## 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

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.

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  $\theta$ . В общем виде уравнение состояния рабочего тела может быть представлено в виде функциональной зависимости  $f(p, \theta, T) = 0$ . Это уравнение можно также выразить в виде

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

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:

 $p\theta = RT$ ,

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

- p давление,  $H/M^2$  ( $\Pi a$ );
- $\vartheta$  удельный объём, м $^3/\kappa z$ ; T абсолютная температура, К.

Уравнение, выведенное Клапейроном, содержало некую <u>неуниверсальную</u> 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 <u>универсальной газовой постоянной</u>

5

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  $p_o = 0,10133 \text{ MH/m}^2$  (760 мм рт.ст.) и температуре  $T_o = 273,15 \text{ K}$  (0 °C) объем 1 кмоль идеального газа  $V\mu = 22,4146 \text{ m}^3$ .

Подставив эти значения в уравнение, получим величину <u>универсальной газовой постоянной</u>

$$R_{\mu} = \mu R = \begin{bmatrix} 0.10133 & 10^6 & 22.4146 \\ \hline 273.15 \end{bmatrix} = 8 \ 315$$
 (Дж/моль·град)

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.4. Внутренняя энергия тела

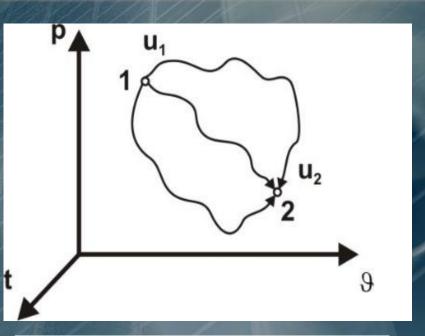


Рис. 1.2.1. Изменение внутренней энергии рабочего тела

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

<u>первая</u> – скоростью движения и массой частиц,

<u>вторая</u> – 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,  $\vartheta$ , T), и, следовательно, du есть полный дифференциал этой функции, т.е.  $u = f(p, \vartheta, T)$  и  $du = df(p, \vartheta, T)$ .

#### основные положения

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.4. Внутренняя энергия тела

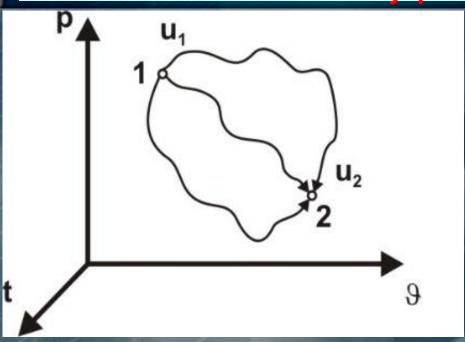


Рис. 1.2.1. Изменение внутренней энергии рабочего тела

Поэтому, при переходе тела (рис. 1.2.1) из состояния 1, определяемого величинами  $p_1$ ,  $\theta_1$ ,  $t_1$ , в состояние 2, определяемое величинами  $p_2$ ,  $\theta_2$ ,  $t_2$ , изменение внутренней энергии 1 кг тела определяется как

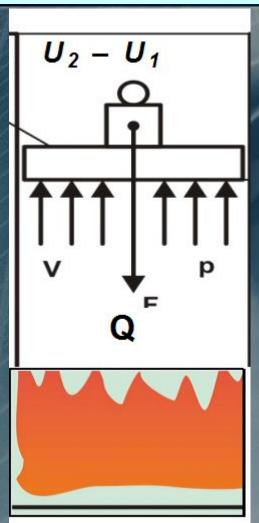
$$u_2 - u_1 = f(p_2, \vartheta_2, t_2) - f(p_1, \vartheta_1, t_1),$$

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.

