

# ЛЕКЦИИ 1

## Основные положения технической термодинамики

КУРС ЛЕКЦИЙ ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА  
д.т.н. проф. Е.В. Барочкин

# ПЛАН ЛЕКЦИИ

## План лекции

1. Основные положения технической термодинамики
  - 1.1. Предмет и метод технической термодинамики
  - 1.2. Рабочее тело и основные параметры состояния рабочего тела
  - 1.3. Основное уравнение идеального газа
  - 1.4. Внутренняя энергия тела
  - 1.5. Первый закон термодинамики
  - 1.6. Энтальпия идеального газа
  - 1.7. Энтропия
  - 1.8. Тепловая  $T, s$  - диаграмма
  - 1.9. Круговые процессы или циклы
  - 1.10. Цикл Карно
  - 1.11. Свойства рабочего тела
  - 1.12. Конденсация пара
  - 1.13. Связь температуры насыщения с давлением
  - 1.14.  $T, S$ -диаграмма воды и водяного пара
  - 1.15. Тепловая  $h, s$  – диаграмма воды и водяного пара
  - 1.16. Свойства водяного пара как рабочего тела

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.1. Предмет и метод технической термодинамики

Техническая термодинамика составляет один из разделов теоретических основ теплотехники.

Термодинамика – это наука об энергии и энергетических преобразованиях. Первоначально она создавалась как наука о преобразовании теплоты в механическую работу в тепловых машинах. Современная термодинамика изучает превращения энергии во всех её формах. Переход энергии от одного тела к другому и все превращения форм энергии происходят при взаимодействии тел. Количественной мерой взаимодействия является работа (механических сил, электрических сил и т.д.). Теплота также является мерой энергетических взаимодействий.

Большую роль в процессе совершенствования работы играют газ либо пар – рабочие тела в двигателе. В соответствии с условиями изменения состояния рабочего тела и его энергетического взаимодействия с окружающей средой в технической термодинамике изучаются термодинамические системы, а также термодинамические процессы или изменения состояния термодинамической системы. При этом устанавливаются соотношения между физическими величинами, которые характеризуют систему и изменение её состояния.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.2. Рабочее тело и основные параметры состояния рабочего тела

Рабочими телами в двигателях для преобразования тепловой энергии в механическую служат газы и пары различных жидкостей.

Газообразное тело вследствие способности к большому расширению при нагревании является наиболее удобным для использования в качестве рабочего тела при превращении в работу теплоты, сообщаемой телу извне. Принципиальных различий между газом и паром нет. Для каждого газа существует некоторый температурный предел, так называемая критическая температура, выше которой никаким повышением давления газ не может быть превращен в жидкое состояние. Обычно газом считают и пар при температуре выше его критической температуры. Изменение состояния газа происходит в результате сообщения или отбора тепла или от внешних механических воздействий.

Состояние рабочего тела определяется совокупностью термодинамических параметров, основными из которых являются давление  $p$ , температура  $T$  и удельный объём  $\vartheta$ . В общем виде уравнение состояния рабочего тела может быть представлено в виде функциональной зависимости  $f(p, \vartheta, T) = 0$ . Это уравнение можно также выразить в виде

$$p = f_1(T, \vartheta); \quad \vartheta = f_2(p, T); \quad T = f_3(p, \vartheta).$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.3. Основное уравнение идеального газа

Уравнение состояния идеальных газов было получено в 1834 г. Клапейроном на основании опытных законов Бойля – Мариотта и Гей-Люссака. Уравнение Клапейрона содержит константу, зависящую от природы газа и потому не являющуюся универсальной

Для 1 кг идеального газа уравнение состояния имеет вид:

$$p\vartheta = RT,$$

где  $R$  – газовая постоянная для 1 кг данного газа, Дж/кг·град;

$p$  – давление, Н/м<sup>2</sup> (Па);

$\vartheta$  – удельный объём, м<sup>3</sup>/кг;  $T$  – абсолютная температура, К.

Уравнение, выведенное Клапейроном, содержало некую неуниверсальную газовую постоянную  $R$  значение которой необходимо было измерять для каждого газа.

Менделеев обнаружил, что величина  $R_{\mu}$  прямо пропорциональна  $\mu$  – молекулярной массе газа. Менделеев ввел в уравнение Клапейрона коэффициент пропорциональности  $R_{\mu}$  и назвал его универсальной газовой постоянной



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.3. Основное уравнение идеального газа

По закону Авогадро 1 кмоль идеального газа любого химического состава при одинаковых давлениях и температурах занимает один и тот же объем.

При давлении  $p_0 = 0,10133 \text{ МН/м}^2$  (760 мм рт.ст.) и температуре  $T_0 = 273,15 \text{ К}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) объем 1 кмоль идеального газа  $V_\mu = 22,4146 \text{ м}^3$ .

Подставив эти значения в уравнение, получим величину универсальной газовой постоянной

$$R_\mu = \mu R = \frac{0,10133 \cdot 10^6 \cdot 22,4146}{273,15} = 8\,315 \text{ (Дж/моль} \cdot \text{град)}$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.4. Внутренняя энергия тела

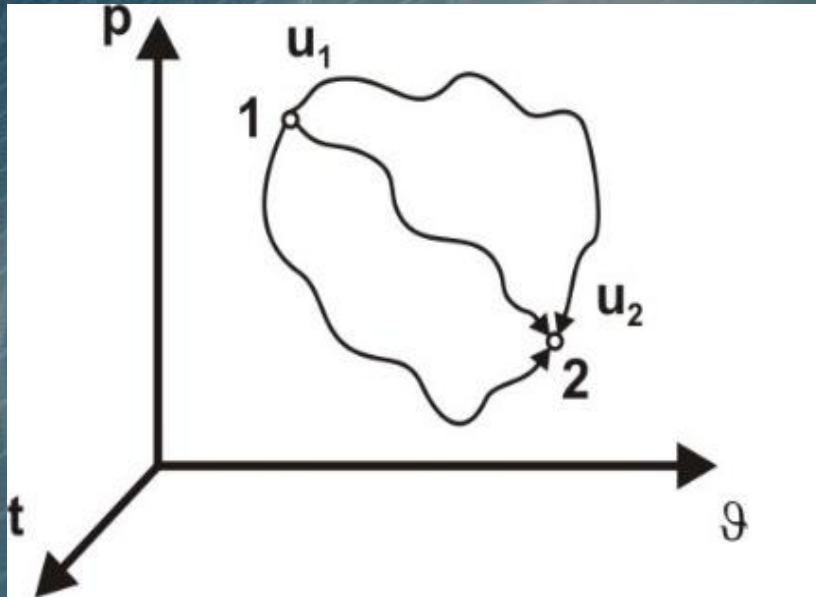


Рис. 1.2.1. Изменение внутренней энергии рабочего тела

С точки зрения молекулярно-кинетической теории под внутренней энергией тела понимается сумма кинетической и потенциальной энергий атомов (молекул), обусловленных:

первая – скоростью движения и массой частиц,

вторая – взаимным их расположением и силами взаимодействия.

Следовательно, каждое тело в данном состоянии обладает известной внутренней энергией, определяемой данным состоянием тела.

Другими словами, внутренняя энергия  $U$  является функцией состояния тела, точнее функцией термодинамических параметров, характеризующих состояние тела ( $p, g, T$ ), и, следовательно,  $du$  есть полный дифференциал этой функции, т.е.  $u = f(p, g, T)$  и  $du = df(p, g, T)$ .

