

Энтропия – мера энергии, передаваемой системе в виде теплоты.

$$ds = \delta q / T.$$

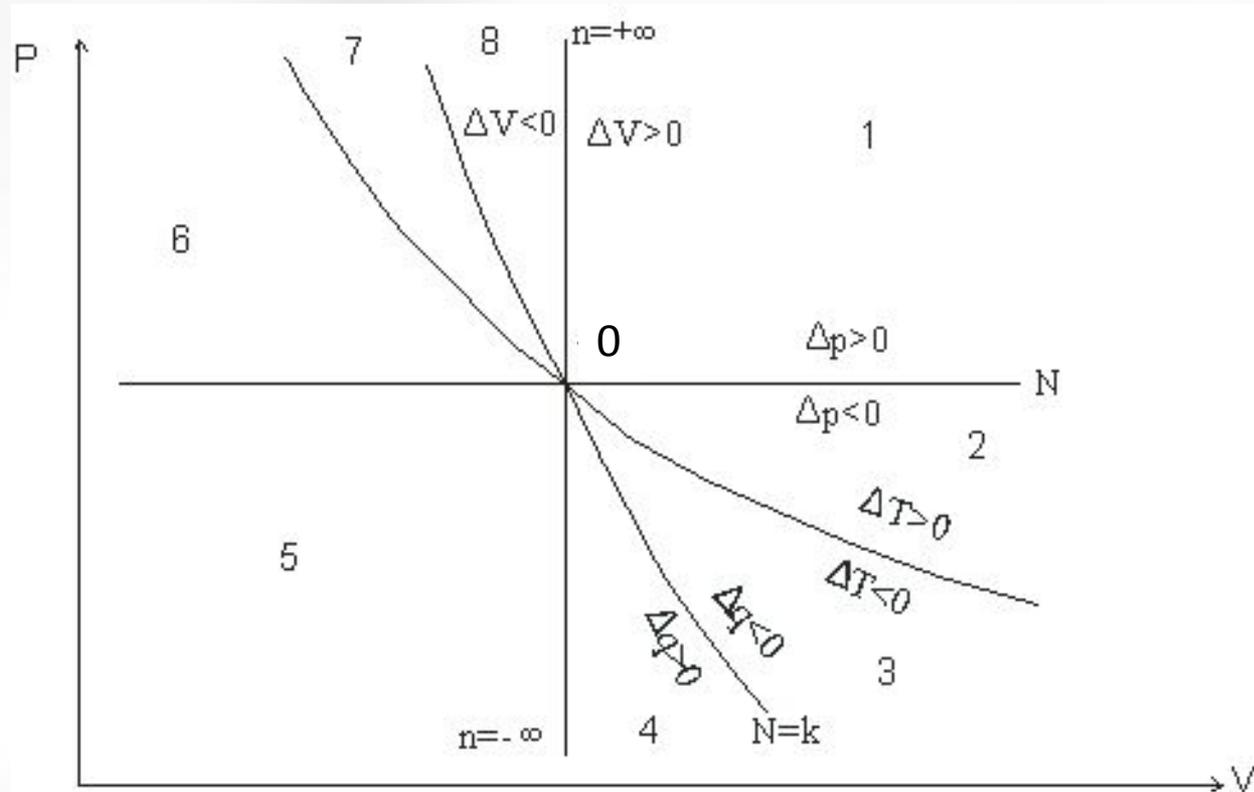
Первое начало термодинамики с учетом определения энтропии:

$$\delta q = du + pdv,$$

$$Tds = du + pdv.$$

Процесс	Показатель политропы $n$	Теплоемкость
Изохорный $dv = 0$	$\infty$	$C_v$
Изобарный $dp = 0$	0	$C_p$
Изотермический $dT = 0$	1	$\infty$
Адиабатный $dq = 0$	$k$	0