8

### 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 Нермидлиймий 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 термодинамиики имеет вид:

 $q = U_2 - U_1 + \square.$ 

В этом уравнении все величины (*Q, U,* □) являются удельными, т. е. относятся к *1 кг* массы рабочего тела и измеряются Дж/кг

#### основные положения

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

#### 1.6. Энтальпия идеального газа

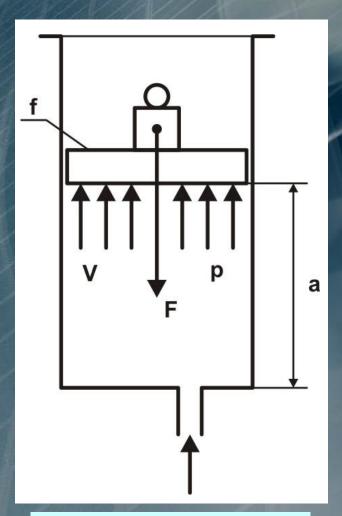


Рис. Иллюстрация энергии давления

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

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

DISTRICTCENT

Таким образом, <u>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</u>

#### 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 + pdv = du + dl.

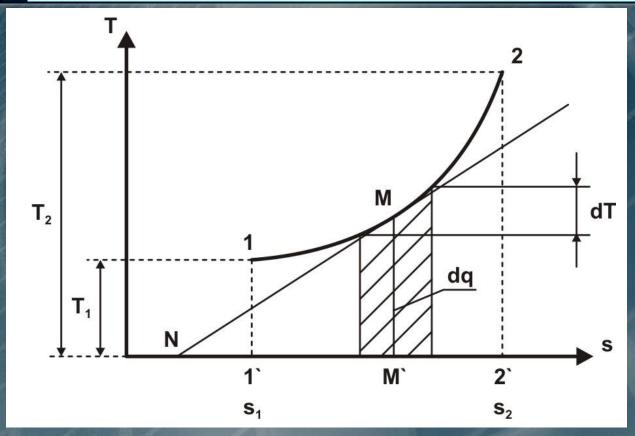
При умножении на интегрирующий множитель 1/*T* (где *T* – абсолютная температура) приведенное выше уравнение примет вид

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

- 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.

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.8. Тепловая T, s - диаграмма



Изображение процессов в Т, s - диаграмме, названной тепловой, в некоторых случаях более наглядно и удобно, чем в р, θ – диаграмме.

Для процесса 1-2 подводимое количество теплоты в Т, 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.

12

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.9. Круговые процессы или циклы

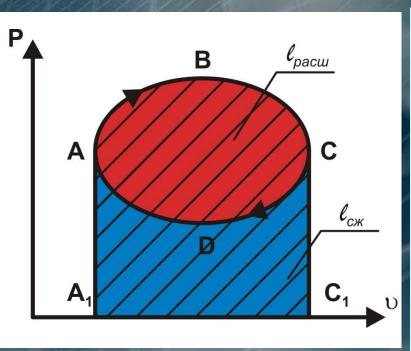


Рис.1.7. Круговой процесс в р,  $\vartheta$  - диаграмме

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-C1-A1 (заштрихованная площадь).

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

$$q_1 = u_C - u_A + \Box_{pacm}.$$

1.9. Круговые процессы или циклы

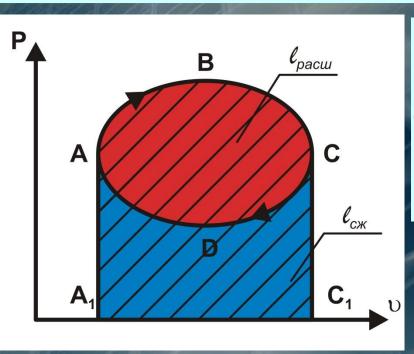


Рис.1.7. Круговой процесс в р,  $\vartheta$  - диаграмме

При превращении теплоты в работу в непрерывно действующем двигателе лишь часть подведённой от горячего источника теплоты  $q_1$  превращается в работу; остальная 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.

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

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

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.10. Цикл Карно

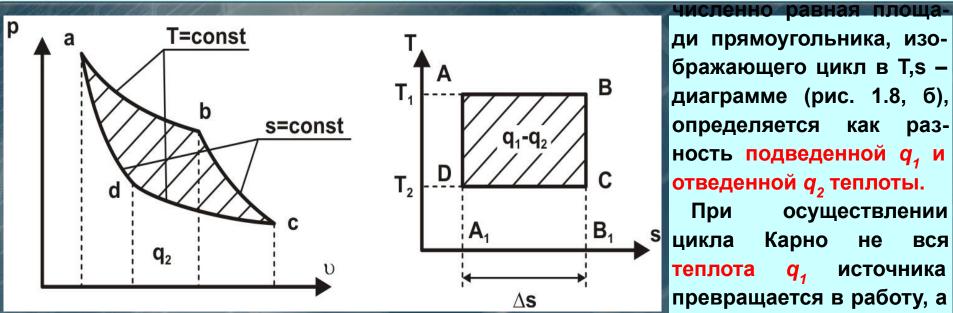


Рис.1.8. Цикл Карно в р,  $\vartheta$  - диаграмме и в T,s - диаграмме

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

Теорема Карно: Термический коэффициент лезного действия цикла Карно зависит только от для абсолютных температур источника тепла и холо-

дильника и не зависит от свойств рабочего тела.