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.4. Внутренняя энергия тела

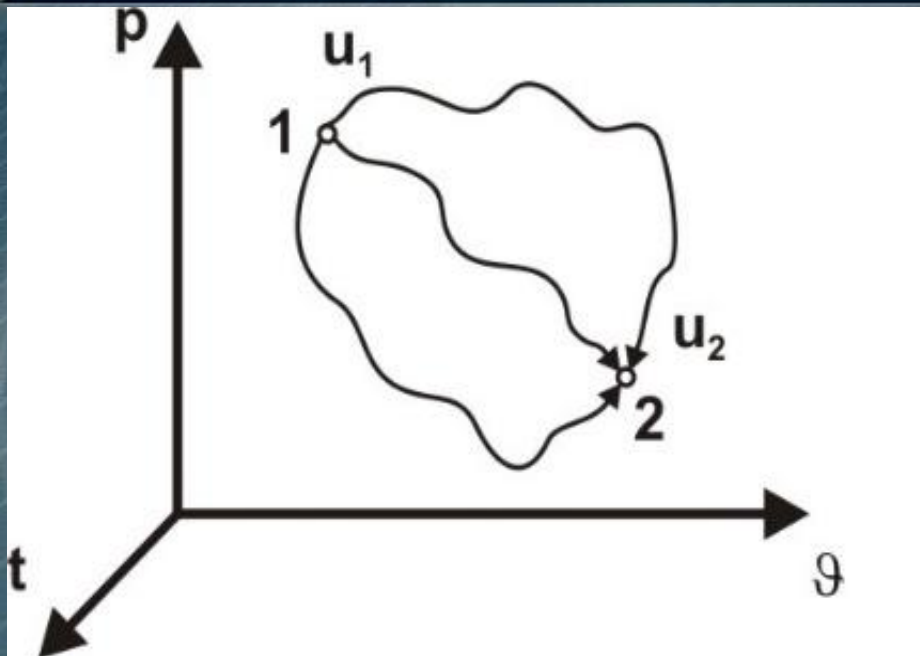


Рис. 1.2.1. Изменение внутренней энергии рабочего тела

Поэтому, при переходе тела (рис. 1.2.1) из состояния 1, определяемого величинами  $p_1$ ,  $\vartheta_1$ ,  $t_1$ , в состояние 2, определяемое величинами  $p_2$ ,  $\vartheta_2$ ,  $t_2$ , изменение внутренней энергии 1 кг тела определяется как

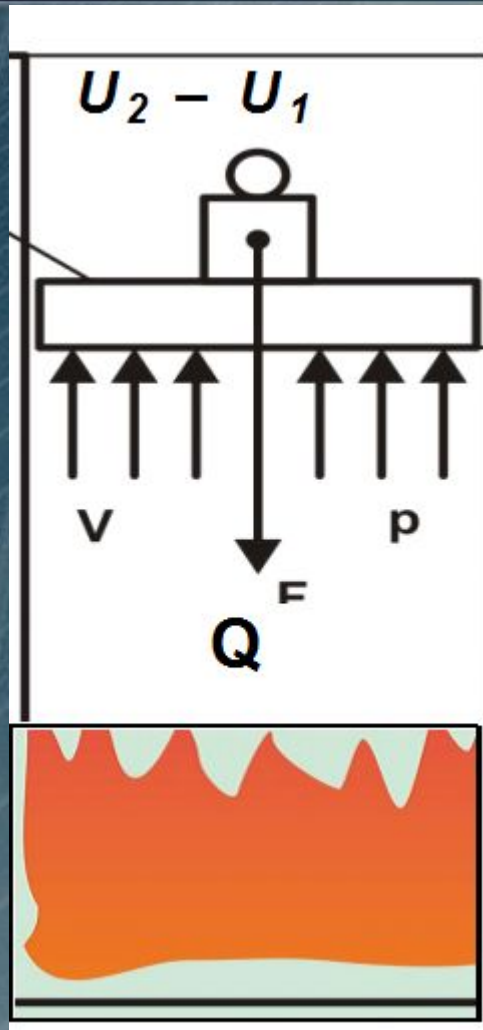
$$u_2 - u_1 = f(p_2, \vartheta_2, t_2) - f(p_1, \vartheta_1, t_1),$$

Таким образом, изменение внутренней энергии тела вполне определяется начальным и конечным состояниями тела и не зависит от промежуточных состояний, а следовательно, и от условий перехода тела из одного состояния в другое, или, как говорят, от характера процесса.



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.5. Первый закон термодинамики



Внутренняя энергия термодинамического тела, взаимодействующего с внешней средой, увеличивается на количество полученной им теплоты  $Q$  и уменьшается на величину совершенной телом работы расширения  $L$ , то есть

Первый закон термодинамики может быть сформулирован следующим образом: *теплота, сообщаемая телу, расходуется на увеличение его внутренней энергии и на работу по преодолению внешнего давления.* Для одного килограмма вещества первый закон термодинамики имеет вид:

$$q = u_2 - u_1 + \square.$$

В этом уравнении все величины ( $q$ ,  $u$ ,  $\square$ ) являются удельными, т. е. относятся к 1 кг массы рабочего тела и измеряются Дж/кг

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.6. Энтальпия идеального газа

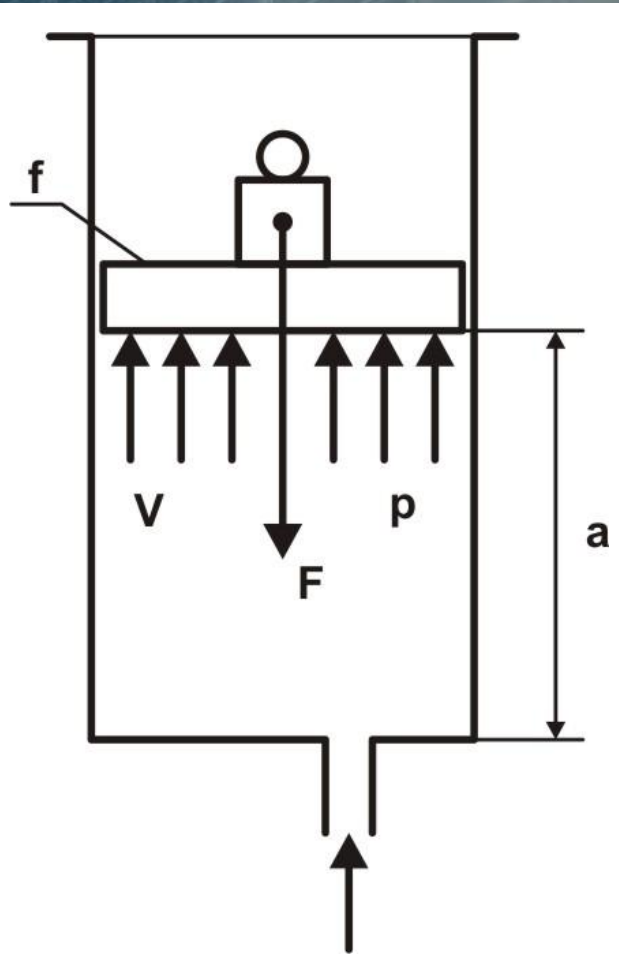


Рис. Иллюстрация энергии  
давления

Энтальпия иначе называется полной энергией, а ранее в технической системе единиц называлась теплосодержанием. Энтальпия представляет собой сумму внутренней энергии и энергии давления. Для одного килограмма вещества энтальпия определяется из выражения

$$h = u + p \vartheta. \quad (1.6.1)$$

Энтальпия для тела произвольной массы может быть определена как

$$H = U + p V \quad (1.6.2)$$

Таким образом, полная энергия системы, включающая в себя газ и груз на поршне, представляет собой сумму внутренней энергии газа и потенциальной энергии груза, что по уравнению (1.6.2) соответствует определению энтальпии газа, поступившего в цилиндр

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.7. Энтропия

В термодинамике используют еще один параметр состояния рабочего тела – энтропию, устанавливающую связь между количеством теплоты и температурой. Поясним этот параметр исходя из следующих соображений. Уравнение первого закона термодинамики можно записать в виде

$$dq = du + pdu = du + dl.$$

При умножении на интегрирующий множитель  $1/T$  (где  $T$  – абсолютная температура) приведенное выше уравнение примет вид