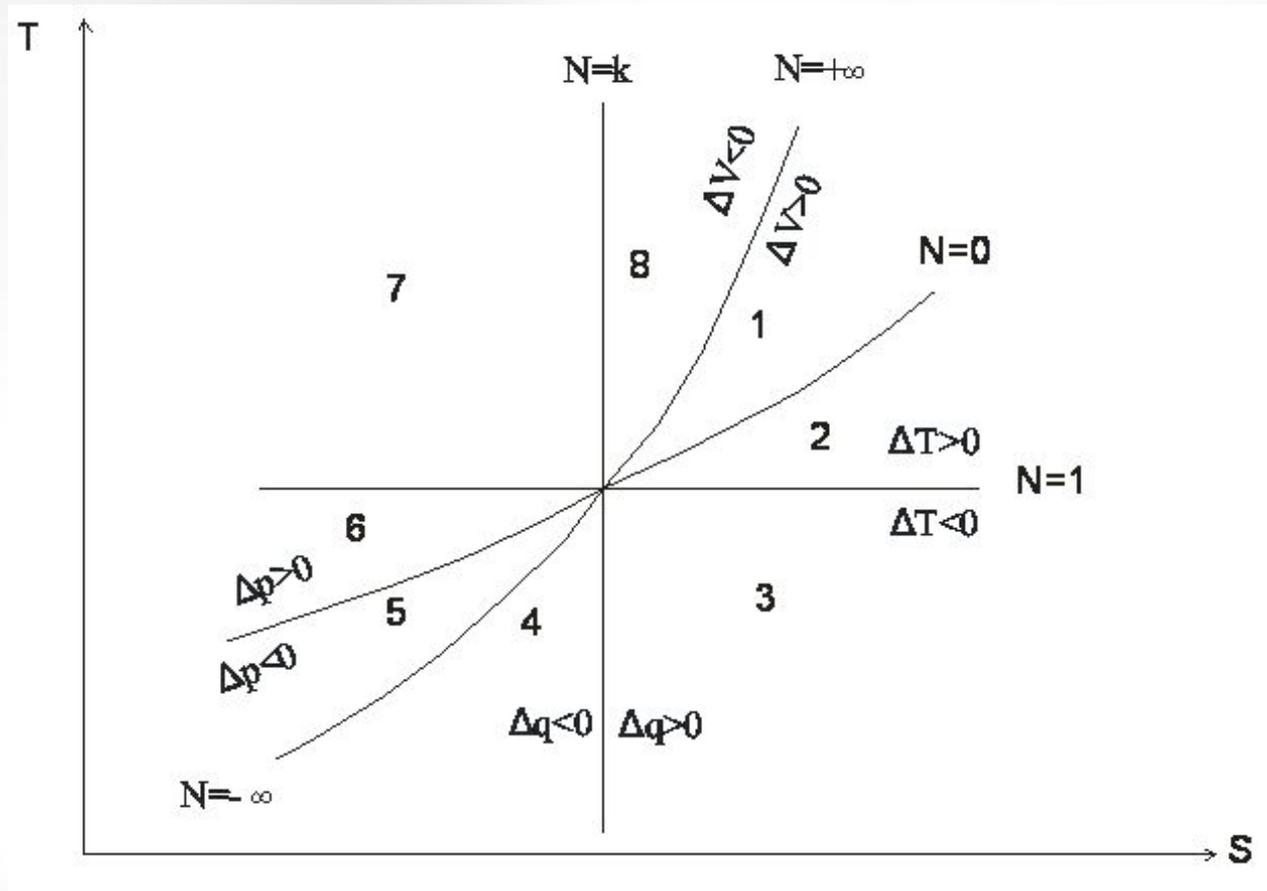
На обобщенных диаграммах изображаются все изопроцессы и выделяются области, в пределах которых знаки слагаемых I закона одинаковы.



Рабочая диаграмма

Диаграмма позволяет проанализировать как распределяется теплота между внутренней энергией и работой, что будет с температурой системы и т.д.

1. Любой процесс, лежащий выше изобары проведённой через точку 1 сопровождается ростом давления.
2. Любой процесс, лежащий выше изотермы сопровождается ростом температуры, внутренней энергии и энтальпии.
3. Любой процесс, лежащий правее адиабаты сопровождается ростом энтропии и подводом теплоты.
4. Любой процесс, лежащий правее изохоры идёт с ростом объёма и работа в процессе положительна.



