

**Министерство образования и науки Республики Казахстан**

**Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева**

**Кафедра энергетики**

# **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА**

**Предмет: Техническая термодинамика**

**Выполнил: студент 2-го курса Караманов Руслан**

**Специальность: 5B071700-Теплоэнергетика**

**Проверил: Турмухамбетов А.Ж.**

**2018**

# Содержание

- 1. Фазовые состояния и превращения воды
- 2. Фазовые диаграммы  $p, T$ -,  $p, V$ - и  $T, s$  для воды
- 3. Жидкость на линии фазового перехода
- 4. Сухой насыщенный пар
- 5. Влажный насыщенный пар
- 6. Перегретый пар
- 7. Диаграмма  $i, s$  для воды и водяного пара

# **Фазовые состояния и превращения воды**

## ***Вода в равновесном состоянии***

*(без энергетических взаимодействий с окружающей средой)*

У поверхности льда или жидкости всегда присутствует пар. Соприкасающиеся фазы находятся в т/д равновесии: быстрые молекулы вылетают из жидкой фазы, преодолевая поверхностные силы, а из паровой фазы медленные молекулы переходят в жидкую фазу.

В состоянии равновесия каждой  $T$  соответствует определенное **давление пара** – **полное** (если над жидкостью присутствует только пар) или **парциальное** (если присутствует смесь пара с воздухом или другими газами).

*Пар, находящийся в равновесном состоянии с ж. фазой, из которой он образовался - насыщенный, а соответствующая ему  $T$  -  $T$  насыщения, а давление –  $p$  насыщения.*

# **Фазовые состояния и превращения воды**

## ***Вода в неравновесном состоянии***

*(с энергетическими взаимодействиями с окружающей средой)*

*Процесс некомпенсированного перехода вещества из ЖФ в Г - **испарение**.*

*Процесс некомпенсированного перехода вещества из ТФ в Г - **сублимация (возгонка)**.*

*Процесс перехода вещества из жидкой фазы в паровую непосредственно внутри жидкости - **кипение**.*

*Любой процесс перехода вещества из жидкой фазы в паровую - **парообразование**.*

*Процесс, противоположный парообразованию, т.е. некомпенсированный переход вещества из паровой фазы в жидкую - **конденсация**.*

*Процесс, противоположный сублимации, т.е. переход вещества из паровой фазы непосредственно в твердую - **десублимация**.*