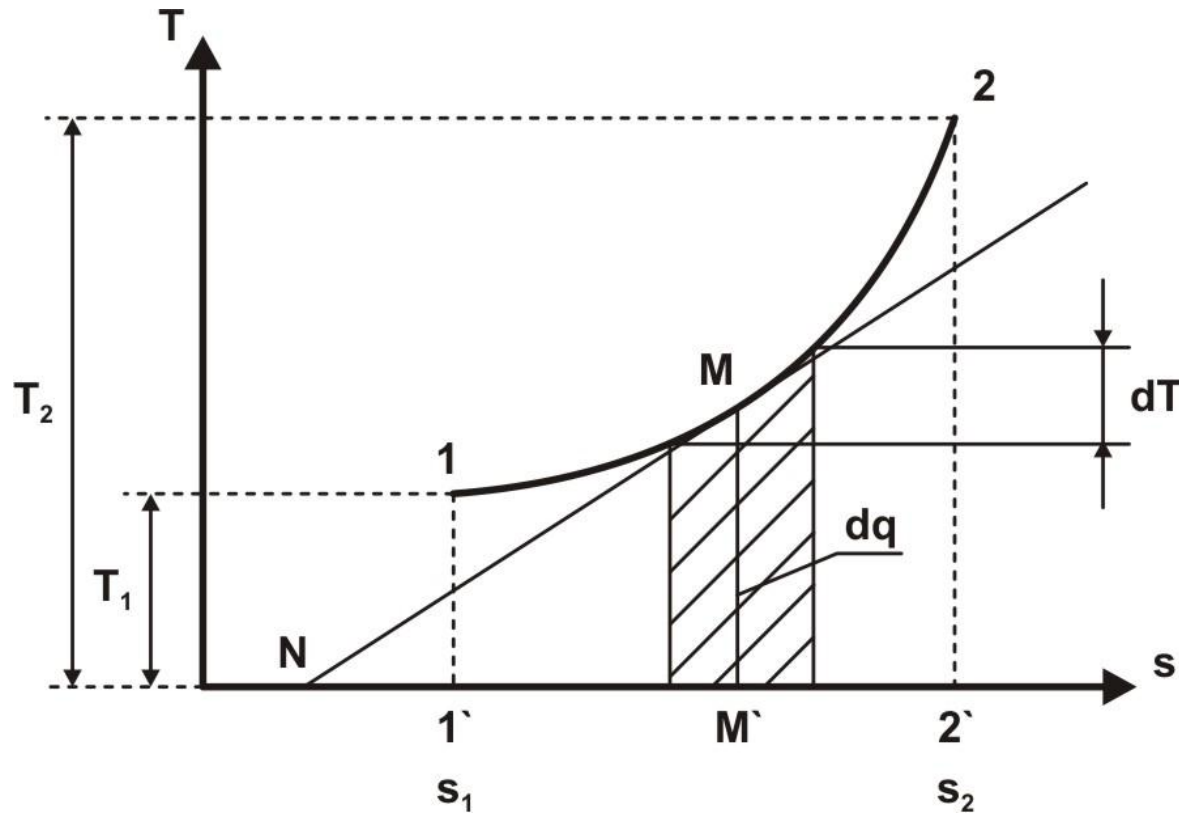
$$\frac{dq}{T} = \frac{du}{T} + \frac{dl}{T}$$

1) Энтропия – мера ценности теплоты, ее работоспособности и технологической эффективности.

2) Энтропия – мера потери работы вследствие необратимости реальных процессов. Чем более необратим процесс в изолированной системе, тем больше возрастает энтропия и тем большая доля энергии не превращается в работу, а рассеивается в окружающую среду.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.8. Тепловая $T, s$ - диаграмма



Для процесса 1-2 подводимое количество теплоты в  $T, s$  – диаграмме численно равно площади, расположенной под кривой процесса, т. е. количество подведенной теплоты равно площади  $1' - 1 - 2 - 2'$ .

Площадь под кривой процесса 1 – 2 представляет собой количество

теплоты  $q = \int_{s_1}^{s_2} TdS$

сообщенное телу извне, поскольку процесс связан с увеличением энтропии.

Изображение процессов в  $T, s$  - диаграмме, названной тепловой, в некоторых случаях более наглядно и удобно, чем в  $p, \vartheta$  – диаграмме.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.9. Круговые процессы или циклы

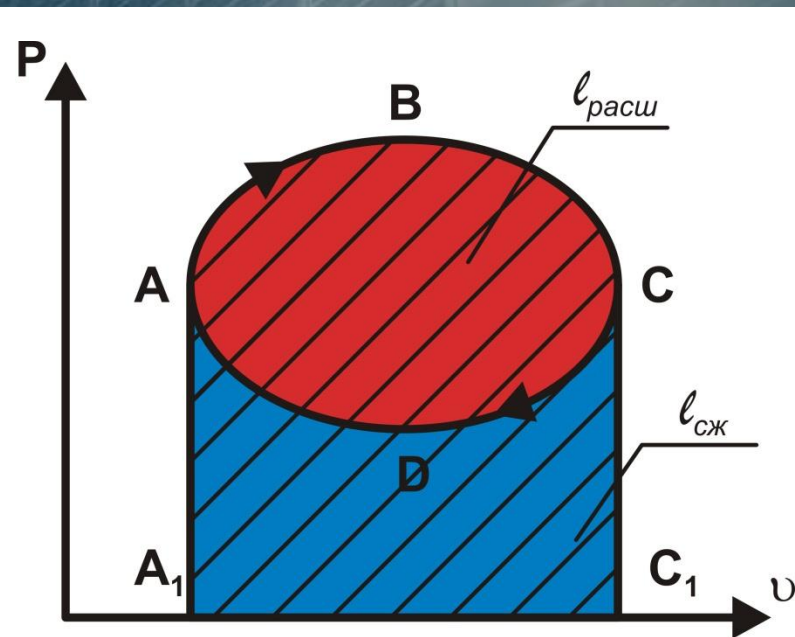


Рис.1.7. Круговой процесс в  $p, v$  - диаграмме

Чтобы непрерывно производить работу в тепловом двигателе, необходимо совершение кругового процесса (рис.1.7).

Рабочее тело многократно изменяет своё состояние по замкнутой кривой A-B-C-D-A и возвращается в начальное состояние A. Таким образом, начальное и конечное состояния рабочего тела идентичны.

На участке A-B-C рассматриваемого кругового процесса рабочее тело расширяется (прямой ход) и производит при этом положительную работу расширения A-B-C-C<sub>1</sub>-A<sub>1</sub> (заштрихованная площадь).

Эта работа совершается за счёт подвода теплоты  $q_1$  и изменения внутренней энергии  $u_C - u_A$ , происходящего согласно соотношению:

$$q_1 = u_C - u_A + \square_{расш}$$



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.9. Круговые процессы или циклы

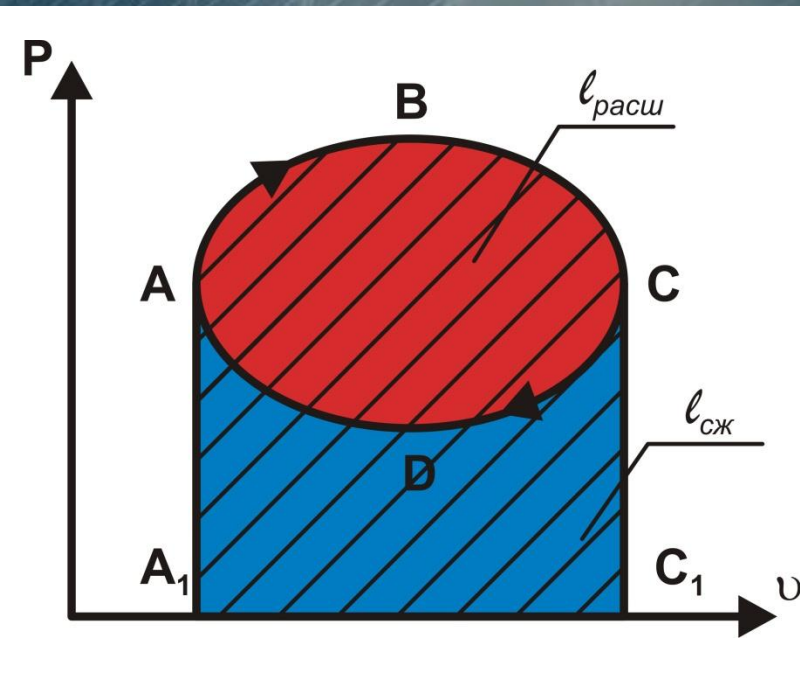


Рис.1.7. Круговой процесс в  $p, v$  - диаграмме

При превращении теплоты в работу в непрерывно действующем двигателе лишь часть подведённой от горячего источника теплоты  $q_1$  превращается в работу; оставшаяся часть  $q_2$  обязательно должна быть отдана в виде теплоты источнику с более низкой температурой.

Критерием для оценки теплового цикла служит КПД, представляющий собой отношение количества теплоты, превращённой в полезную работу, ко всей подведённой теплоте.

$$\eta_c = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

Из этого уравнения видно, что термический КПД цикла всегда меньше единицы, т.к. величина  $q_2 > 0$ .

