



Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
Высшая школа энергетики, нефти и газа
Кафедра теплоэнергетики и теплотехники

Теплотехника

Термодинамические свойства воды и водяного пара

Панкратов Евгений Владимирович

Старший преподаватель кафедры ТиТ ВШЭНиГ САФУ

e.pankratov@narfu.ru

Фазовые состояния и превращения воды

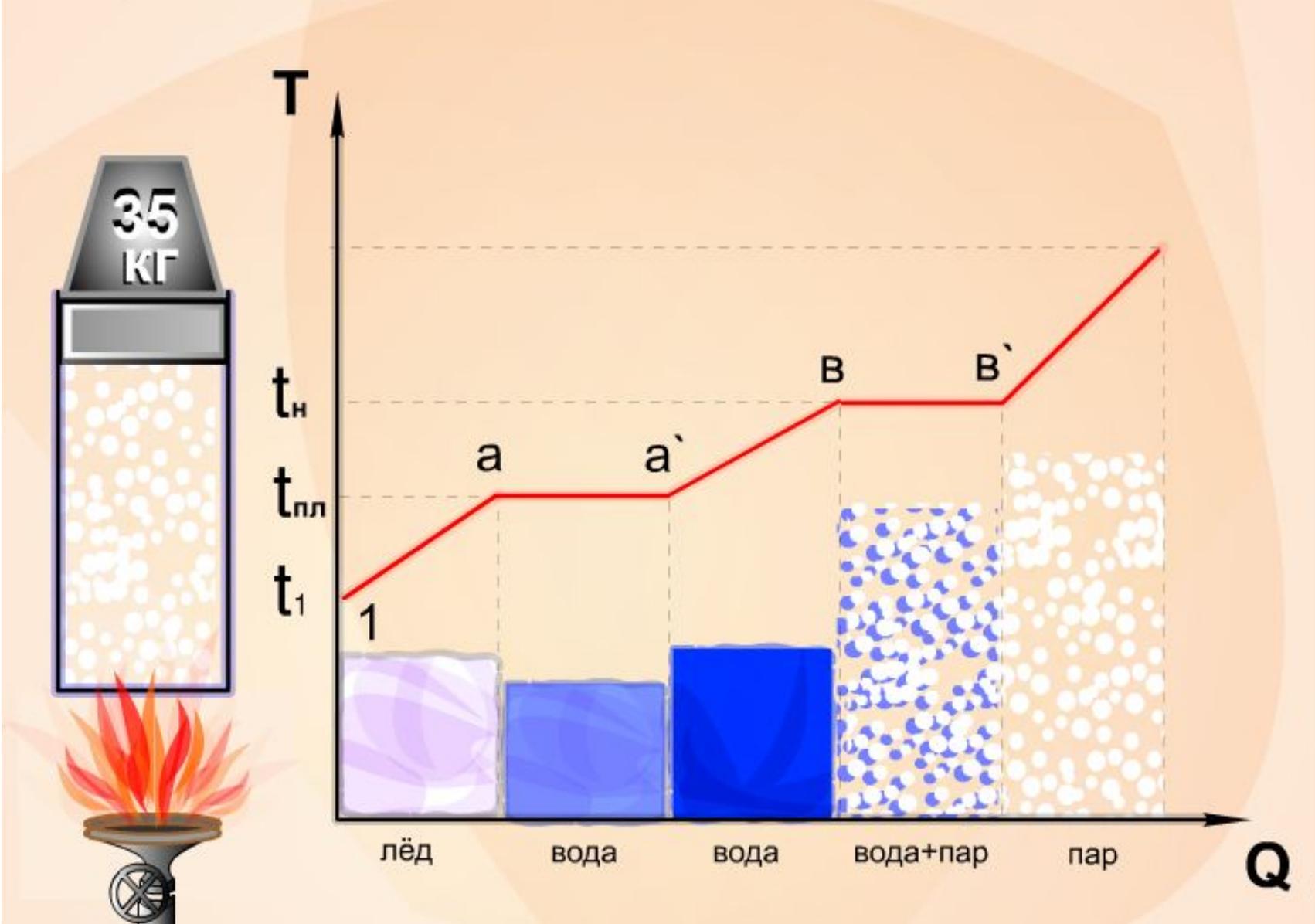
Степень сухости

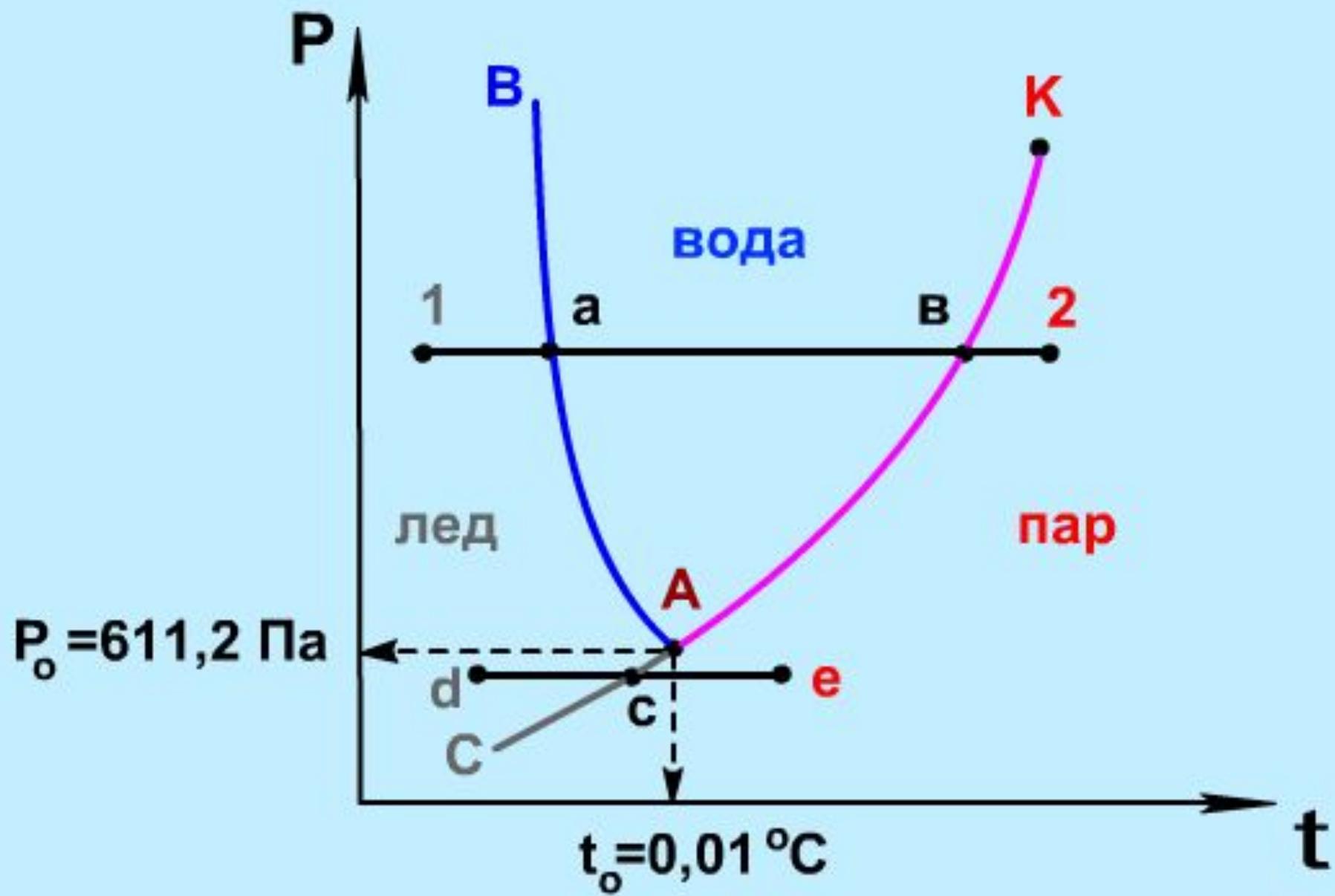
$$X = \frac{m_{\text{с.н.п.}}}{m_{\text{с.н.п.}} + m_{\text{ж.с.н.}}} = \frac{m_{\text{с.н.п.}}}{m_{\text{см.}}} \quad (1)$$