*Жидкая фаза воды при температуре кипения - **насыщенная жидкость**.*

*Пар при температуре кипения (насыщения) - **сухой насыщенный пар**.*

*Двухфазная смесь "ж+n" в состоянии насыщения - **влажный насыщенный пар**.*

# Фазовые диаграммы $p,T$ -, $p,V$ - и $T,s$ для $H_2O$

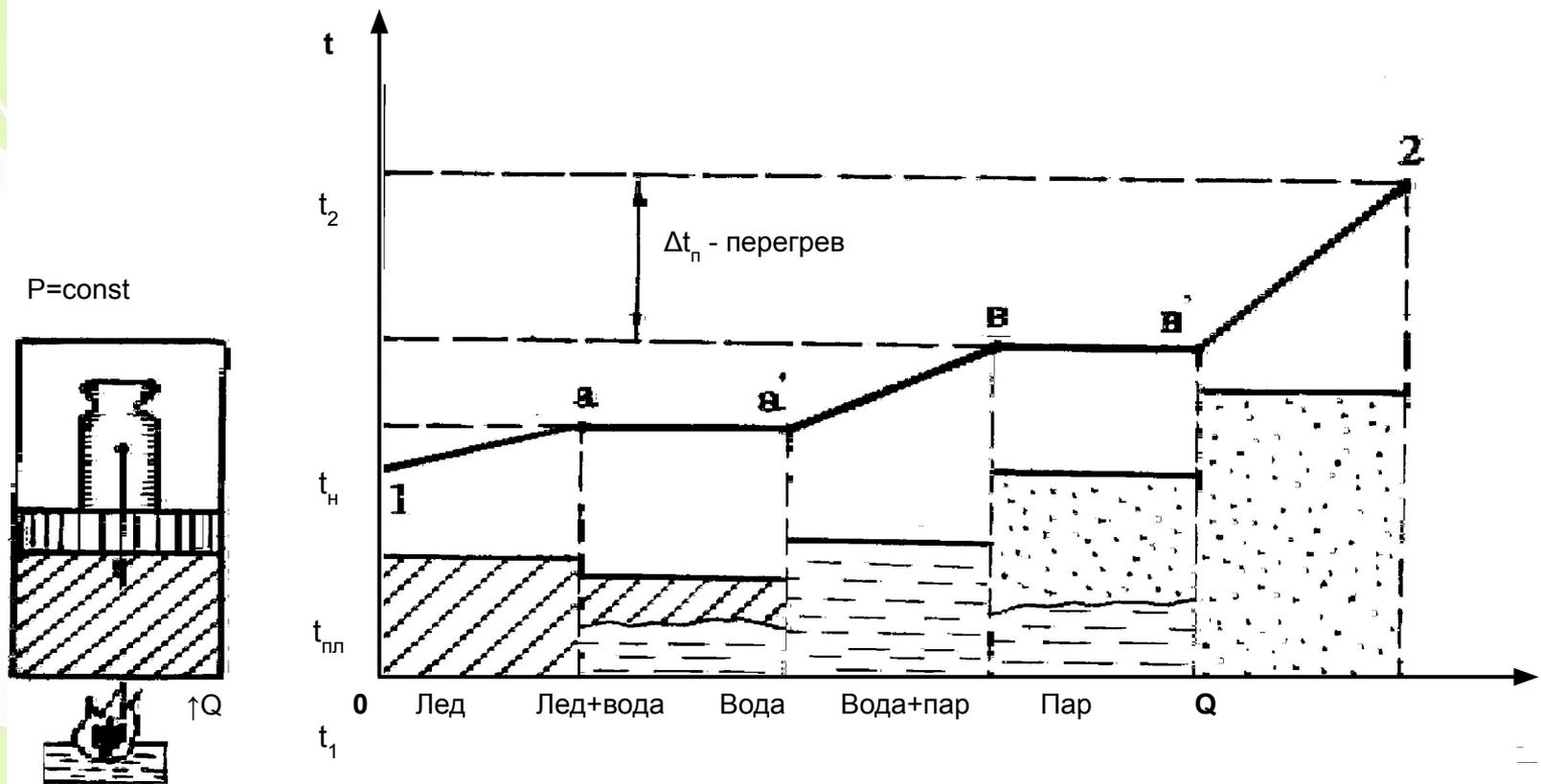


Рис. 1. Изменение температуры при изобарном подводе теплоты к  $H_2O$

# Фазовые диаграммы $p, T$ -, $p, V$ - и $T, S$ для $H_2O$

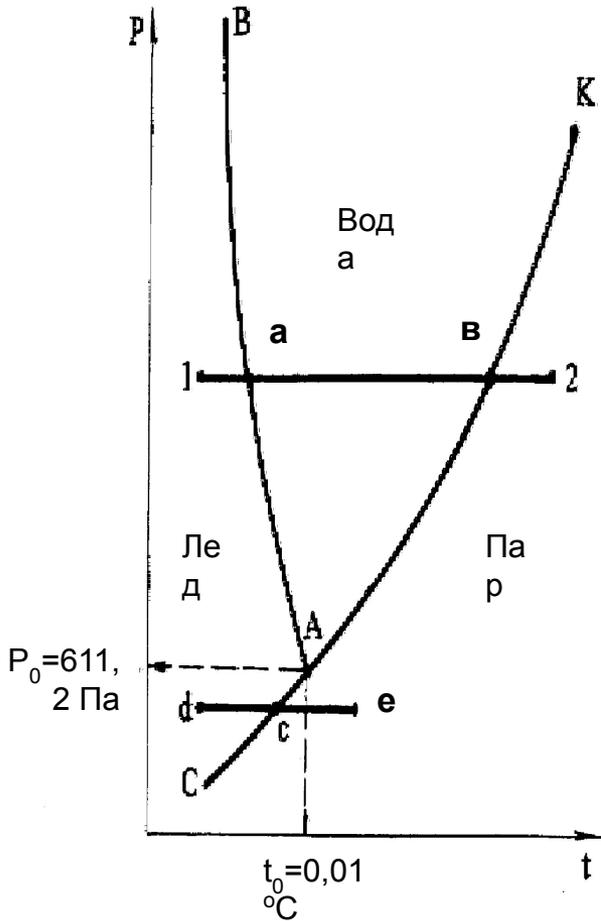