Тепловая диаграмма

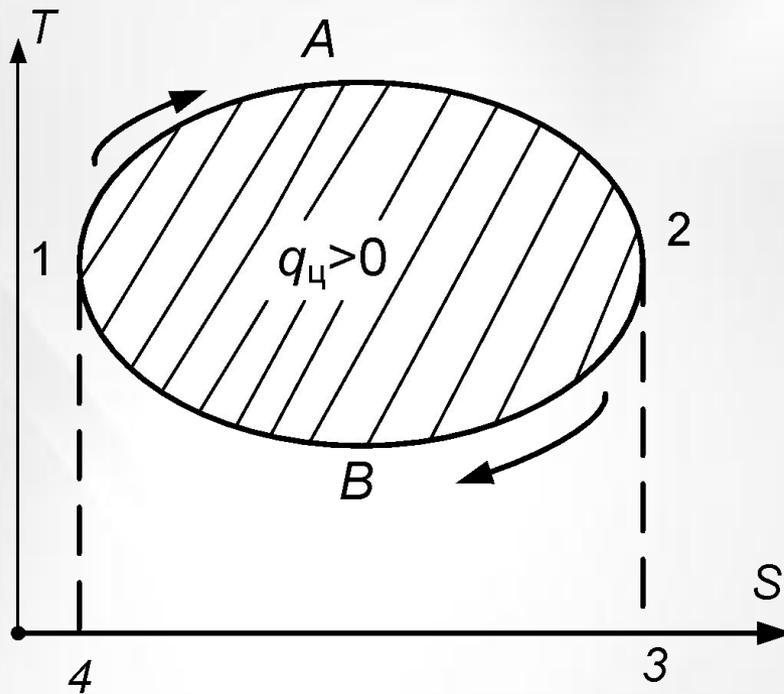
Проинтегрируем уравнение  $dq = TdS$  и получим

$$q = \int_1^2 T ds$$

которое показывает, в координатах  $T$ - $S$  площадь, лежащая под линией процесса - количество теплоты, участвующее в процессе. Поэтому диаграмма  $T$ - $S$  называется *тепловой диаграммой*.

$$A = \int T ds$$

## Цикл Карно в T-s координатах



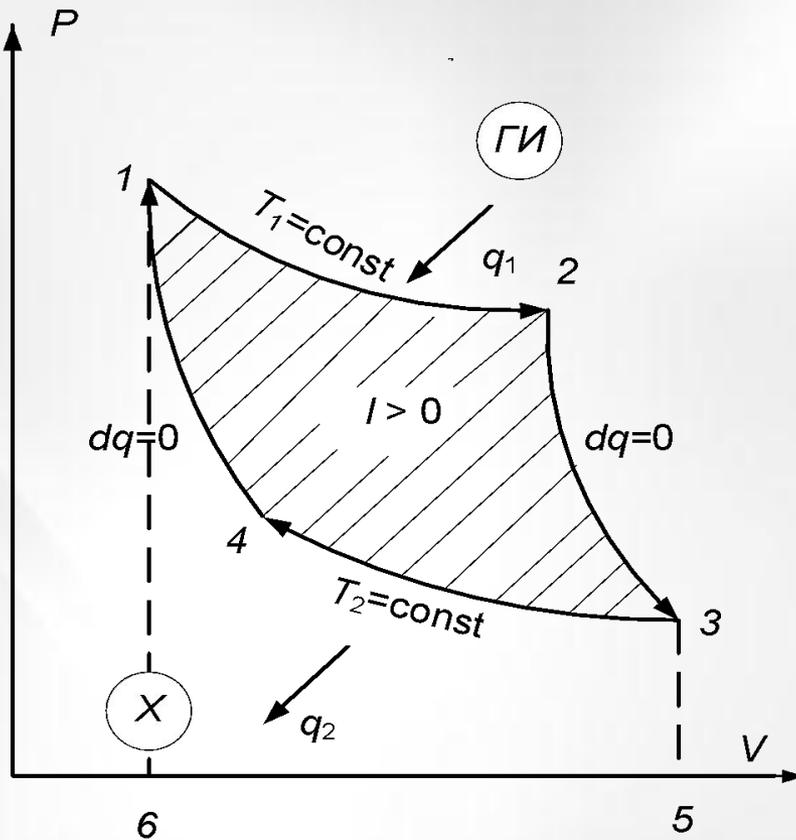
Состояния **1** и **2** соответствуют **наименьшему** ( $S_{\min}$ ) и **наибольшему** ( $S_{\max}$ ) значениям энтропии рабочего тела.

- в процессе 1A2 теплота **подводится**:  $Q > 0$ .

