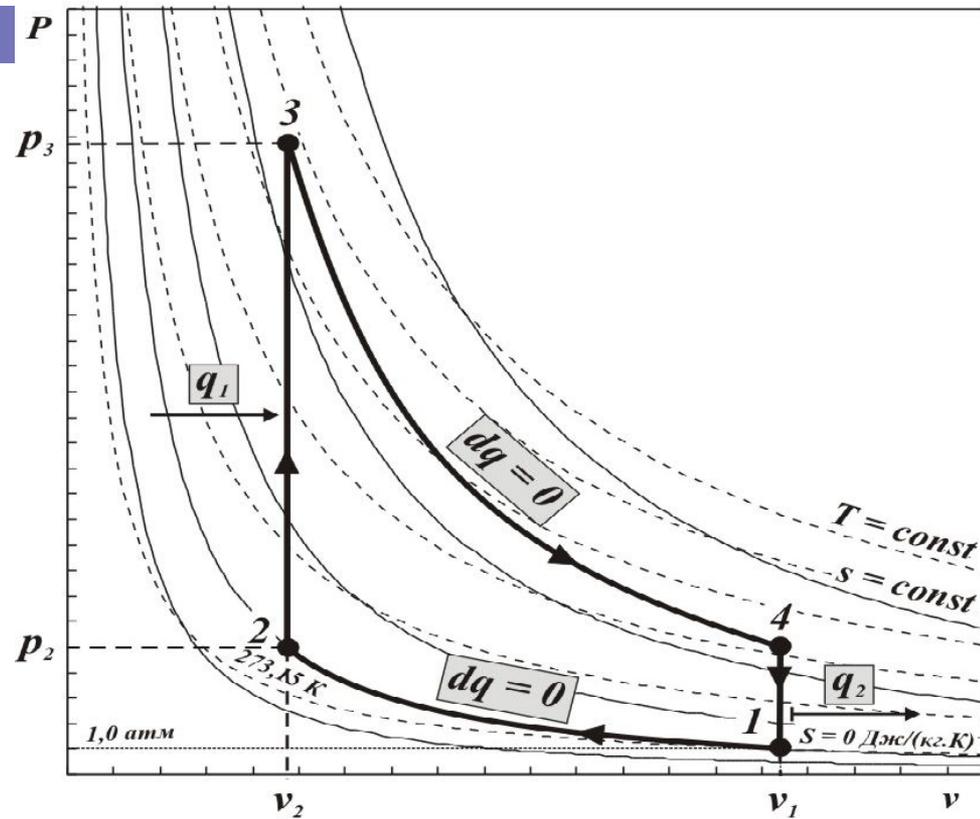
## Цикл Отто

Цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто) протекает следующим образом.

Газ, находящийся при атмосферных условиях (т. 1) сжимается при постоянной энтропии (адиабатно) – процесс 1-2. В процессе 2-3 при постоянном объеме подводится теплота  $q_1$ . Затем происходит изоэнтропное расширение газа – процесс 3-4 и изохорное его охлаждение с отводом теплоты  $q_2$  - процесс 4-1.

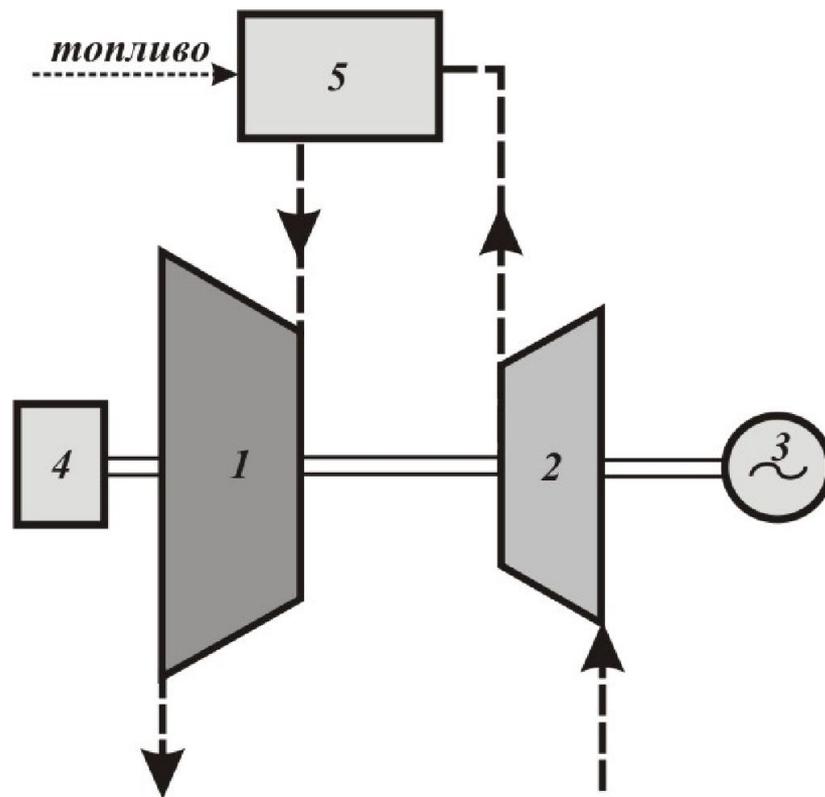
Термический КПД цикла Отто зависит от степени сжатия и показателя адиабаты сжимаемого рабочего тела