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.10. Цикл Карно

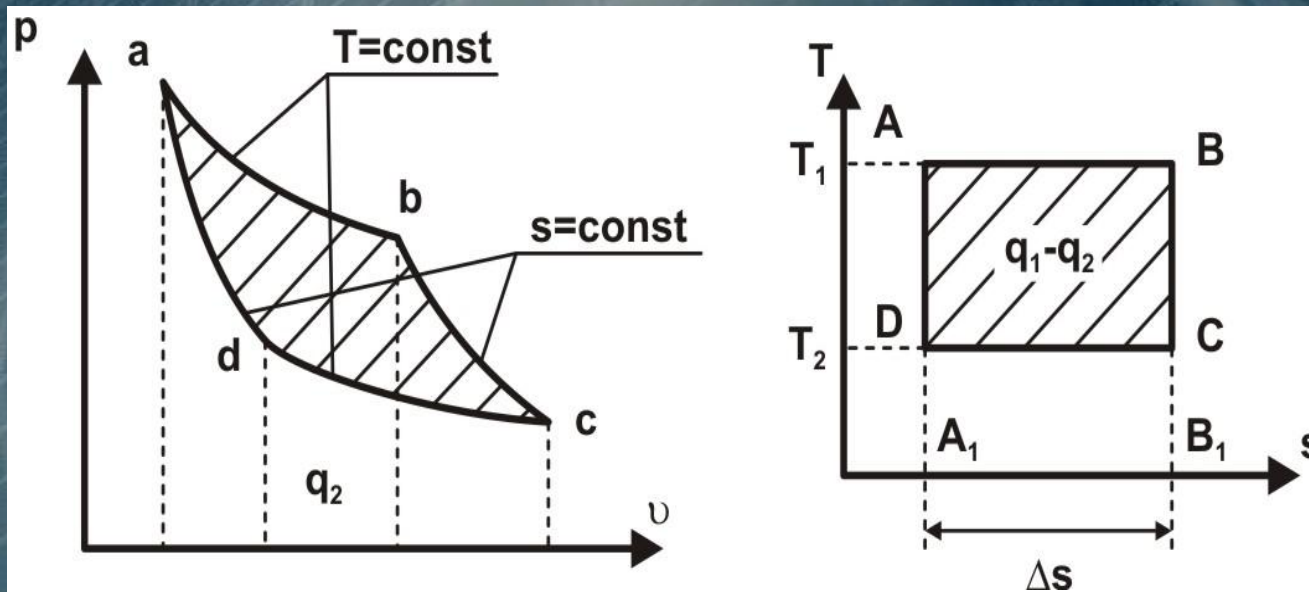


Рис.1.8. Цикл Карно в  $p, \vartheta$  - диаграмме и в  $T, s$  - диаграмме

$$\eta_t^K = \frac{\ell}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2 \Delta S}{T_1 \Delta S} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Теорема Карно: **Термический коэффициент полезного действия цикла Карно зависит только от абсолютных температур источника тепла и холодильника и не зависит от свойств рабочего тела.**

численно равная площади прямоугольника, изображающего цикл в  $T, s$  - диаграмме (рис. 1.8, б), определяется как разность **подведенной  $q_1$  и отведенной  $q_2$  теплоты.**

При осуществлении цикла Карно не вся **теплота  $q_1$**  источника превращается в работу, а только часть её ( **$q_1 - q_2$** ), другая же часть  **$q_2$**  отдается охладителю и не может быть использована ни для получения работы, ни для нагревательных целей, то есть является **тепловым отбросом** к

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.11. Водяной пар

### 1.11.1. Основные термодинамические свойства водяного пара

Рабочее тело на ТЭС – вода в агрегатных состояниях «жидкость» и «газ» (пар)

Виды водяного пара:

1. Сухой насыщенный пар
2. Влажный пар
3. Перегретый пар

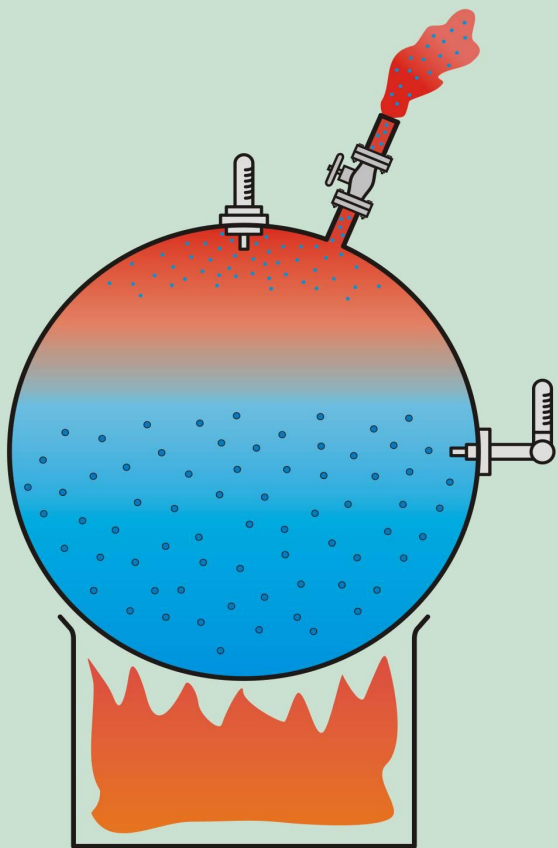
Водяной пар как рабочее тело получил широкое применение в теплотехнике. Пар представляет собой промежуточное состояние между жидкостью и газом. При высоких температурах и низких давлениях пар по своим свойствам приближается к идеальному газу. В паровых двигателях и теплообменных аппаратах пар используется при таких давлениях и температурах, что применение к нему законов и уравнений состояния идеального газа приводит к большим неточностям при вычислениях.

Наиболее точные уравнения состояния водяного пара имеют довольно сложный вид и требуют громоздких вычислений. Поэтому при расчётах обычно применяются таблицы и диаграммы, построенные по опытным данным.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.11. Свойства рабочего тела

### 1.11.2. Образование сухого насыщенного пара



Чтобы понять разницу между состояниями водяного пара, рассмотрим процесс превращения воды в пар.

Нагреваем воду в сосуде при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

При достижении водой температуры 100 °С начинается её интенсивное кипение с образованием пара

Если в образовавшемся паре нет капелек воды (жидкой фазы), тогда пар называется *сухим насыщенным*. Температура и пара и воды будет равной 100 °С пока не выкипит вся жидкая фаза.

Эту температуру называют температурой *кипения*, или *температурой насыщения*, и обозначают  $t_n$ .

Тепловая энергия, расходуемая на поддержание кипения в сосуде, затрачивается на разрыв связей между молекулами воды, т.е. на ее испарение.

Молекулы испарившейся жидкости – пара обладают бóльшей, чем молекулы воды, энергией на величину удельной (скрытой) теплоты парообразования  $r$ , представляющей собой количество тепловой энергии, необходимой для испарения 1 кг кипящей жидкости



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.11. Свойства рабочего тела

### 11.1.3. Образование влажного пара

Если температуру сухого насыщенного пара снизить (а это можно сделать только путем одновременного снижения давления), то часть пара сконденсируется и в нем появятся капельки воды, «парящие» в объеме пара (рис. 1.6.3). Такой пар называется влажным.

Важно усвоить, что температура насыщения воды однозначно определяется давлением над ее поверхностью.