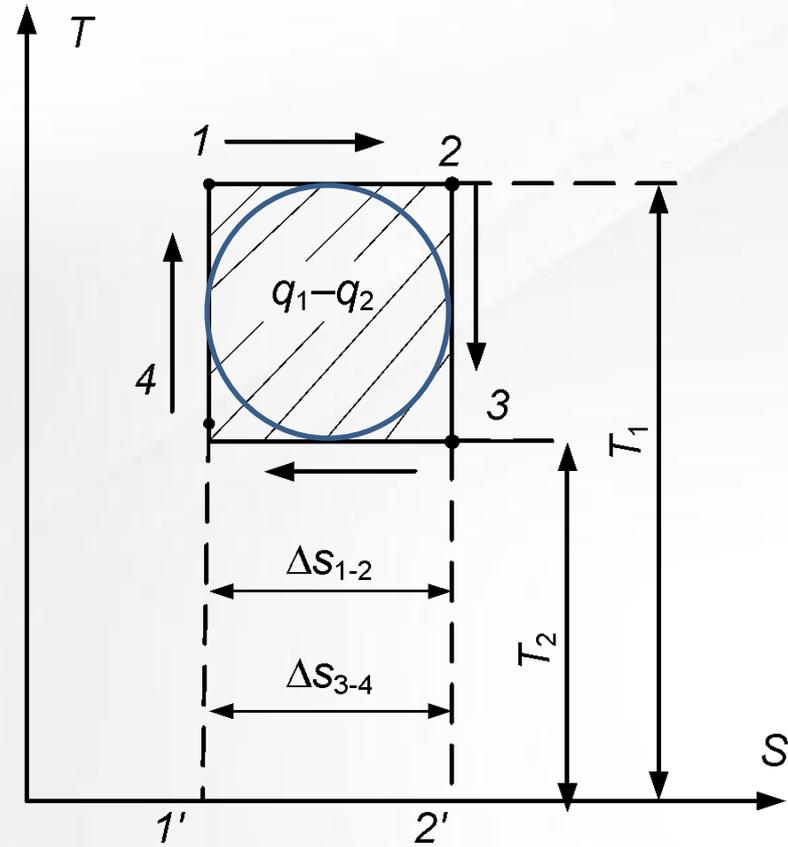
- в процессе 2B1 — **отводится**:  $Q < 0$ .

- работе за цикл A соответствует площади цикла  $A > 0$

- термическому КПД цикла соответствует отношение площади цикла к площади под кривой 1A2



Цикл Карно в  $p$ - $v$  диаграмме



Цикл Карно в  $s$ - $T$  диаграмме

**Теорема Карно.** Ни один тепловой двигатель, работающий по замкнутому циклу при двух заданных температурах, не может быть эффективнее идеального двигателя Карно.

Следовательно: 1) цикл Карно является эталонным циклом, по сравнению с которым можно оценить эффективность любого цикла, осуществляемого в том же интервале температур;

2) цикл любого теплового двигателя следует организовать так, чтобы он в диаграмме  $T-s$  имел максимальное заполнение.

Тепло

Техника

Водяной пар

Водяной пар производится в парогенераторах при постоянном давлении.

**Паром** будем называть реальный газ, близкий к состоянию насыщения. **Состояние насыщения** характеризуется наличием парообразной и жидкой фаз.

В процессе парообразования пар проходит через ряд характерных процессов и состояний.

**Кипение** - процесс перехода жидкости в пар. При кипении парообразование происходит в объеме жидкости в отличие от испарения, которое происходит со свободной поверхности жидкости.

Обратный процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией**. Эти процессы обычно происходят при постоянных давлении и температуре, равных давлению насыщения  $p_s$  и температуре насыщения  $t_s$ .

**Насыщенный пар** - пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, из которой он образуется, и имеющий максимальную плотность при данных условиях.

**Сухой насыщенный пар** получается при испарении всей жидкости. Термодинамическое состояние сухого насыщенного пара однозначно определяется одним из параметров состояния: либо  $t_s$ , либо  $p_s$ .

Влажный насыщенный пар образуется при неполном испарении жидкости. Влажный пар - смесь кипящей жидкости и сухого насыщенного пара.