бражающего 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 источника превращается в работу, а еë только часть  $(q_1 - q_2)$ , другая же часть  $q_2$  отдается охладителю и

тэжом

целей, то есть является

тепловым отбросом

использована

получения

быть

ДЛЯ

НИ

нагревательных

работы, ни

## 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

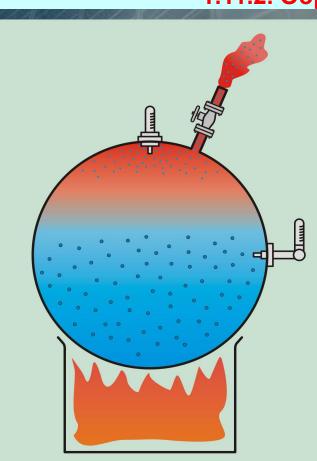
Водяной пар как рабочее тело получил широкое применение в теплотехнике. Пар представляет собой промежуточное состояние между жидкостью и газом. При высоких температурах и низких давлениях пар по своим свойствам приближается к идеальному газу. В паровых двигателях и теплообменных аппаратах пар используется 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.

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОЛИНАМИКИ

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 °C пока не выкипит вся жидкая фаза.

Эту температуру называют температурой *кипения, или температурой насыщения*, и обозначают  $t_{..}$ .

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 <u>бо́льшей</u>, чем молекулы воды, энергией на величину <u>удельной (скрытой) теплоты парообразования </u><u>г</u>, представляющей собой количество тепловой энергии, необходимой для испарения 1 кг кипящей жидкости

#### основные положения

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.11. Свойства рабочего тела

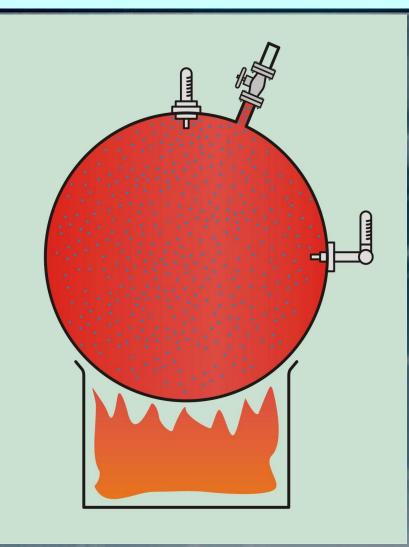


Рис. 1.6.3. Образование влажного пара

11.1.3. Образование влажного пара

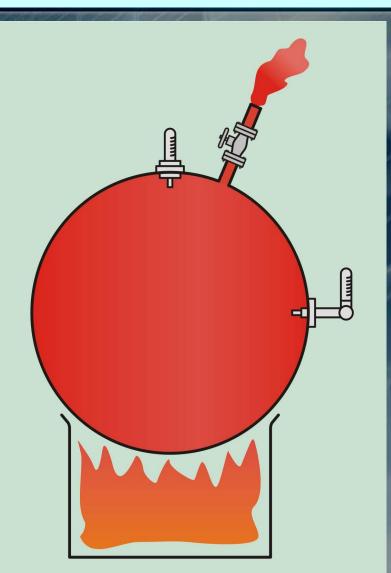
Если температуру сухого насыщен-ного пара снизить (а это можно сделать только путем одновременного снижения давления), то часть пара сконденсируется и в нем появятся капельки воды, «парящие» в объеме пара (рис. 1.6.3). Такой пар называется влажным.

Важно усвоить, что <u>темпера-тура насыщения воды</u> одно-значно определяется давлением над ее поверхностью.