$$\frac{v_1}{v_2} = \varepsilon - \text{степень сжатия} \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$



## 5. Идеальные циклы газотурбинных установок

Упрощенная схема наиболее простой энергетической установки такого типа приведена на рисунке. В компрессор 2 поступает атмосферный воздух, который сжимается и подается в камеру сгорания 5, куда подается и топливо. Газы, образующиеся в результате сгорания топлива при постоянном давлении, имеют высокую температуру, поэтому в камеру сгорания воздух подается с большим избытком. Далее газы поступают в газовую турбину 1. Отработавшие газы удаляются в атмосферу. Турбина приводит в действие электрогенератор 3 и пускается в работу пусковым устройством 4.



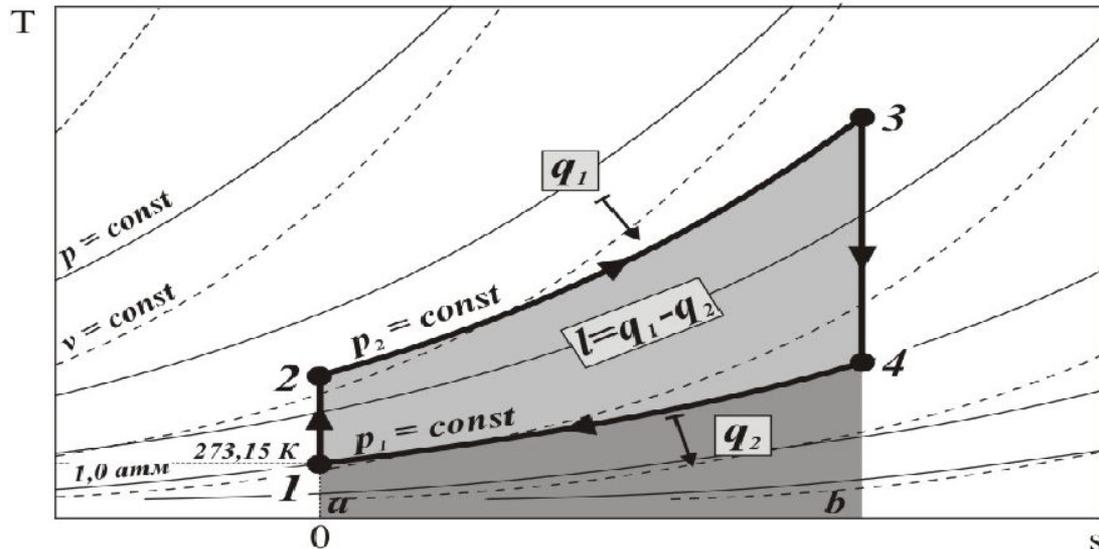
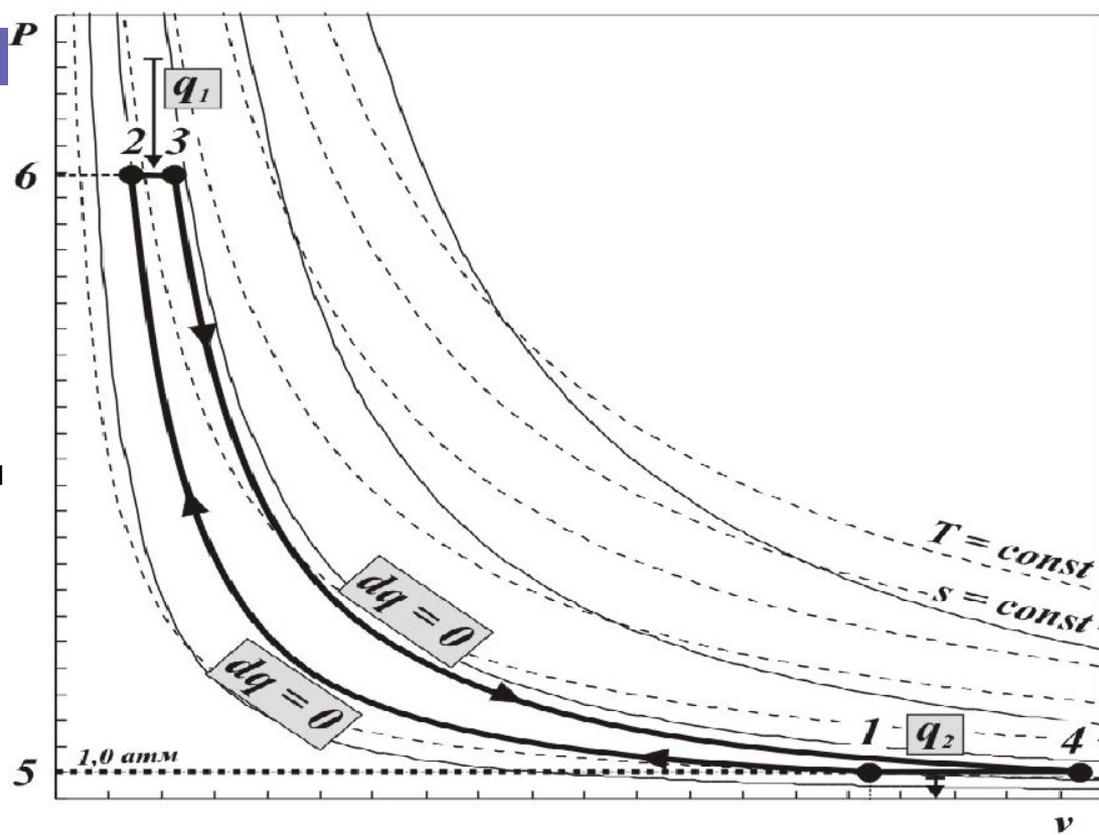
# 5. Идеальные циклы газотурбинных установок