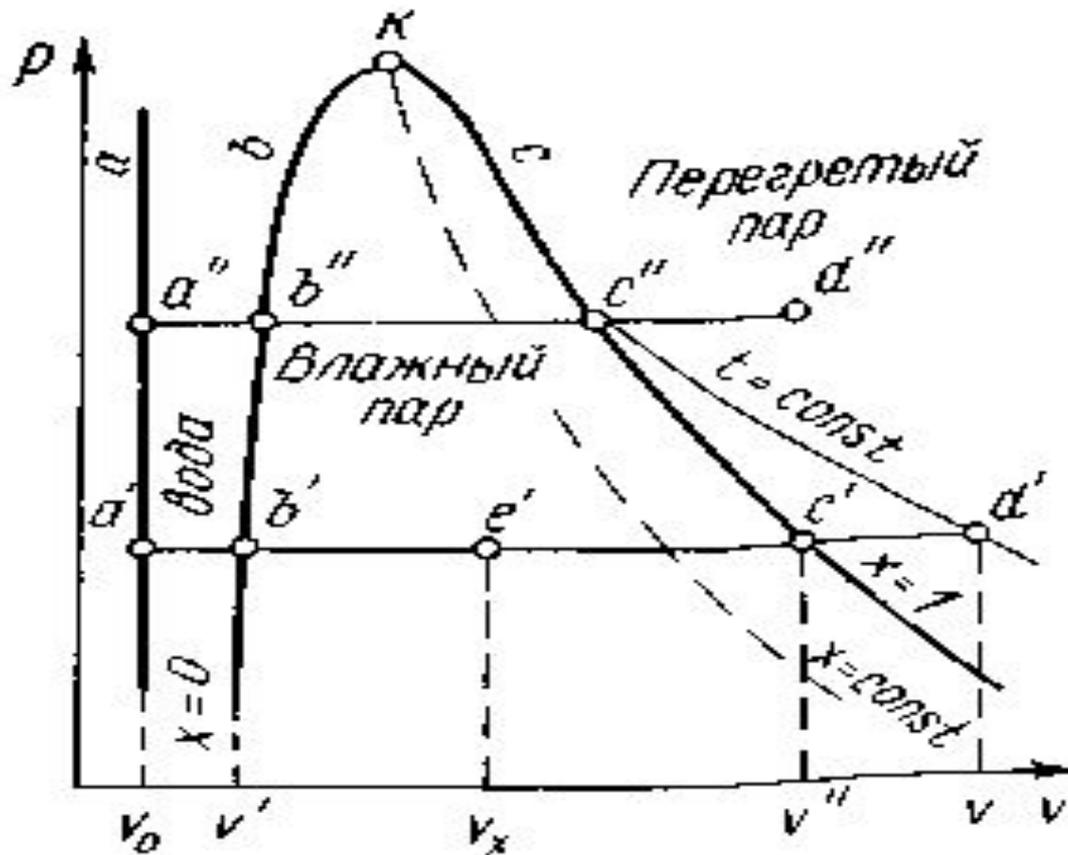
Массовая доля сухого пара во влажном паре называется степенью сухости пара и обозначается буквой  $x$ .

Для сухого насыщенного пара  $x=1$ , для жидкости  $x = 0$ .

Состояние влажного пара определяется двумя параметрами: например, степенью сухости, давлением или температурой насыщения.

**Перегретый пар** - пар, температура которого выше температуры насыщения при данном давлении. Термодинамическое состояние перегретого пара определяется тремя параметрами состояния.

Разность между температурой перегретого пара  $t$  и температурой насыщения называют степенью перегрева.



**Линия а** соответствует изменению удельного объема воды  $v_0$  при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от давления. **Линия б** устанавливает зависимость удельного объема воды  $v'$  при температуре кипения. Эта линия разделяющая область воды от области влажного пара и называется **нижней пограничной кривой** или **кривой кипения** (она соединяет точки, соответствующие температуре кипения воды при различных давлениях).