Рис. 2. Фазовая диаграмма  $P, t$  для воды

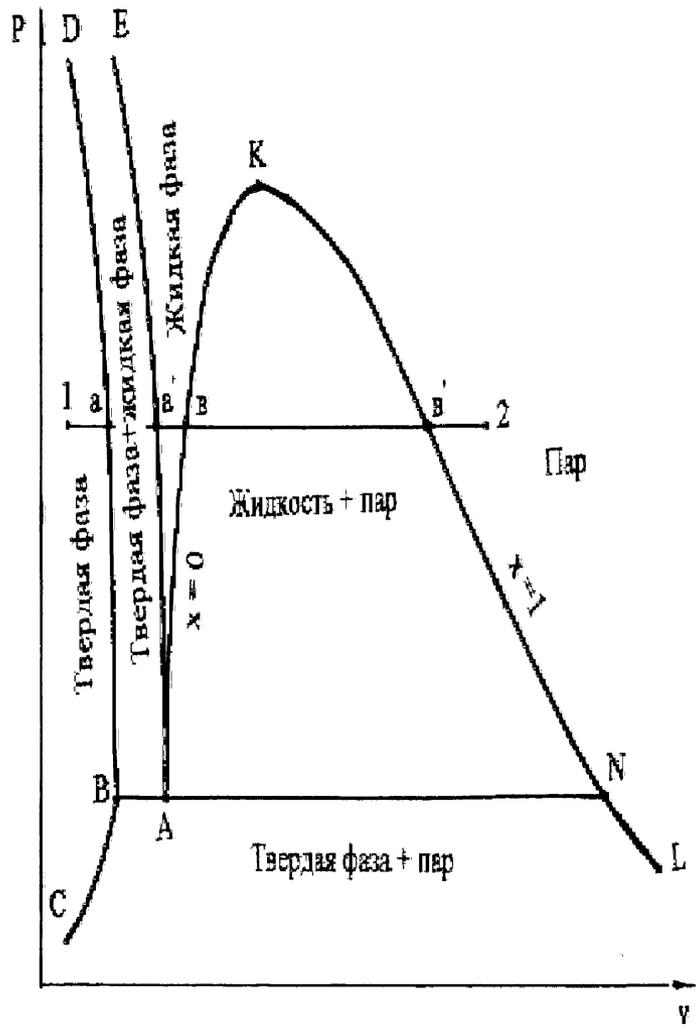


Рис. 3 Фазовая диаграмма  $P, v$  для нормального вещества

# Фазовые диаграммы $p,T$ -, $p,V$ - и $T,s$ для $H_2O$

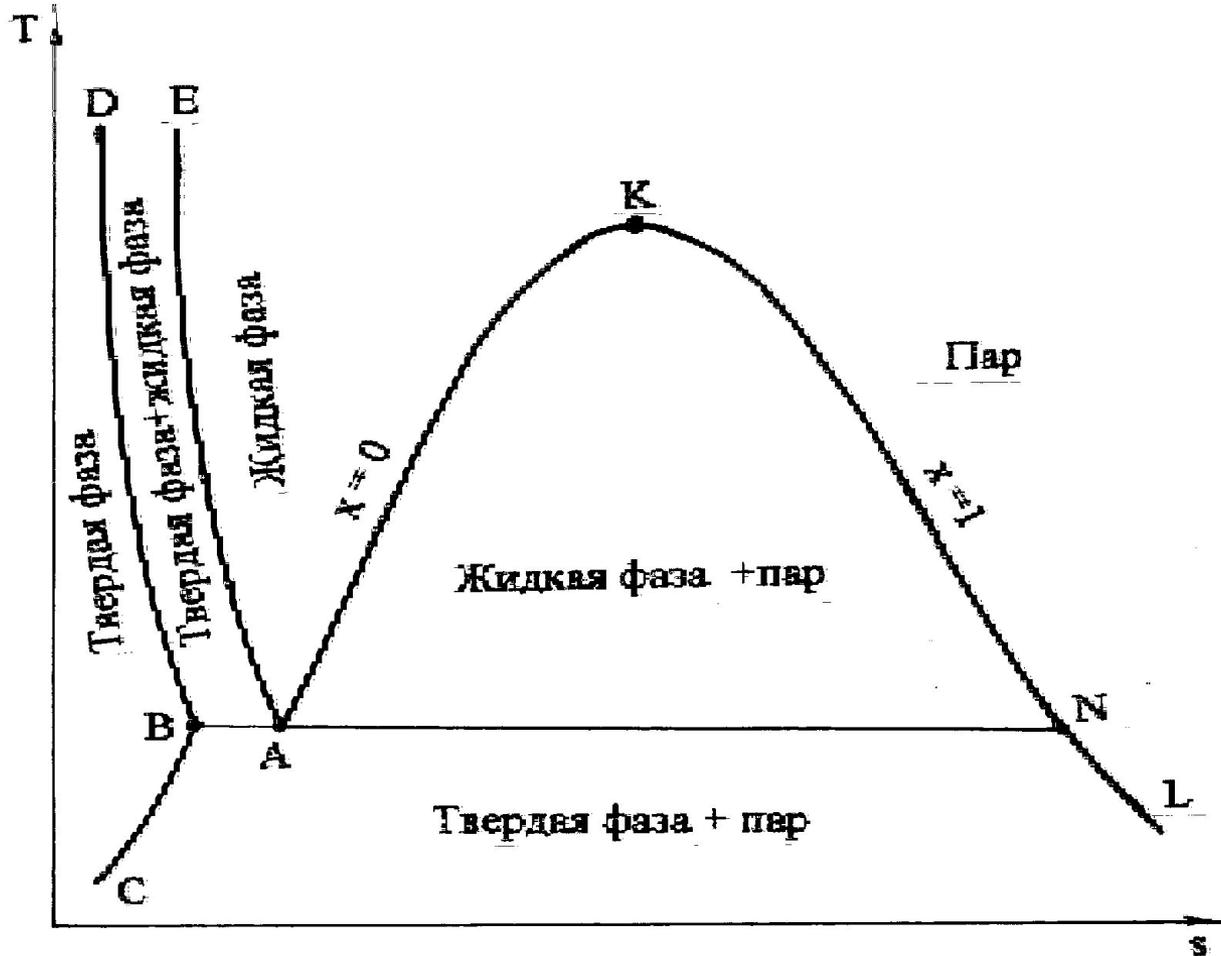


Рис. 4 Фазовая диаграмма  $T,s$  для нормального вещества



# Жидкость на линии фазового перехода

Энтропия жидкости на линии насыщения  $x = 0$  определяется исходя из ее равенства нулю в тройной точке воды ( $s_0' = 0$ ). С изменением давления энтропия Ж при  $T$  тройной точки (или  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $s_0$  изменяется незначительно. Поскольку энтропия, является функцией двух независимых параметров состояния, а при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  для всех давлений жидкости внутренняя энергия  $Ж = 0$ , то и энтропия жидкости при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  для всех давлений будет постоянной и равной энтропии жидкости в тройной точке воды, т.е.  $s_0 = 0$ .