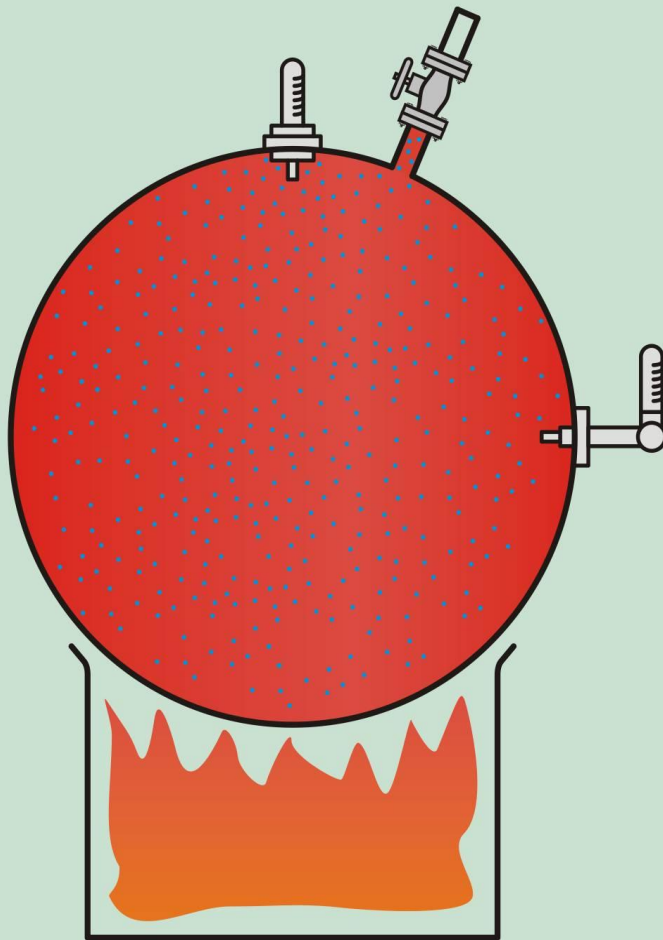


Рис. 1.6.3. Образование влажного пара



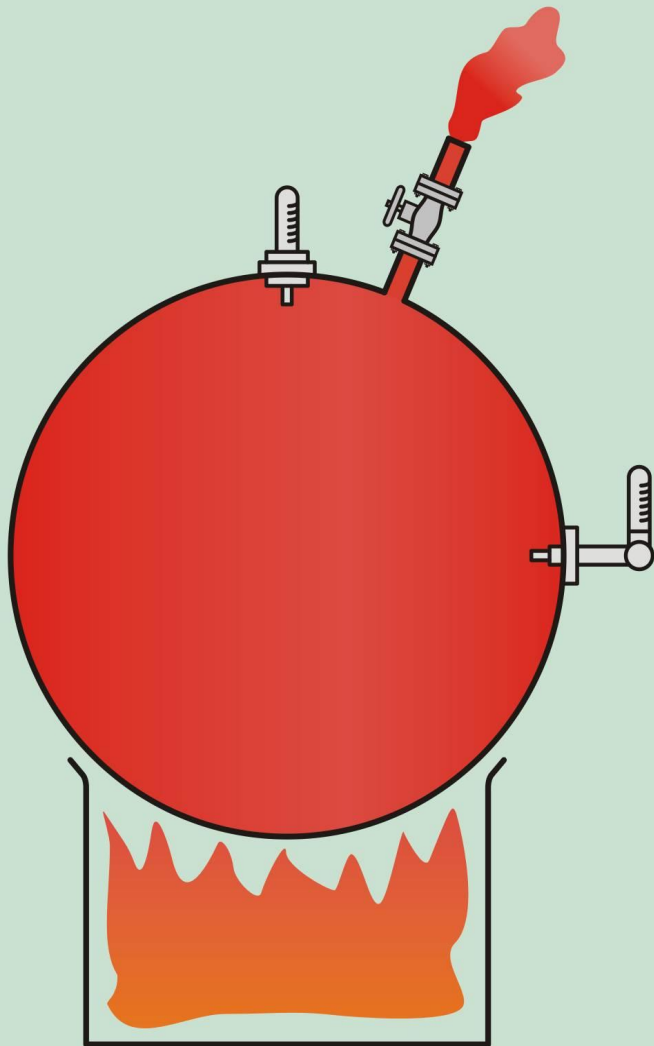
# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.11. Свойства рабочего тела

### 11.1.4. Образование перегретого пара

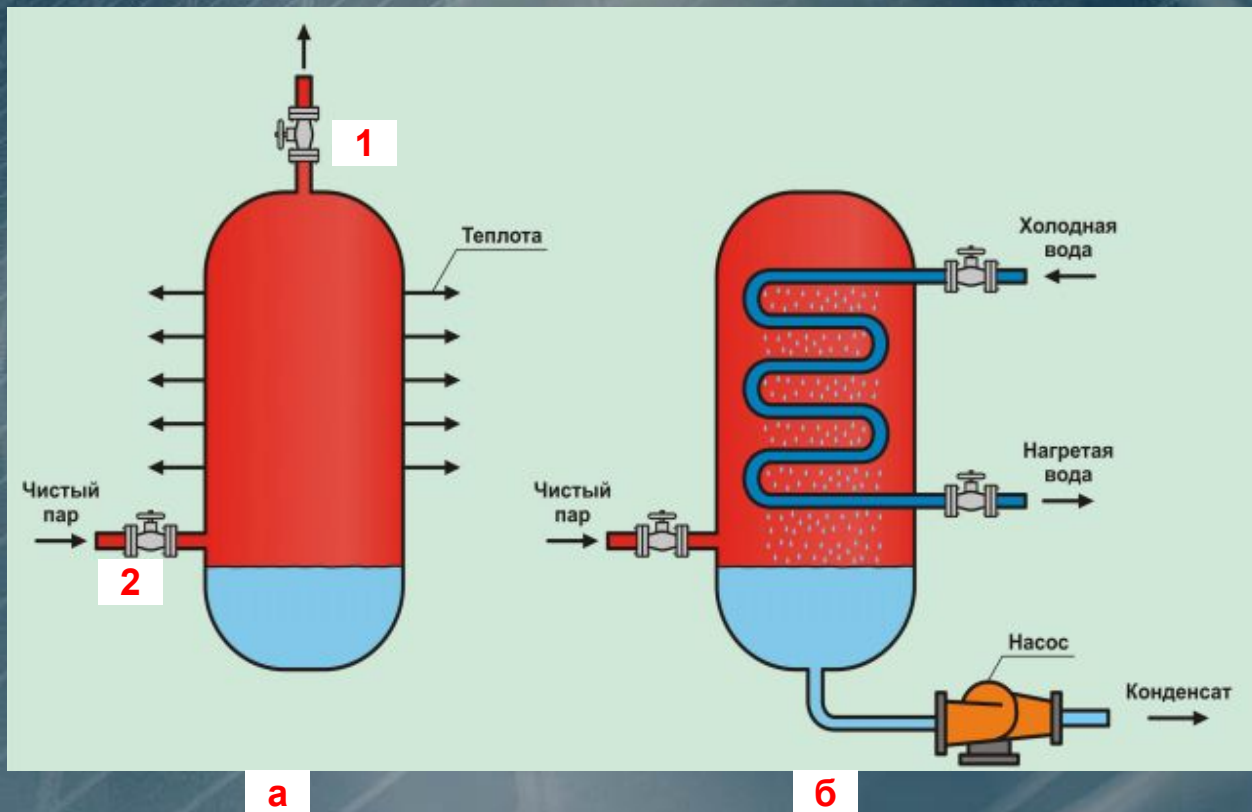
Если продолжать нагревание сухого насыщенного пара, то температура пара в сосуде будет повышаться – пар станет перегретым.

Именно перегретый пар является рабочим телом в паротурбинном цикле на тепловых электрических станциях.



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.12. Конденсация пара



1. Если сосуд заполнить паром и закрыть вентили 1 и 2, то в сосуде становится некоторое давление пара

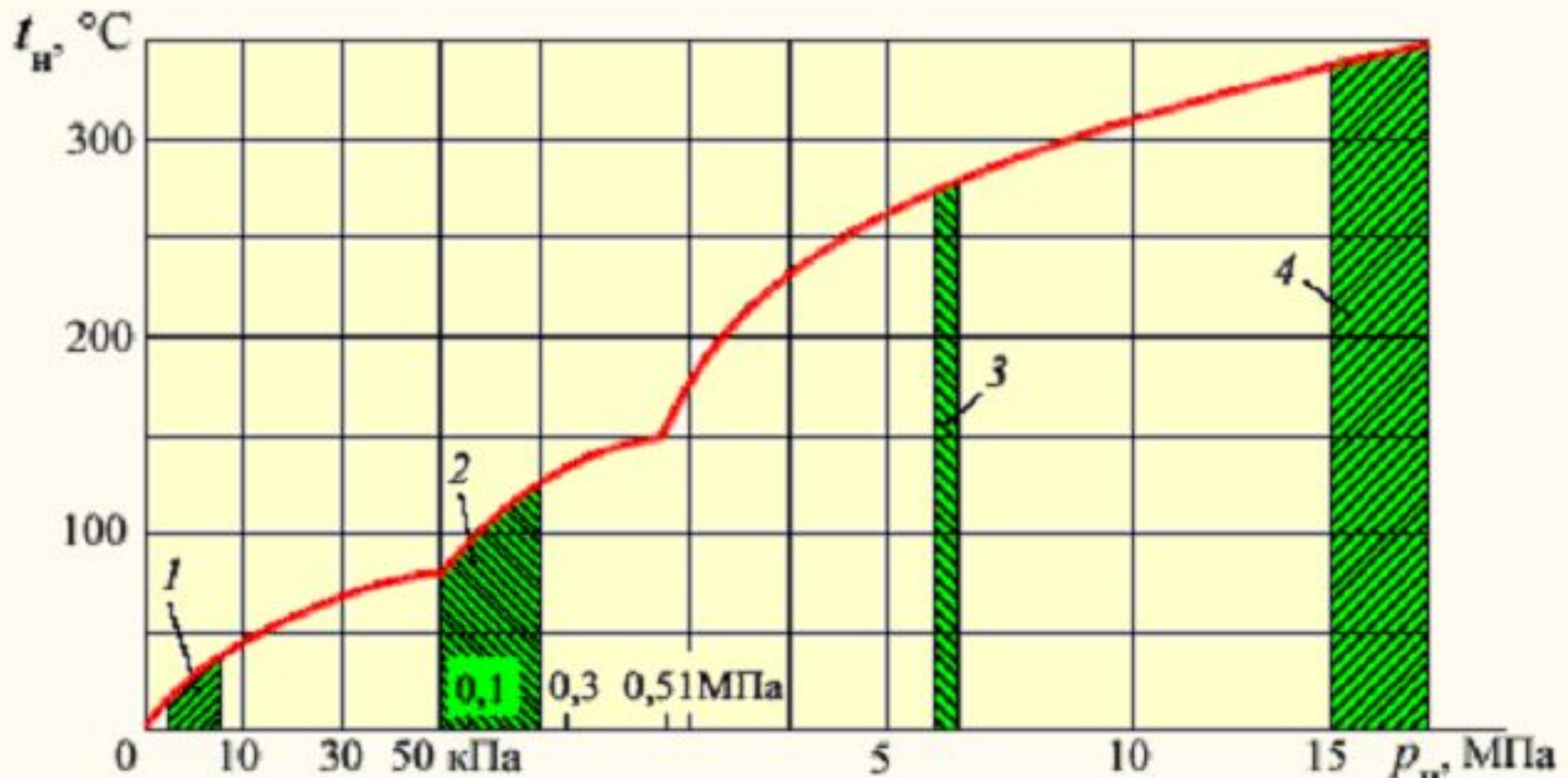
2. Если теперь поместить сосуд в холодную среду, то пар будет отдавать тепло через стенки сосуда этой среде