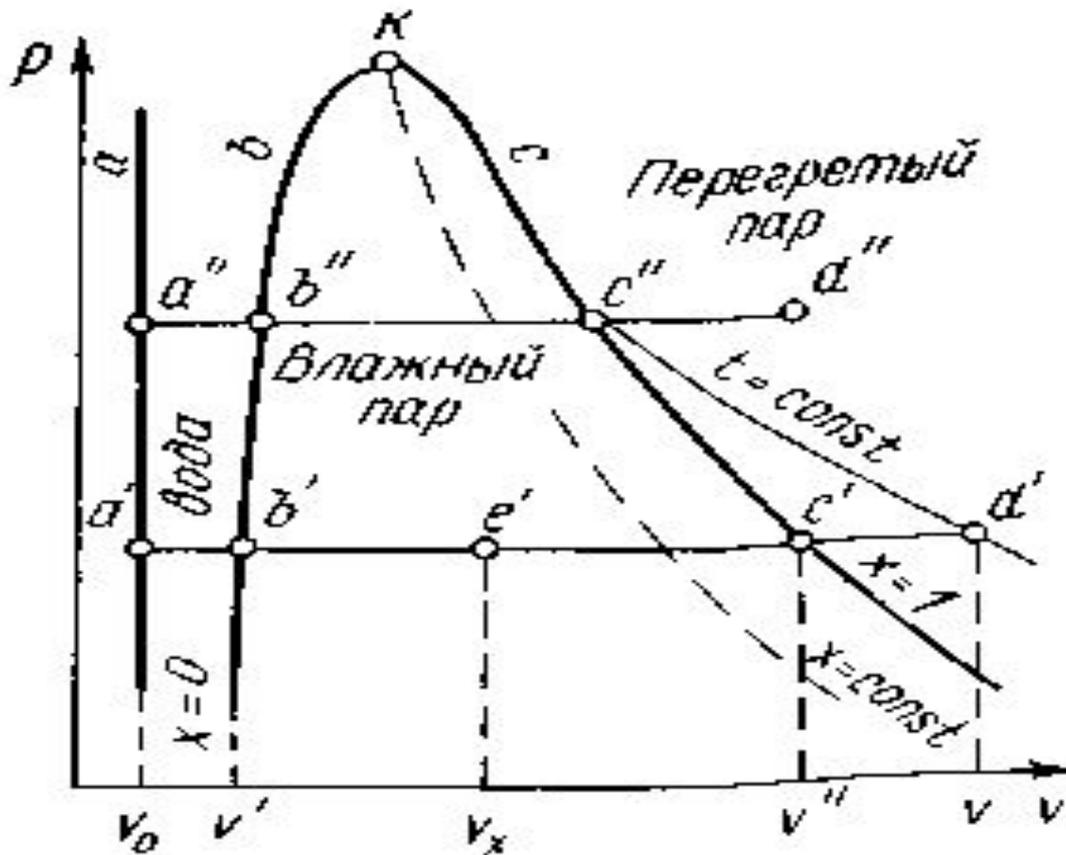


# Тепло

# Техника

## Второе начало термодинамики

**Линия с** соответствует сухому насыщенному пару и называется **верхней пограничной кривой** или **кривой конденсации**, отделяющей область влажного пара от области перегретого пара. Следовательно, область, ограничена пограничными кривыми, — область влажного пара. Удельный объем сухого насыщенного пара обозначается через  $v''$ .



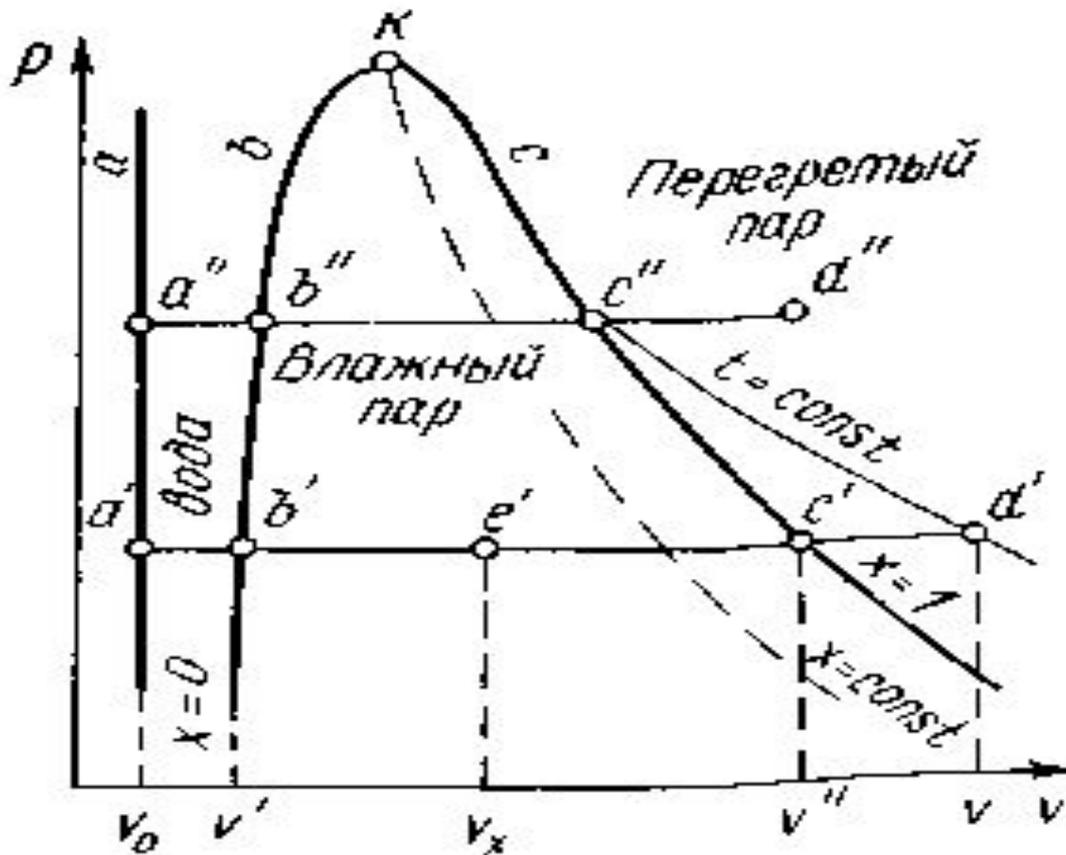
При увеличении давления, чему соответствует уменьшение разности  $v'' - v'$ , пограничные кривые сближаются и при некотором вполне определенном для каждого вещества давлении пограничные кривые сходятся в точке  $K$ , называемой критической.