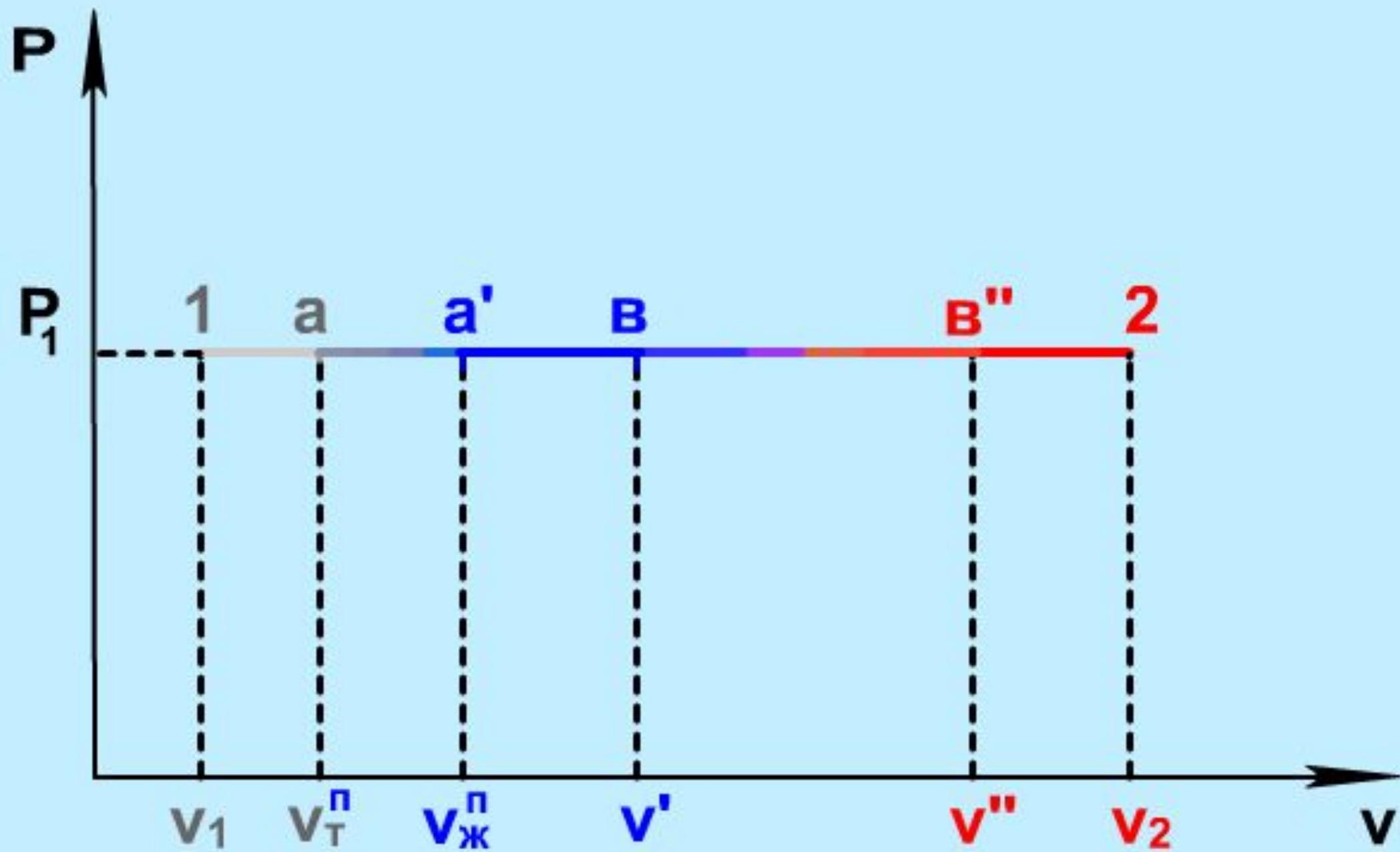
Степень влажности

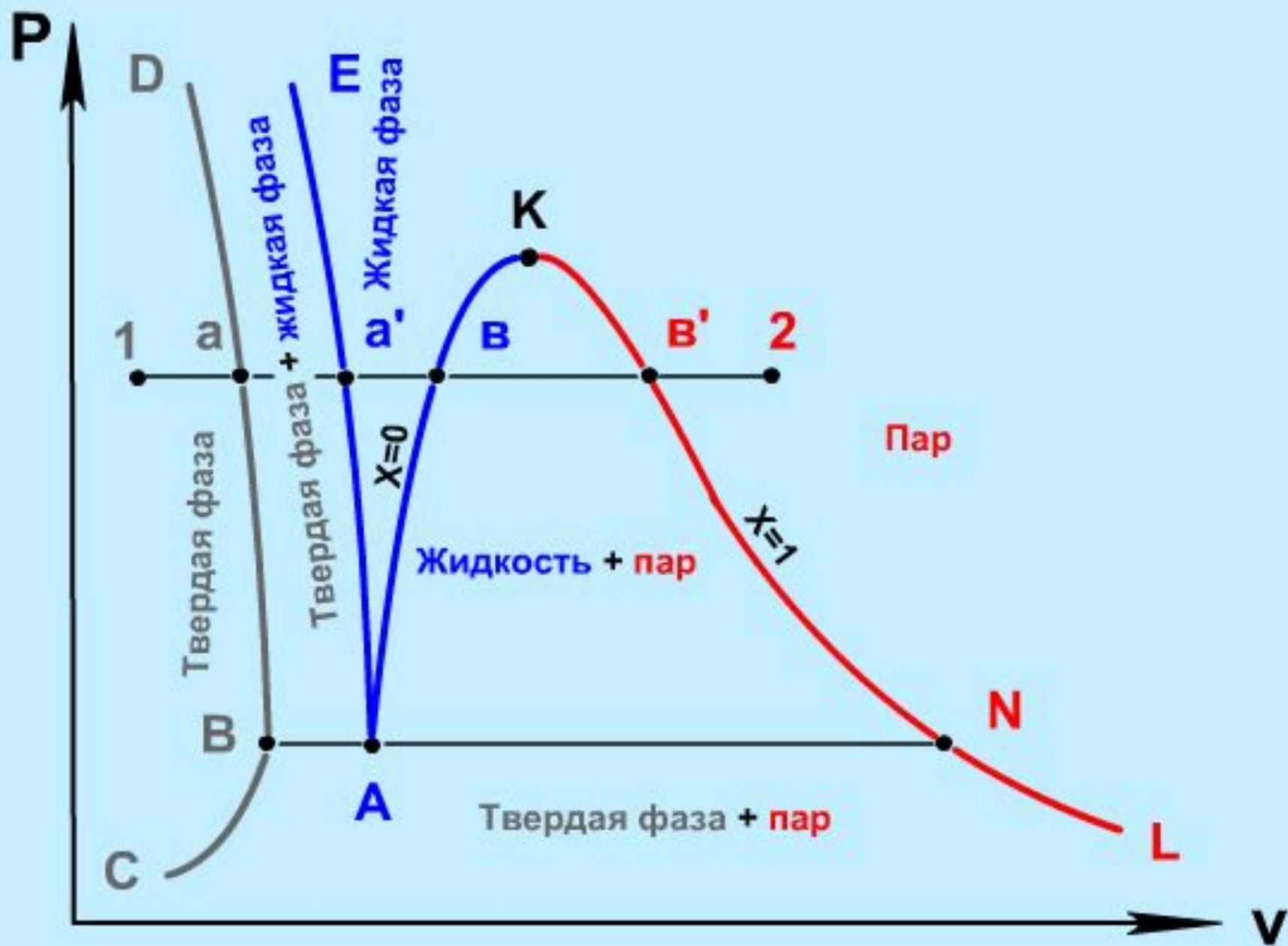
$$1 - X = \frac{m_{\text{ж.с.н.}}}{m_{\text{с.н.п.}} + m_{\text{ж.с.н.}}} = \frac{m_{\text{ж.с.н.}}}{m_{\text{см.}}} \quad (2)$$