3. Если изначально пар был сухим насыщенным, то отдавая тепло, пар сначала станет влажным, а затем начнется его конденсация с образованием жидкой фазы

4. При конденсации пара в таких условиях температура конденсата будет постоянно уменьшаться, при этом будет уменьшаться и давление в сосуде.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

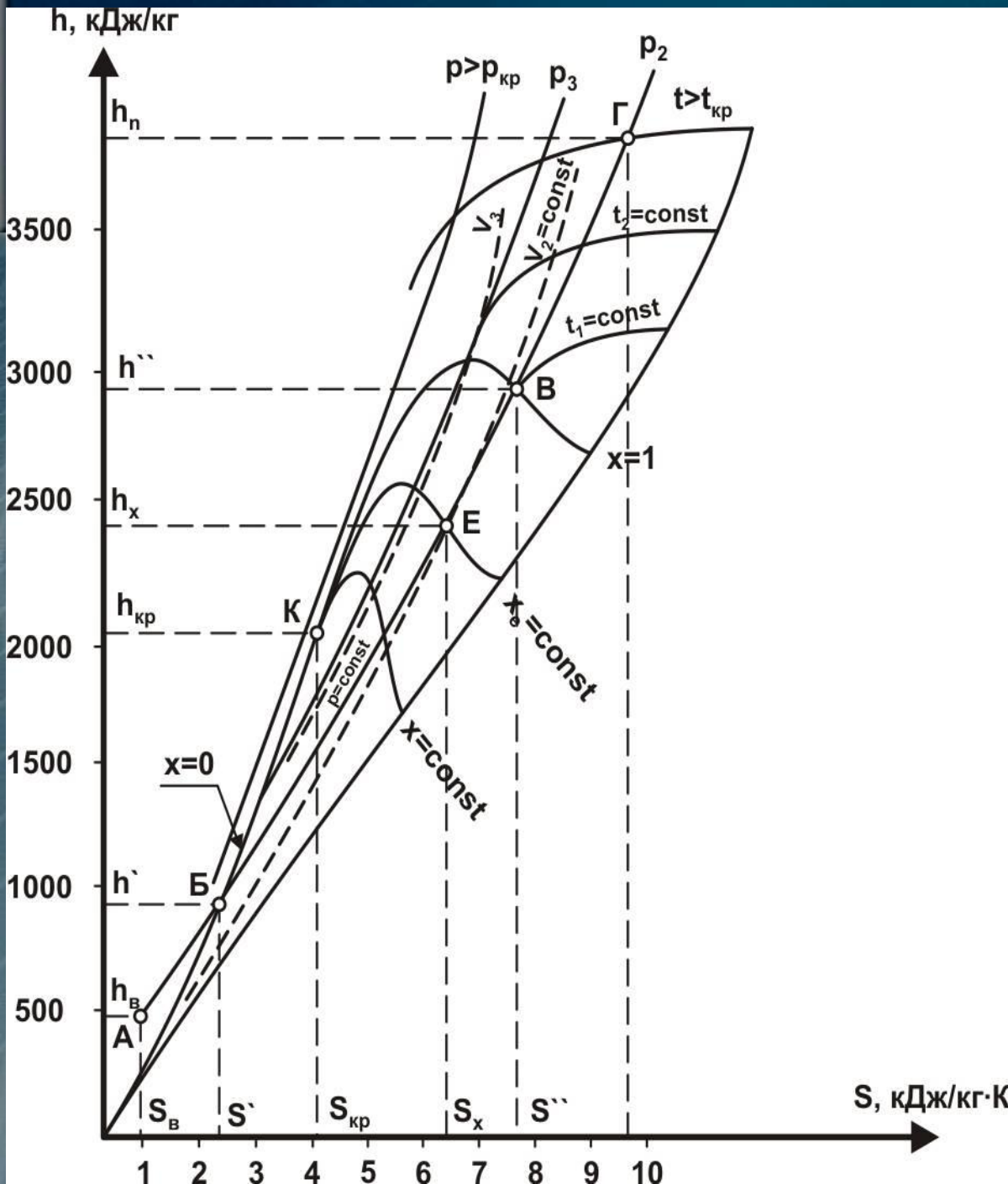
## 1.13. Связь температуры насыщения с давлением



Связь между температурой и давлением кипения (конденсации, испарения) с указанием областей работы: 1 – конденсаторы паровых турбин ( $0,04 - 0,07 \text{ кг/см}^2$ ,  $4 - 7 \text{ кПа}$ ); 2 – сетевые подогреватели ( $0,6 - 2,0 \text{ кг/см}^2$ ,  $0,06 - 0,2 \text{ МПа}$ ); 3 – парогенераторы АЭС ( $60 \text{ кг/см}^2$ ,  $6,0 \text{ МПа}$ ); барабаны современных котлов ( $155 \text{ кг/см}^2$ ,  $15,5 \text{ МПа}$ )







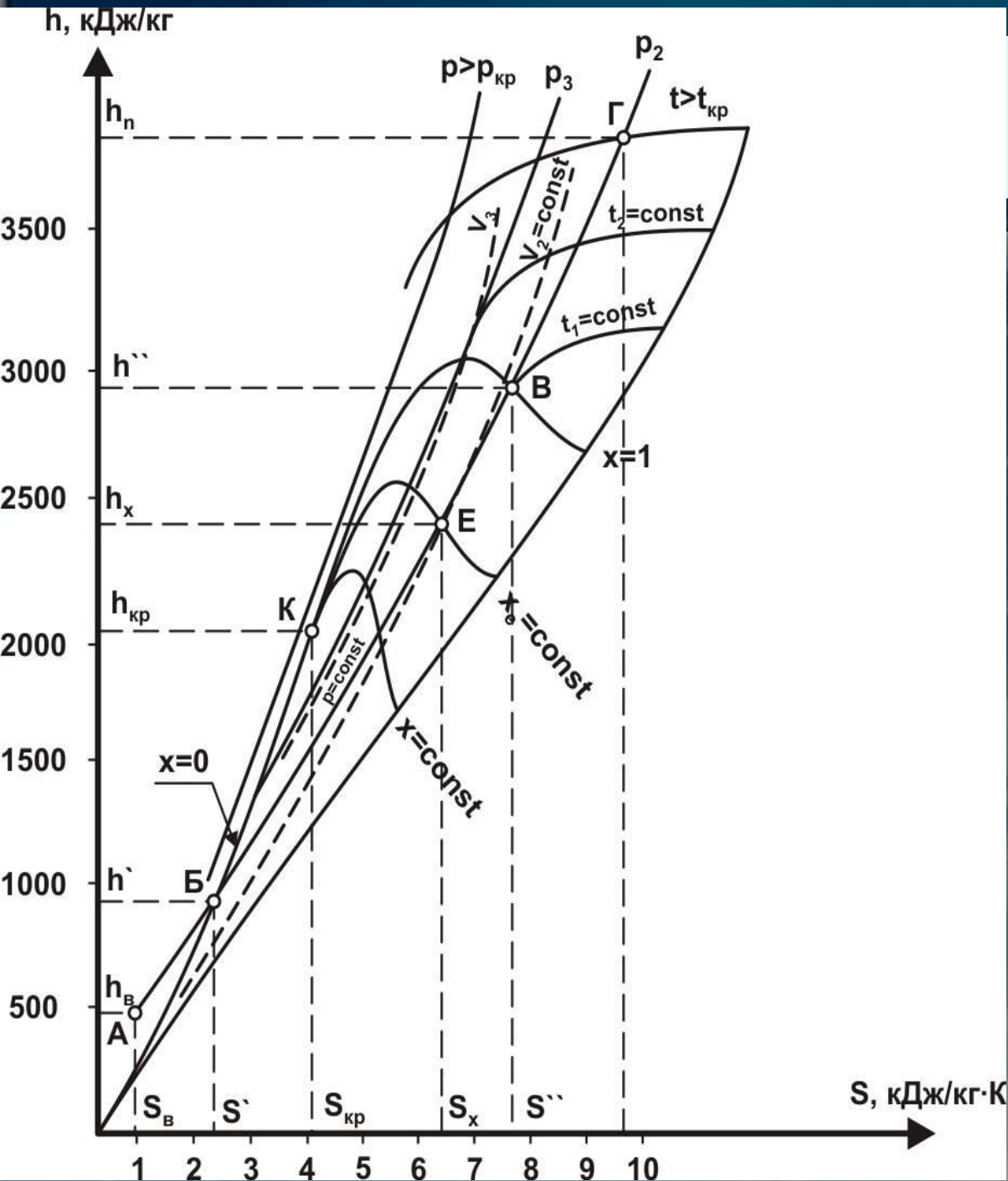
## 1.14. Тепловая $h, s$ – диаграмма воды и водяного пара