**Критическое состояние** - предельное состояние жидкости. Выше критической точки вещество может существовать только в виде перегретого пара.

Для воды параметры в критической точке равны:

$$p_{кр} = 221 \text{ бар}, T_{кр} = 647 \text{ К и } v_{кр} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Процесс парообразования 1 кг воды, проходящий при  $p = \text{const}$ , изображается линией  $a'-d'$ . Линия  $a'-b'$  - нагрев воды от  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры кипения  $t_s$ , линия  $b'-c'$  - кипение воды при постоянной температуре  $t_s$  при данном давлении. Процесс  $b'-c'$  - изобарно-изотермический.



# Тепло

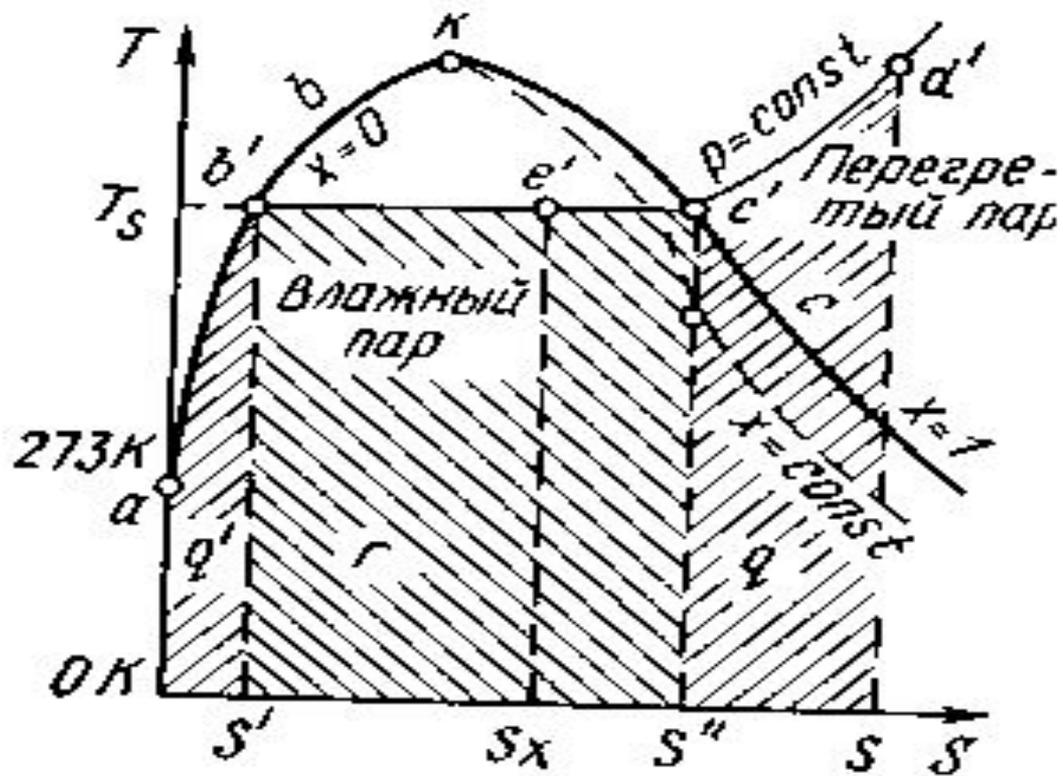
# Техника

## Второе начало термодинамики

Точка  $e'$  соответствует состоянию влажного пара (с удельным объемом  $v_x$ ). Линия  $c'-d'$  - перегрев пара.

Если процесс парообразования будет осуществляться при более высоком  $p$  (линия  $a''-d''$ ) то удельный объем кипящей воды  $v'$  будет увеличиваться, а удельный объем сухого насыщенного пара  $v''$  - уменьшаться.

Линия постоянной сухости пара  $x=const$ . Изотерма  $t = const$  в области влажного пара совпадает с изобарой  $p = const$ .