Процесс 1-2 изображает адиабатное сжатие идеального газа в компрессоре, при этом затрачивается работа  $l=F12651$ . В процессе 2-3 подводится некоторое количество тепла к газу при постоянном давлении (в камере сгорания). В процессе 3-4 происходит адиабатное расширение газа (в турбине). Работа эквивалентна площади  $l=F63456$ . В процессе 4-1 от газа при постоянном давлении отводится тепло. Полезная работа эквивалентна площади  $l=F12341$ .

Отношение давления  $p_2$  в конце адиабатного сжатия к давлению  $p_1$  в начале его есть степень повышения давления.

Термический КПД идеального цикла ГТУ зависит только от степени повышения давления

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



## 6. Циклы паротурбинных установок. Цикл Ренкина на перегретом паре

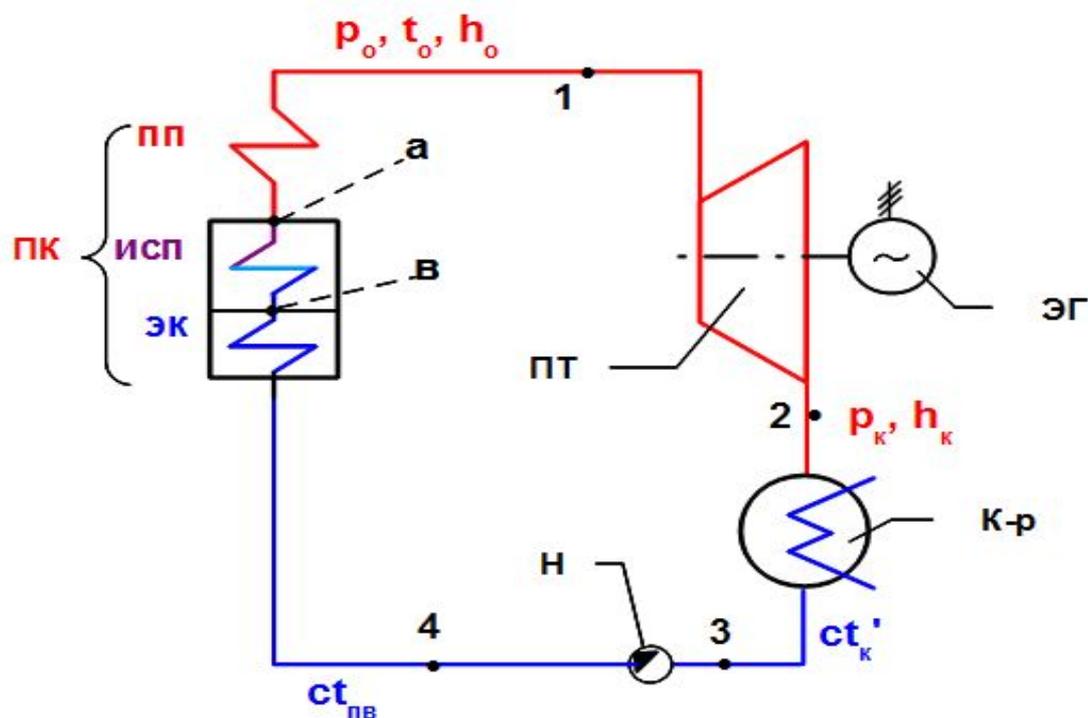
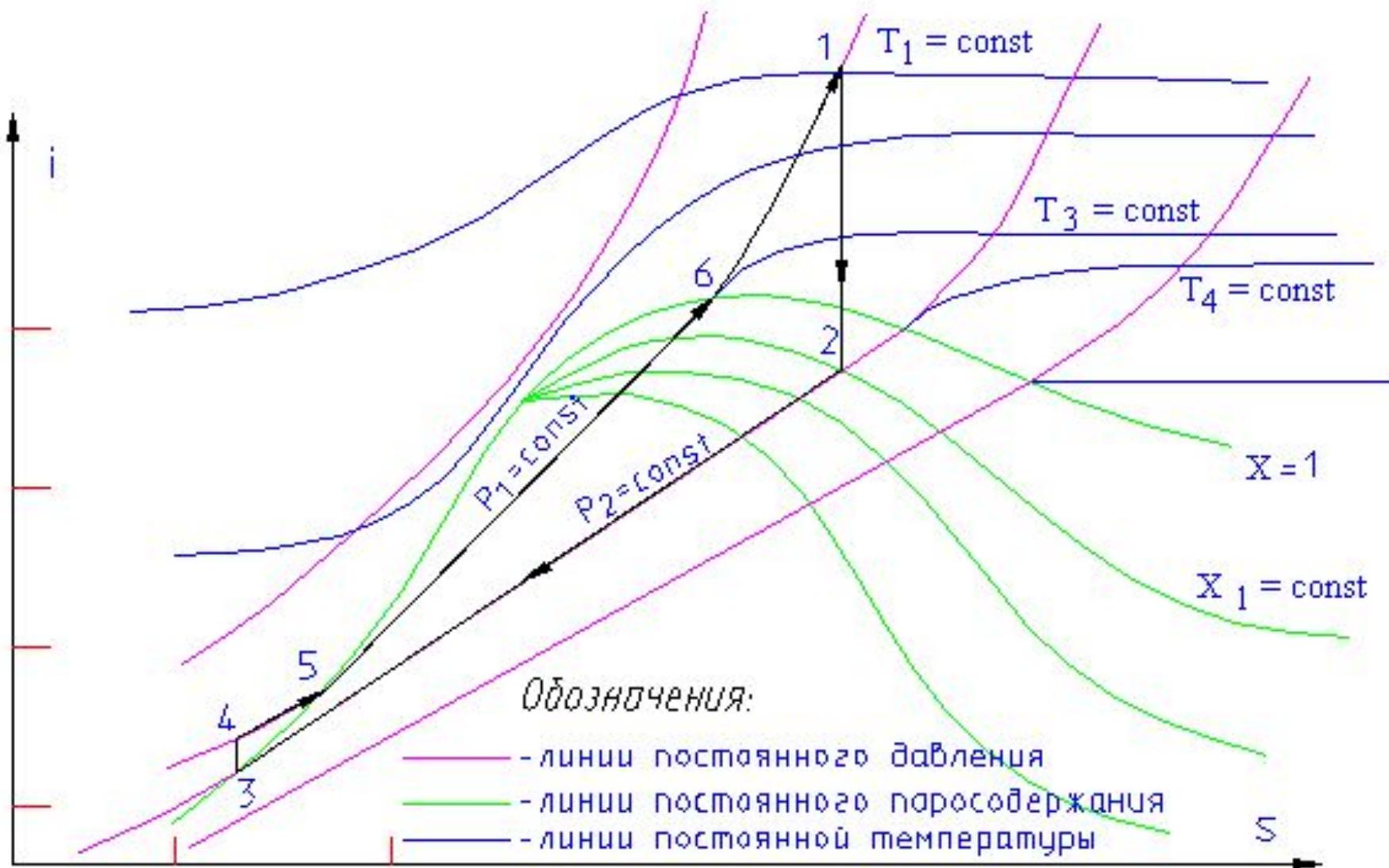