Рассмотренная выше  $T, s$  – диаграмма даёт возможность наглядно показать характер протекания процесса превращения воды в пар.

Однако в этой диаграмме определять количество теплоты в процессах сложно, т.к. это связано с расчётом соответствующих площадей, частично ограниченных кривыми линиями

Для практических расчётов обычно используют  $h, s$  – диаграммой – водяного пара, по которой это выполнить значительно проще





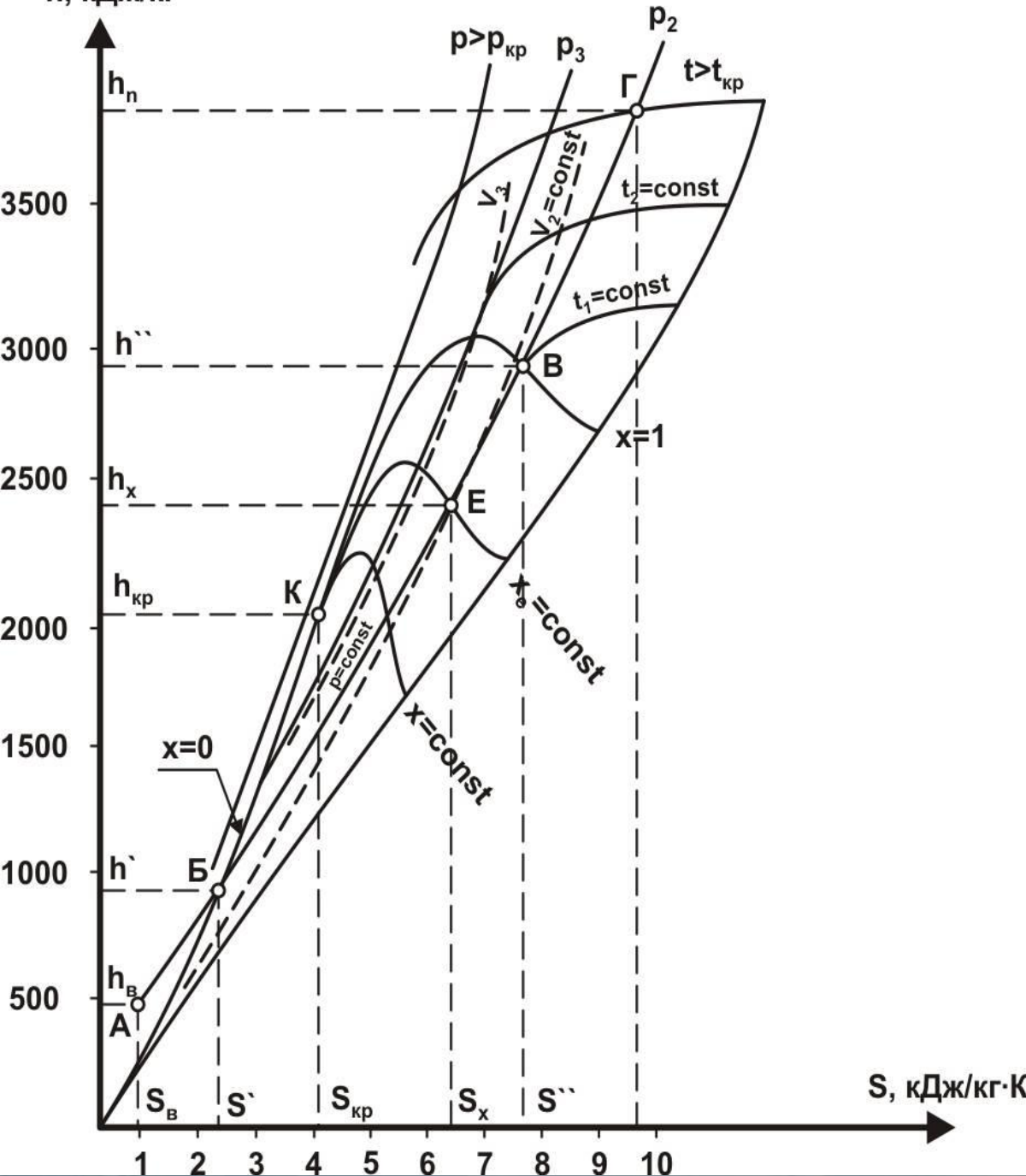
## 1.14. Тепловая $h, s$ – диаграмма воды и водяного пара

На  $h, s$  – диаграмме показаны нижняя ( $x = 0$ ) и верхняя ( $x = 1$ ) пограничные кривые.

Координатами точек нижней пограничной кривой являются табличные значения энтальпии  $h'$  и энтропии  $s'$  воды на линии насыщения,

а верхней пограничной кривой – энтальпии и энтропии сухого насыщенного пара:  $h''$  и  $s''$ .

$h, \text{кДж/кг}$



# 1.14. Тепловая $h, s$ – диаграмма воды и водяного пара

Верхняя пограничная кривая имеет сложную конфигурацию и расположена выше критической точки «К», которая не является верхней точкой слияния пограничных кривых, а смещена от вершины влево и вниз.

Параметры критической точки:

$h_{кр} = 2095,2 \text{ кДж/кг};$   
 $s_{кр} = 4,4237 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$

Максимальное значение энтальпии сухого насыщенного пара составляет

**2 801,9 кДж/кг** при давлении около 3 МПа.



## 1.16. Свойства водяного пара как рабочего тела

Пример использования  $h, s$  – диаграммы приведен на рис., где показан процесс расширения пара в турбине.

Процесс 1 – 2 является адиабатным, т. е. теоретическим процессом расширения пара без потерь энергии. Реальный процесс расширения пара в турбине показан прямой 1 – 3.