## основные положения

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.11. Свойства рабочего тела

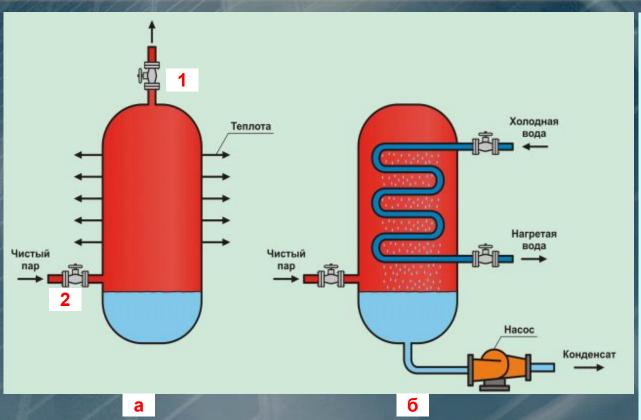


11.1.4. Образование перегретого пара

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 <u>тепловых</u> электрических станциях.

1.12. Конденсация пара

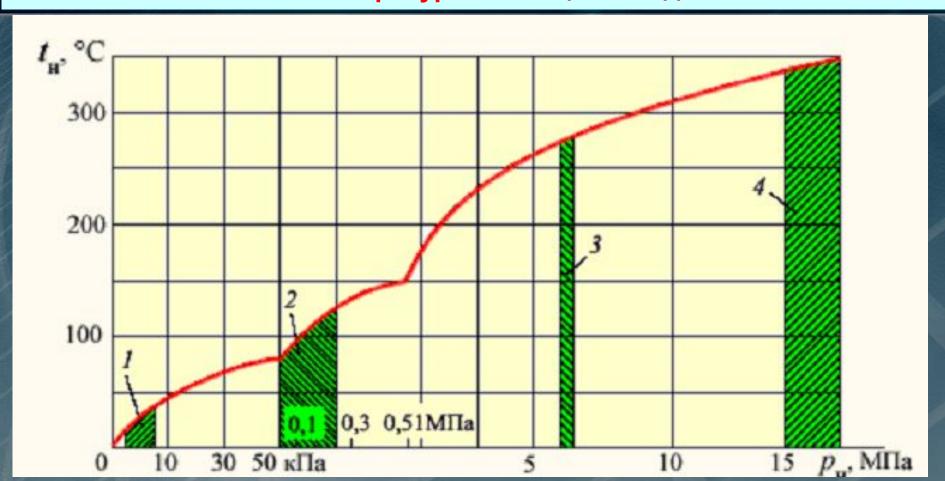


4. При конденсации пара в таких условиях температура конденсата будет постоянно уменьшаться, при этом будет уменьшаться и давление в сосуде.

- 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 насыщен-ным, то отдавая тепло, пар сначала станет влажным, а затем на-чнется его конденсация с образованием жидкой фазы

## ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

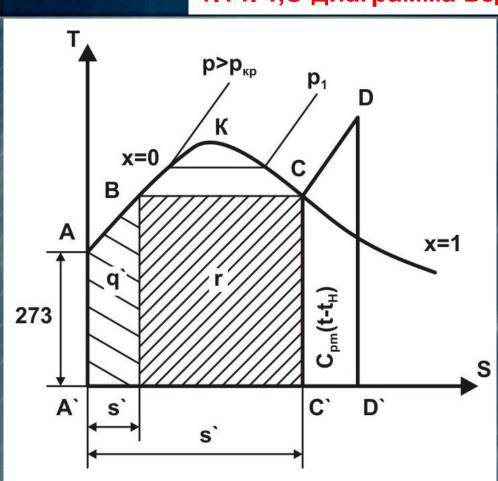
1.13. Связь температуры насыщения с давлением



Связь между температурой и давлением кипения (конденсации, испарения) с указанием областей работы: 1 – конденсаторы паровых турбин (0,04 – 0,07 кг/см², 4 – 7 кПа); 2 – сетевые подогреватели (0,6 – 2,0 кг/см², 0,06 – 0,2 МПа); 3 – парогенераторы АЭС (60 кг/см², 6,0 МПа); барабаны современных котлов (155 кг/см², 15,5 МПа)

#### ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.14. T,S-диаграмма воды и водяного пара



Пограничными линиями диаграммы являются линии x = 0 кривая ABK, каждая точка которой соответствует состоянию кипящей воды, и x = 1, кривая КСЕ, соответствующая состоянию сухого насыщенного пара.