Зная значение энтропии  $s_0$  при  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  и заданном давлении, энтропию жидкости на линии насыщения при  $T_H$  можно определить как

$$s' = s_0 + \int_{T_0}^{T_H} \frac{c_p dT}{T} \approx c_p \ln \frac{T_H}{273,16}$$

где  $s_0 = s_0' = 0$  – при давлениях, используемых в технике;  $c_p \cong 4,187 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  – при умеренных давлениях.

Определение энтальпии, энтропии и внутренней энергии жидкости при температурах меньших, чем температура насыщения при заданном давлении, ведется аналогичным образом.

# Сухой насыщенный пар

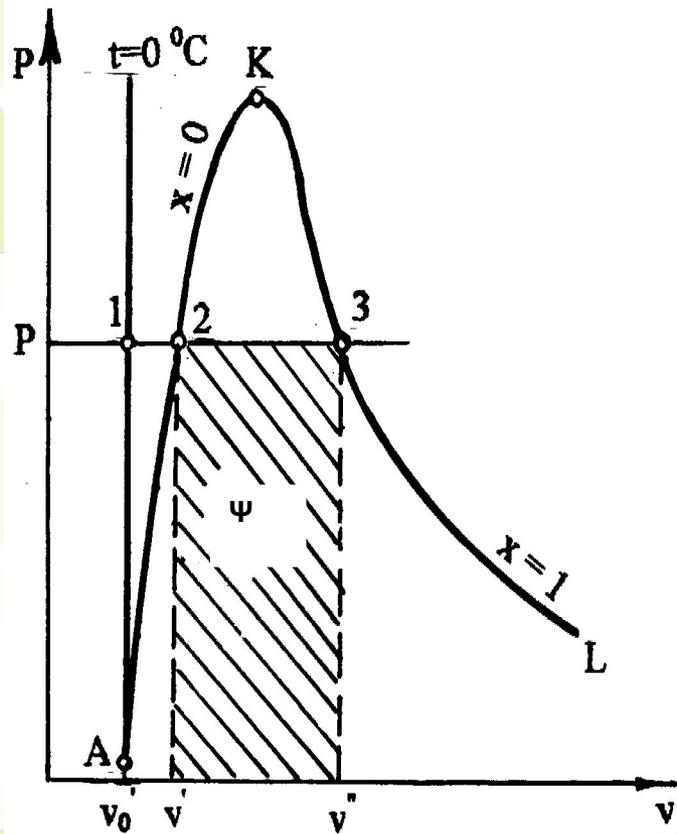


Рис. 6.1. Фазовый переход жидкости в пар в  $P, v$  - диаграмме для  $\text{H}_2\text{O}$