# Тепло

# Техника

## Второе начало термодинамики

Отдельные точки и линии на диаграмме  $T - S$  соответствуют: *точка a* – энтропии воды при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; *линия b* - изобаре воды при температуре кипения  $T_s$  и практически совпадает с кривой кипения  $x = 0$ ; *точка k* - критическая точка; *точка e'* - влажному пару со степенью сухости  $x$ ; *линия c* - сухому насыщенному пару и совпадает с кривой конденсации  $x=1$ .

# Тепло

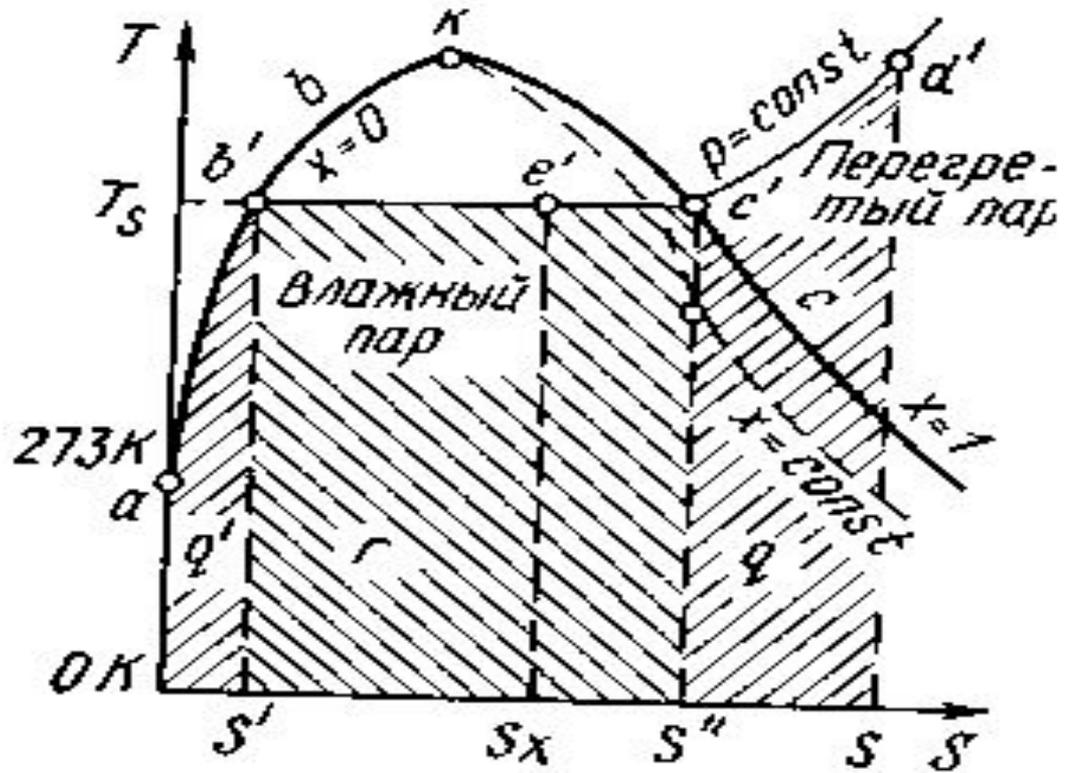
# Техника

## Второе начало термодинамики

Область, лежащая внутри пограничных кривых, - *область влажного пара*. Область, лежащая справа от кривой конденсации, - *область перегретого пара*.

Изобара парообразования в диаграмме  $T - S$  - линия  $ab'c'd'$ . В области влажного пара изобара совпадает с изотермой, а в области перегретого пара они расходятся.

Площадь, лежащая под изобарой  $ab'c'd'$ , изображает количество теплоты, расходуемое на различных стадиях парообразования.



Теплота, расходуемая при  $p = \text{const}$  на нагревание 1 кг воды от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $t_s$ , называется *теплотой жидкости* ( $q'$ ). Если пренебречь сжимаемостью воды, то изобара жидкости совпадает с кривой кипения и теплота жидкости  $q' = \theta_{ab's'a}$ .

Теплоту жидкости можно вычислить по формуле:

$$q'_1 = \int_{0^{\circ}\text{C}}^{t_s} c_p^b dt = i - i_0.$$

Если теплоемкость воды  $c_p^b \approx \text{const}$ , тогда:

$$q' = c_p^b t_s = i'.$$

т. е. теплота жидкости равна энтальпии жидкости.