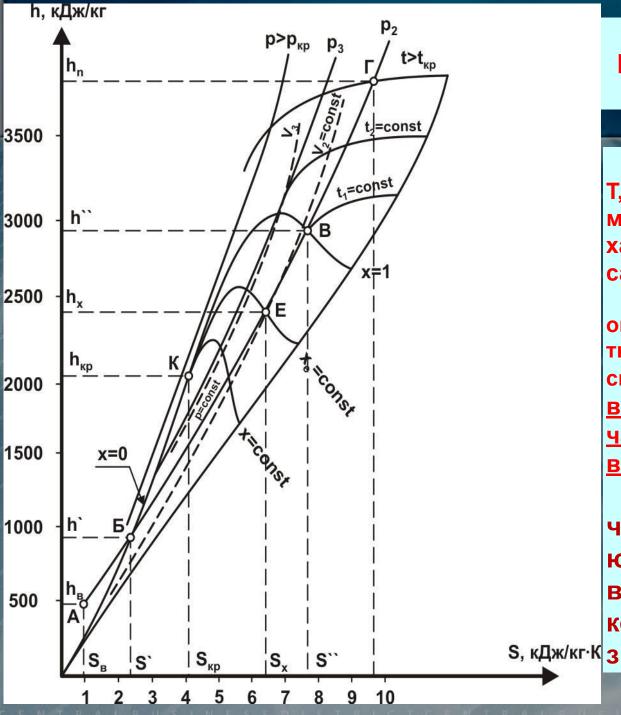
Параметр х, называемый степенью сухости пара, показывает, сколько по массе в паре находится сухого насыщенного пара и капель воды.

Пограничные линии x = 0 и x = 1 сходятся в критической точке K, где свойства пара и воды неразличимы.

Для водяного пара параметры в критической точке составляют:

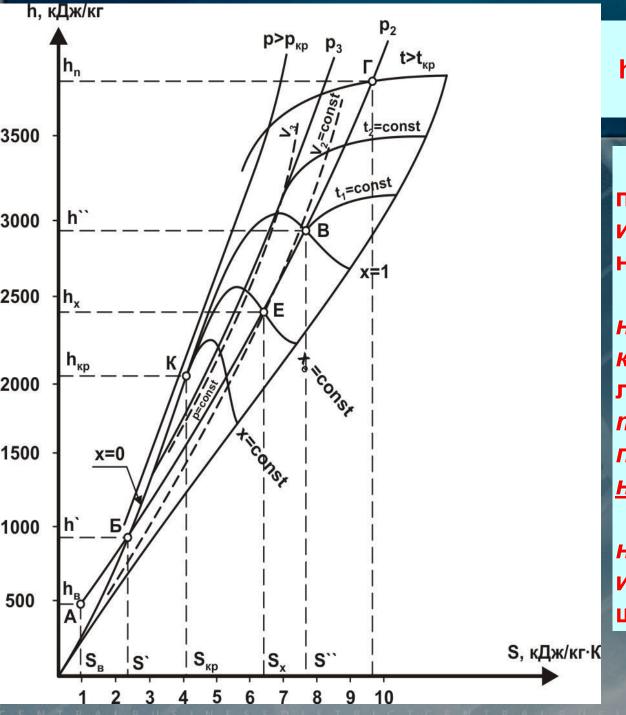
р<sub>кр</sub> = 221 бар, t<sub>кр</sub> = 374 °C и ϑ = 0,003147 м³/кг.

Левее и выше линии X = 0 параметры среды соответствуют воде, нагретой до темпе-ратуры кипения, правее и выше линии X = 1 – перегретому пару , а между линиями X = 0 и X = 1 – влажному пару