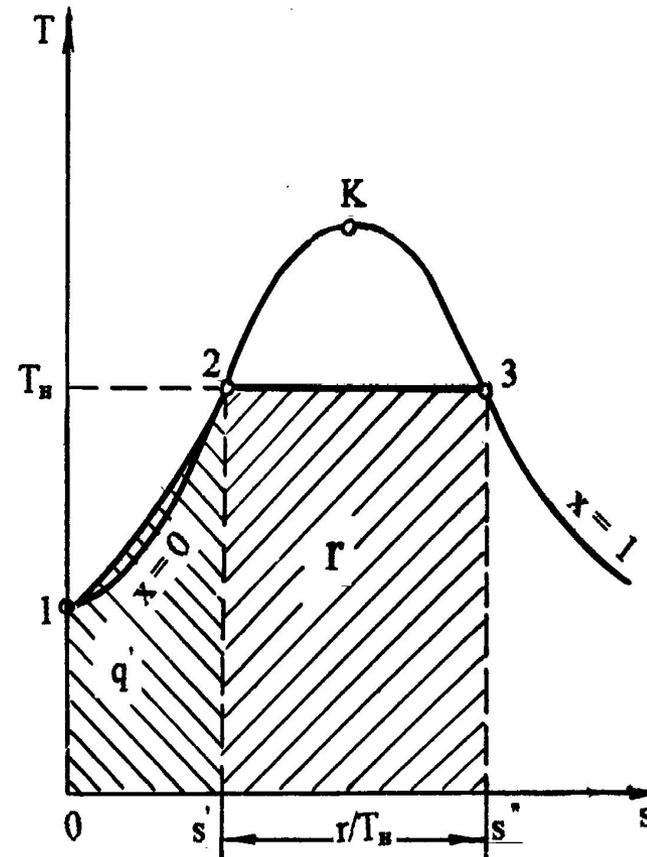


Рис. 6.2. Адиабатный процесс пара в  $P, v$  - диаграмме

# Влажный насыщенный пар

располагается между пограничными кривыми  $x = 0$  и  $x = 1$ . (e) на изобаре  $P$  в области влажного насыщенного пара (6.15, 6.16). В области влажного насыщенного пара пар-ры состояния не м.б. определены только по  $p$  и  $T$ , поскольку  $p$  однозначно определяет  $T$  насыщения и изобара влажного  $\Pi$  одновременно является его изотермой, представляющей линию в  $P, v$ - и  $T, s$ - диаграммах. В качестве вспомогательного условного пар-ра для влажного  $\Pi$  применяется степень сухости  $x$ . Зная  $x$  и пар-ры состояний насыщения  $V$  на линии  $x=0$  и  $\Pi$  на линии  $x=1$ , можно рассчитать все остальные параметры состояния влажного  $\Pi$ . Используя пар-ры влажного насыщенного  $\Pi$ , можно рассчитать его степень сухости:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} = \frac{1 - e}{1 - 2}$$

Теплота, необходимая для получения влажного  $\Pi$  из  $V$  с  $t=0$  °C при изобарном ее нагревании, называется полной теплотой влажного  $\Pi$   $\lambda_x = q' + xr = h_x - Pv_0'$ .

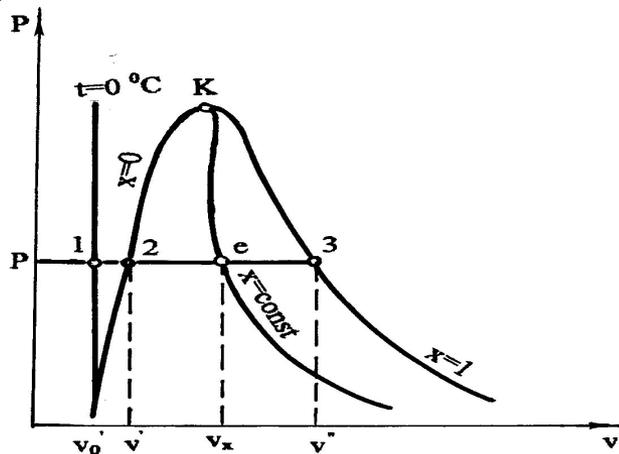


Рис. 6.15. К определению параметров влажного насыщенного пара в  $P, v$ - диаграмме

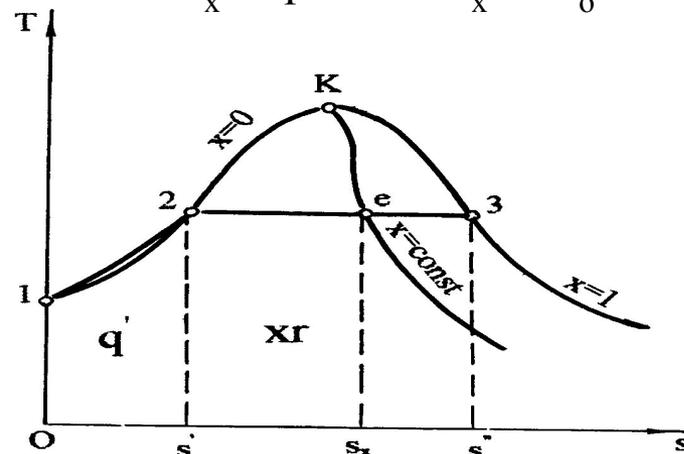


Рис. 6.16. К определению параметров влажного насыщенного пара в  $T, s$ - диаграмме

# Перегретый пар

Изобарный подвод теплоты к сухому насыщенному пару приводит к повышению его  $T$  по отношению к  $T$  насыщения при данном  $p$ . Параметры состояния перегретого пара обозначаются соответствующими буквами без индексов ( $t$ ,  $h$ ,  $s$ ,  $u$  и т.д.)