Рис.16.1. Схема ПТУ на перегретом паре и сжатии рабочего тела в жидкой фазе: ПК – паровой котел, ПП – пароперегреватель, ИСП – испарительная поверхность, ЭК – экономайзер; ПТ – паровая турбина; К-р – конденсатор паровой турбины; Н – насос; ЭГ – электрический генератор

## 6. Циклы паротурбинных установок.

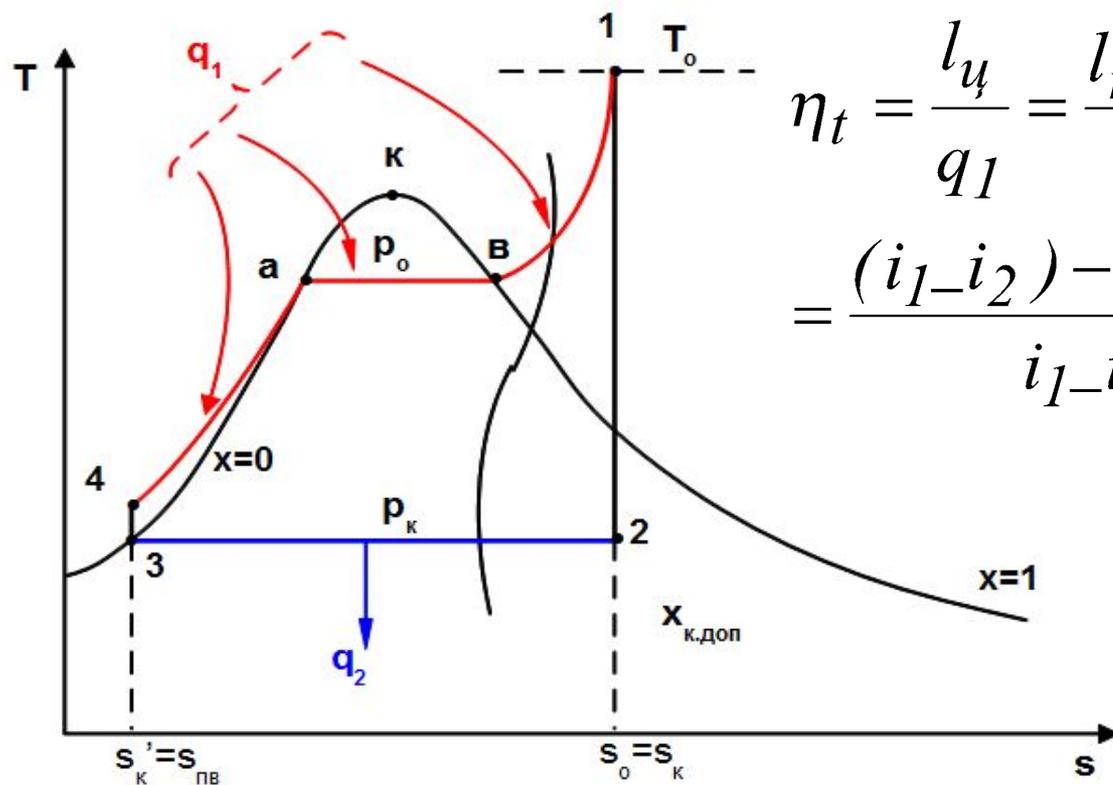
Цикл Ренкина на перегретом паре в изображении на  $i,s$ - диаграмме



# 6. Циклы паротурбинных установок.

## Цикл Ренкина на перегретом паре.

Термический КПД цикла Ренкина



$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{l_m - l_H}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)}{i_1 - i_4} \approx \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3}$$

Рис. 16.2. Цикл ПТУ на перегретом водяном паре и сжатии рабочего тела в области жидкости в T,s - диаграмме