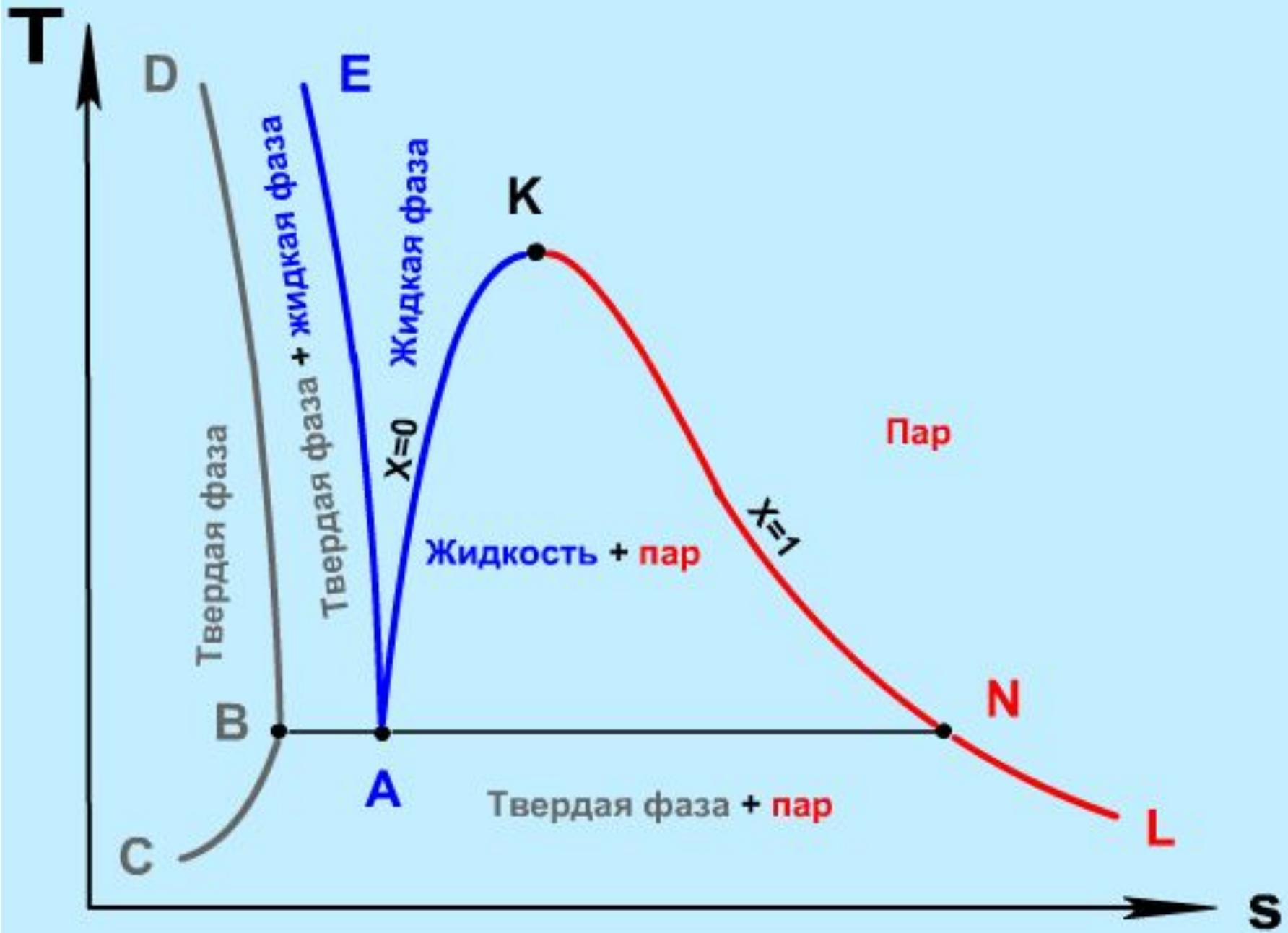
Фазовые диаграммы P,t , P,v и T,s для H_2O