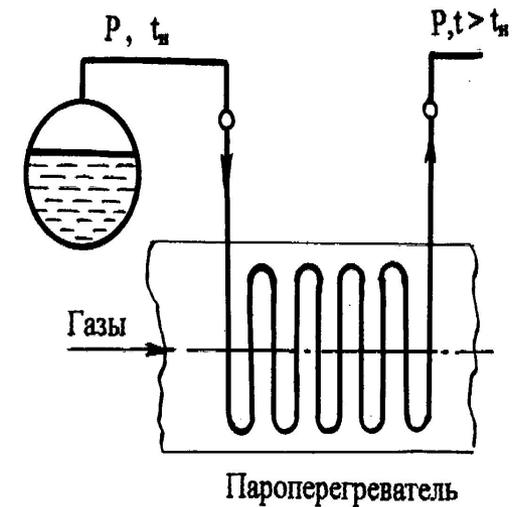


Рис. 6.17. Схема пароперегревателя

Теплота, необходимая для перевода 1 кг сухого насыщ. пара в перегретый пар с температурой  $t$  при изобарном ее нагревании, называется *теплотой перегрева*

$$q_{\text{п}} = \int_{t_n}^t c_p dt = h - h'' = u - u'' + P(v - v'')$$

где  $c_p$  — масс. изобарная тепло-ть перегретого пара

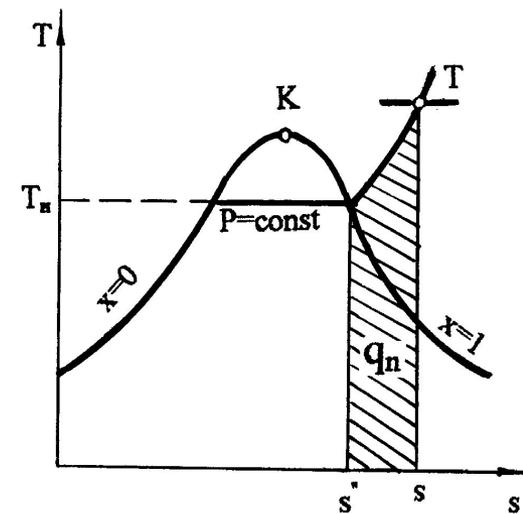


Рис. 6.18. К определению параметров перегретого пара

# Диаграмма $i(h),s$ для воды и водяного пара

В инженерной практике широкое применение находит  $h,s$ - диаграмма для воды и водяного пара. Такое широкое использование  $h,s$ - диаграммы в теплоэнергетических расчетах обусловлено тем, что для основных процессов теплоэнергетических установок (изобарного,  $P=\text{const}$ , и адиабатного,  $s=\text{const}$ ) разности энтальпий представляют их главные энергетические характеристики: количество теплоты или техническую работу, которые в  $h,s$ - диаграмме могут быть элементарно представлены отрезками вертикальных прямых линий. В  $T,s$ - диаграмме эти величины представляются сложными площадями.

Диаграмма  $h,s$  строится по данным таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара. На рис. 6.22 приведен общий вид такой диаграммы для воды и водяного пара.