#### 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 s, кДж/кг·К значительно проще

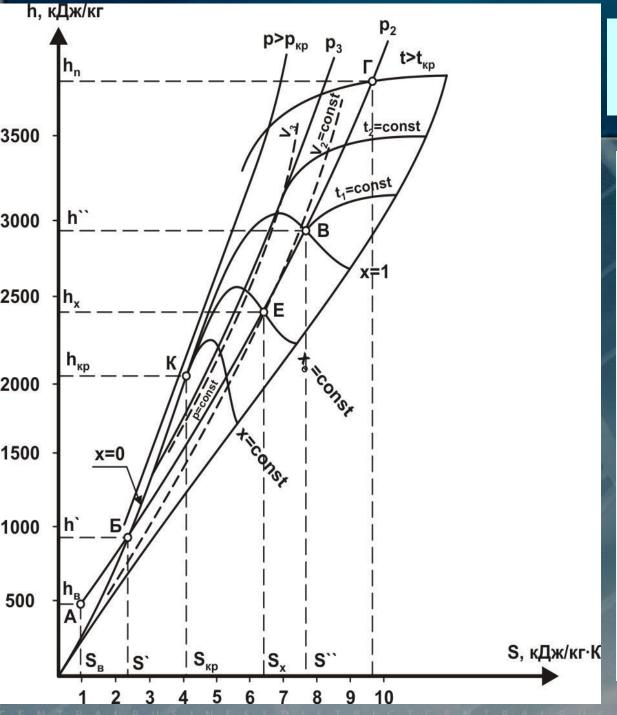


1.14. Тепловая h, s – диаграмма воды и водяного пара

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 энторопии s' воды на линии насыщения,

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

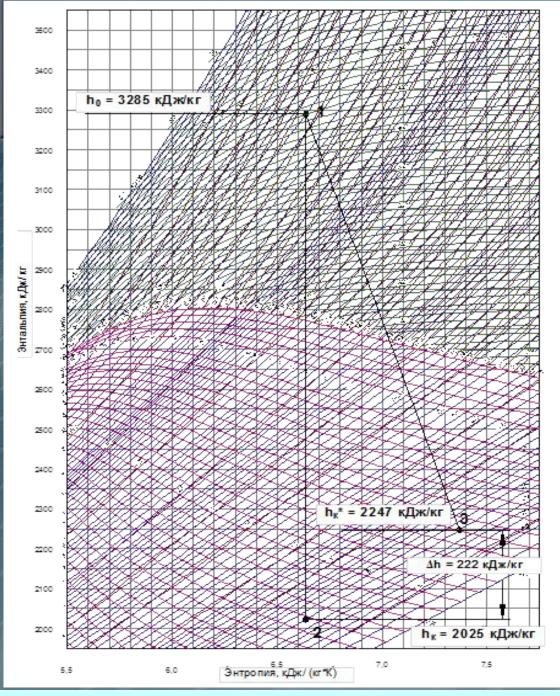


1.14. Тепловая h, s – диаграмма воды и водяного пара

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<sub>кр</sub> = 2095,2 кДж/кг; s<sub>кр</sub> = 4,4237 кДж/(кг\*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:

 $\eta = (h_o - h_k^*) / (h_o - h_k) =$  (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

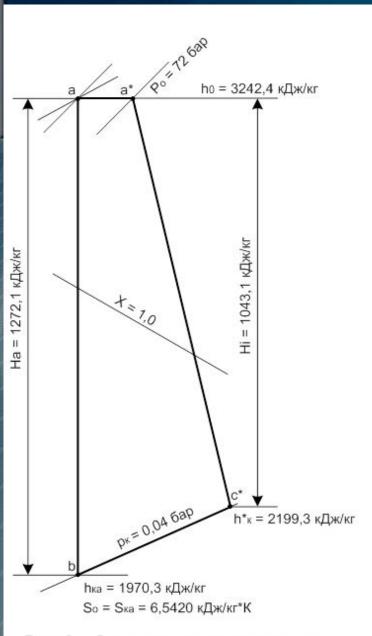


Рис. 2a. Схема условного процесса расширения пара в турбине в h-s диаграмме

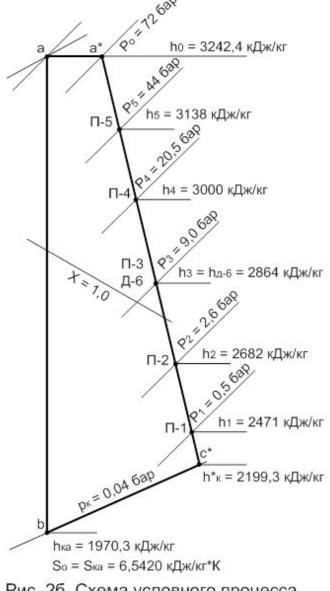


Рис. 2б. Схема условного процесса с изобарами в камерах отборов турбины на регенерацию в h-s диаграмме Процесс расширения пара в турбине