Анализируя два эти процесса можно показать меньшую эффективность реального процесса по сравнению с теоретическим и определить потери в реальном процессе  $\Delta h$ , как разность энтальпий в точках 3 и 2. В этом процессе потери составляют 222 кДж/кг, следовательно, КПД цикла равен:

$$\eta = (h_0 - h^*) / (h_0 - h_k) = (3285 - 2247) / (3285 - 2025) = 1038 / 1260 = 0,824 (82,4 \%)$$

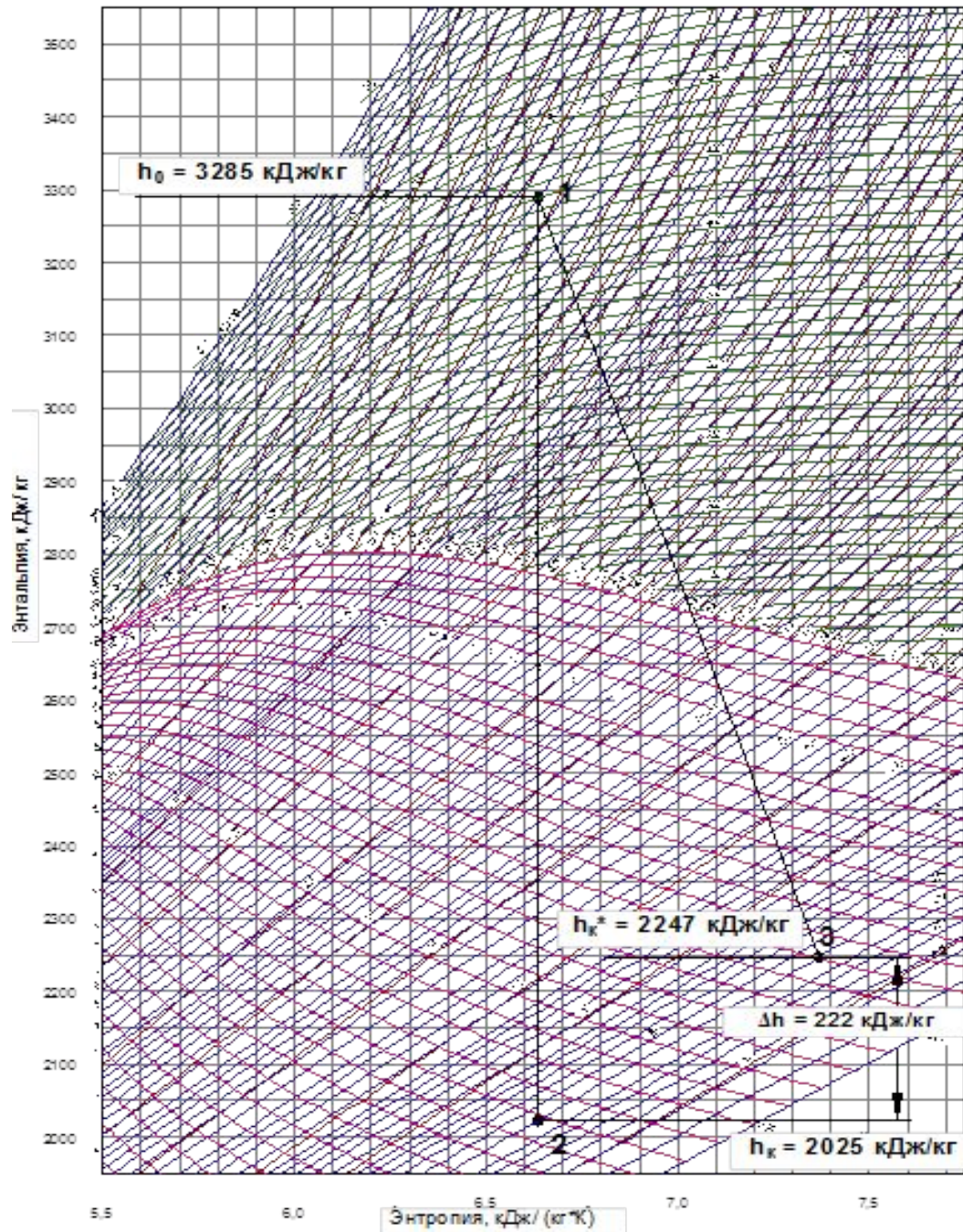


Рис. 1.6.7. Тепловая  $h, s$  - диаграмма для воды и водяного пара при  $x > 0,5$

# Процесс расширения пара в турбине

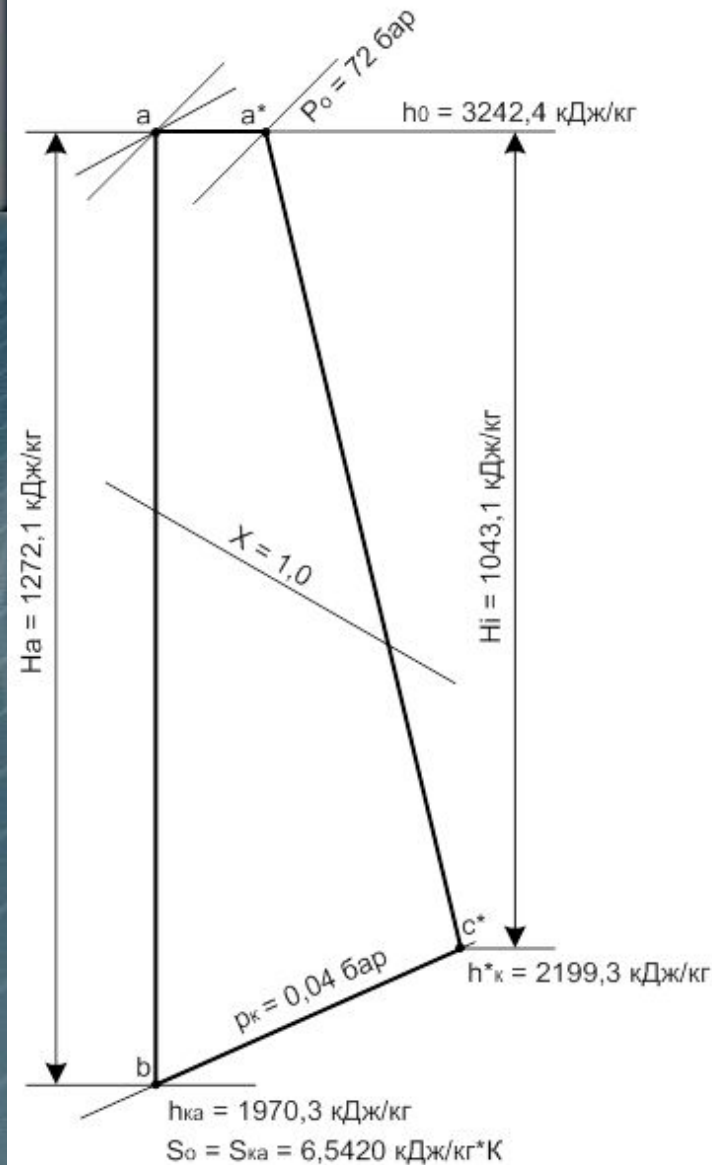


Рис. 2а. Схема условного процесса расширения пара в турбине в h-s диаграмме

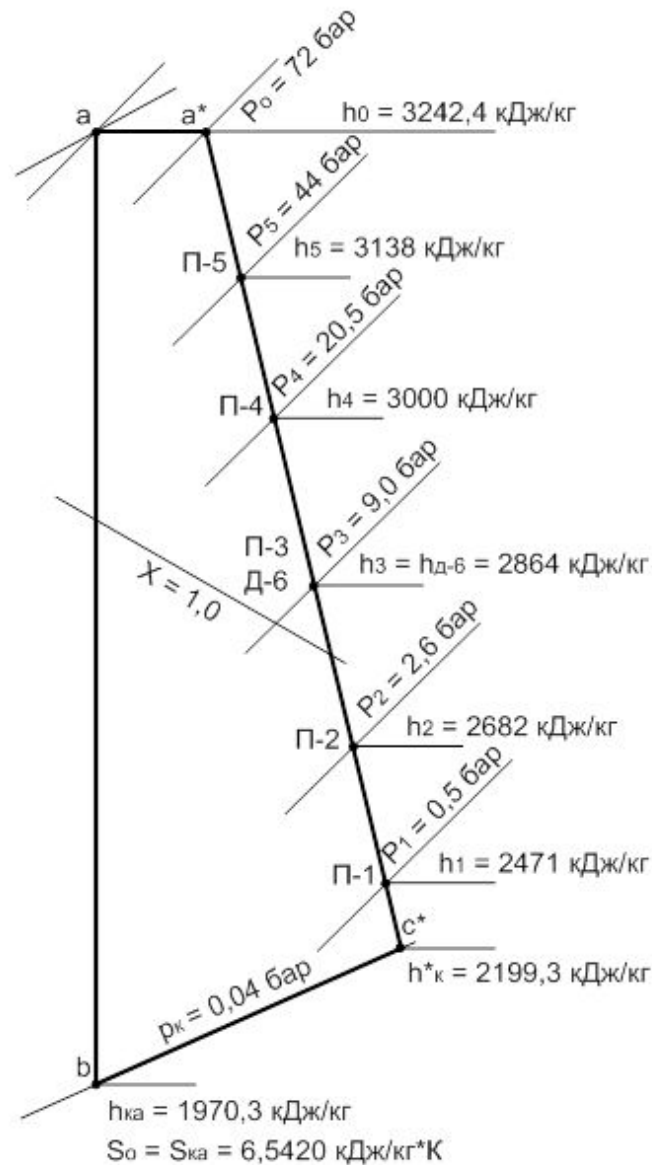


Рис. 2б. Схема условного процесса с изобарами в камерах отборов турбины на регенерацию в h-s диаграмме