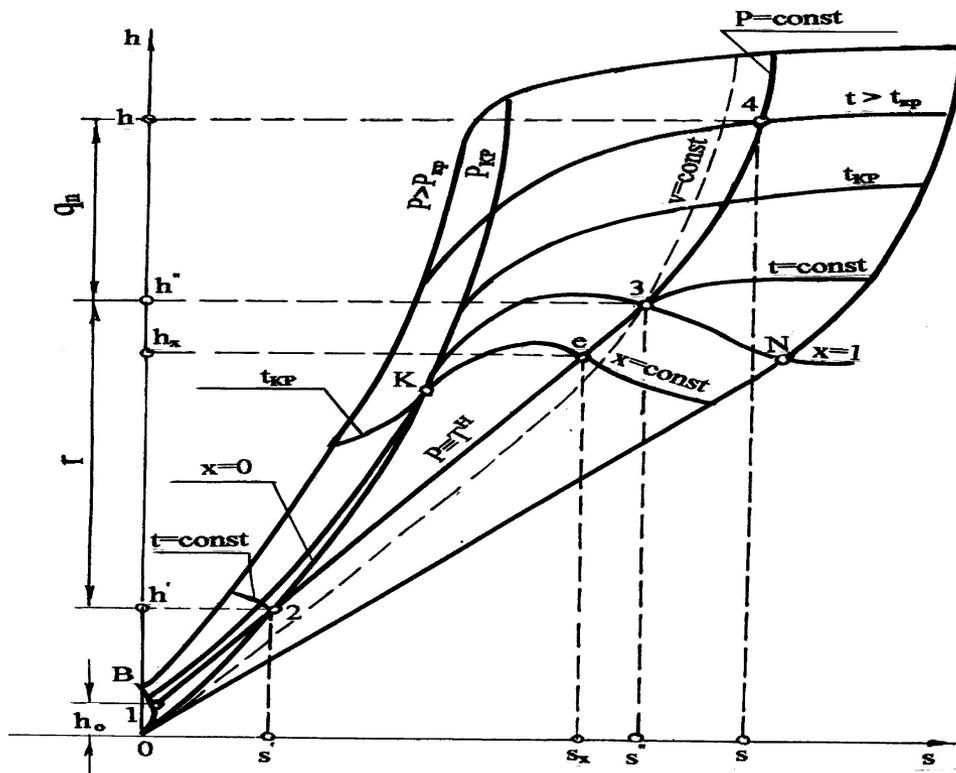


Рис. 6.22. Диаграмма  $h, s$  для жидкости и пара

За начало отсчета энтропии в  $h,s$ - диаграмме, как и в  $T,s$ - диаграмме, приняты параметры тройной точки жидкой фазы воды. В этой точке  $s_0'=0$  и  $u_0'=0$ , а энтальпия  $h_0' = 0,000614$  кДж/кг будет больше нуля, но численное ее значение очень мало. Следовательно, начало линии  $x=0$ , соответствующее тройной точке воды, расположено очень близко к началу координат. При повышении давления и температуры энтальпия  $h'$  и энтропия  $s'$  жидкости на линии насыщения растут до критической точки и пограничная линия  $x=0$  представляется вогнутой кривой ОК.

Пограничная кривая сухого насыщенного пара  $x=1$  имеет вид кривой KN. Максимальное значение энтальпии (ординаты) этой кривой  $h''_{\text{max}} = 2801,9$  кДж/кг достигается при давлении около 30 бар и энтропии 6,18 кДж/(кг·К).

# Контрольные вопросы

- 1. В каких фазовых состояниях может находиться вода?
- 2. Что такое испарение, сублимация, десублимация?
- 3. Что такое конденсация, парообразование, кипение?
- 4. Дайте определение сухого насыщенного пара, влажного насыщенного пара и перегретого пара.
- 5. Какие диаграммы для воды и водяного пара чаще всего используются в инженерных расчетах?

# Список литературы:

- 1. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник-М.: Энергоатомиздат, 1984, 80с.
- 2. Лобасова М.С., Финников К.А., Миловидова Т.А., Дектерев А.А., Серебренников Д.С., Минаков А.В., Кузоватов И.А., Васильев В.В. Тепломассообмен (Электронный курс). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009