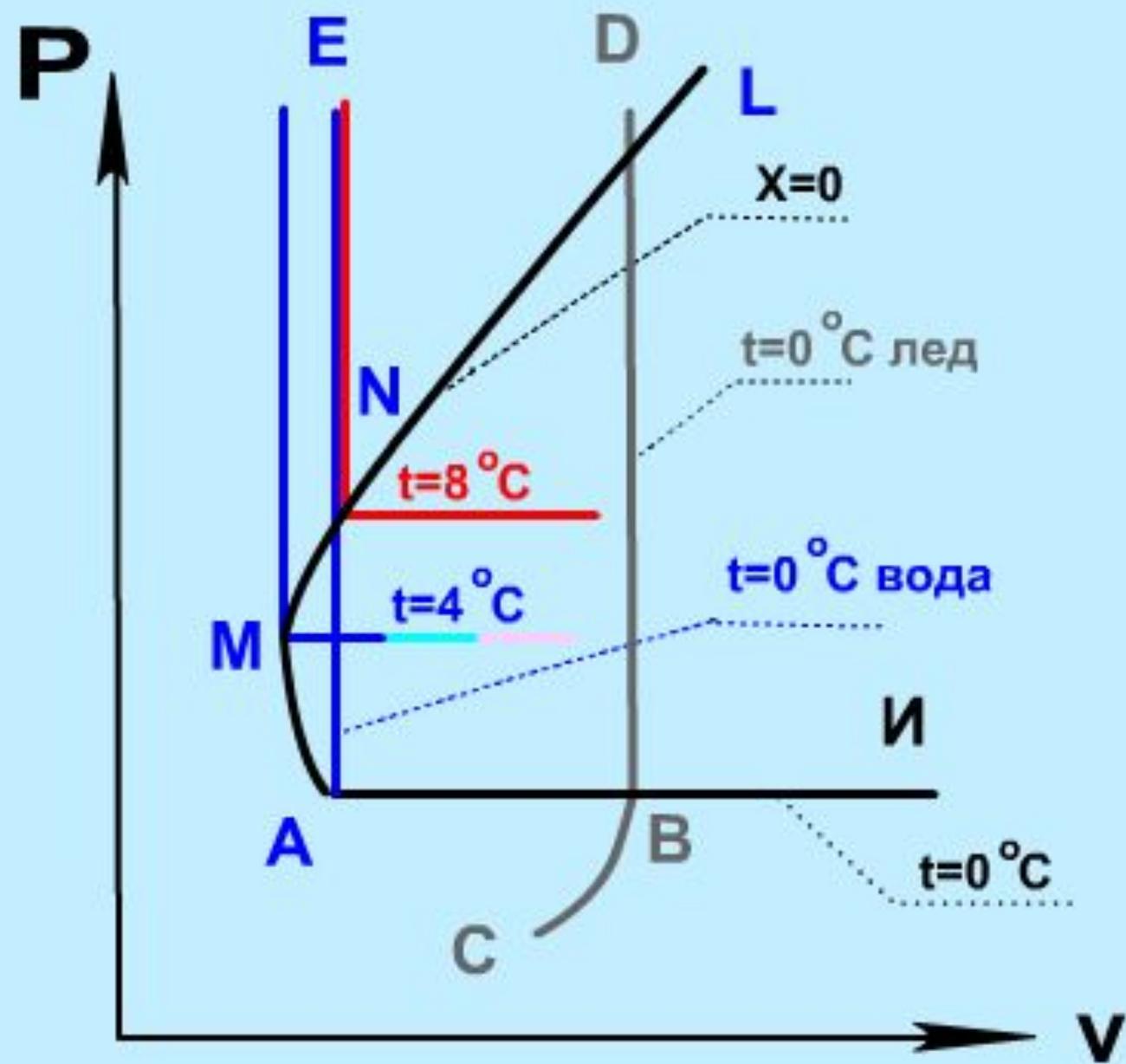




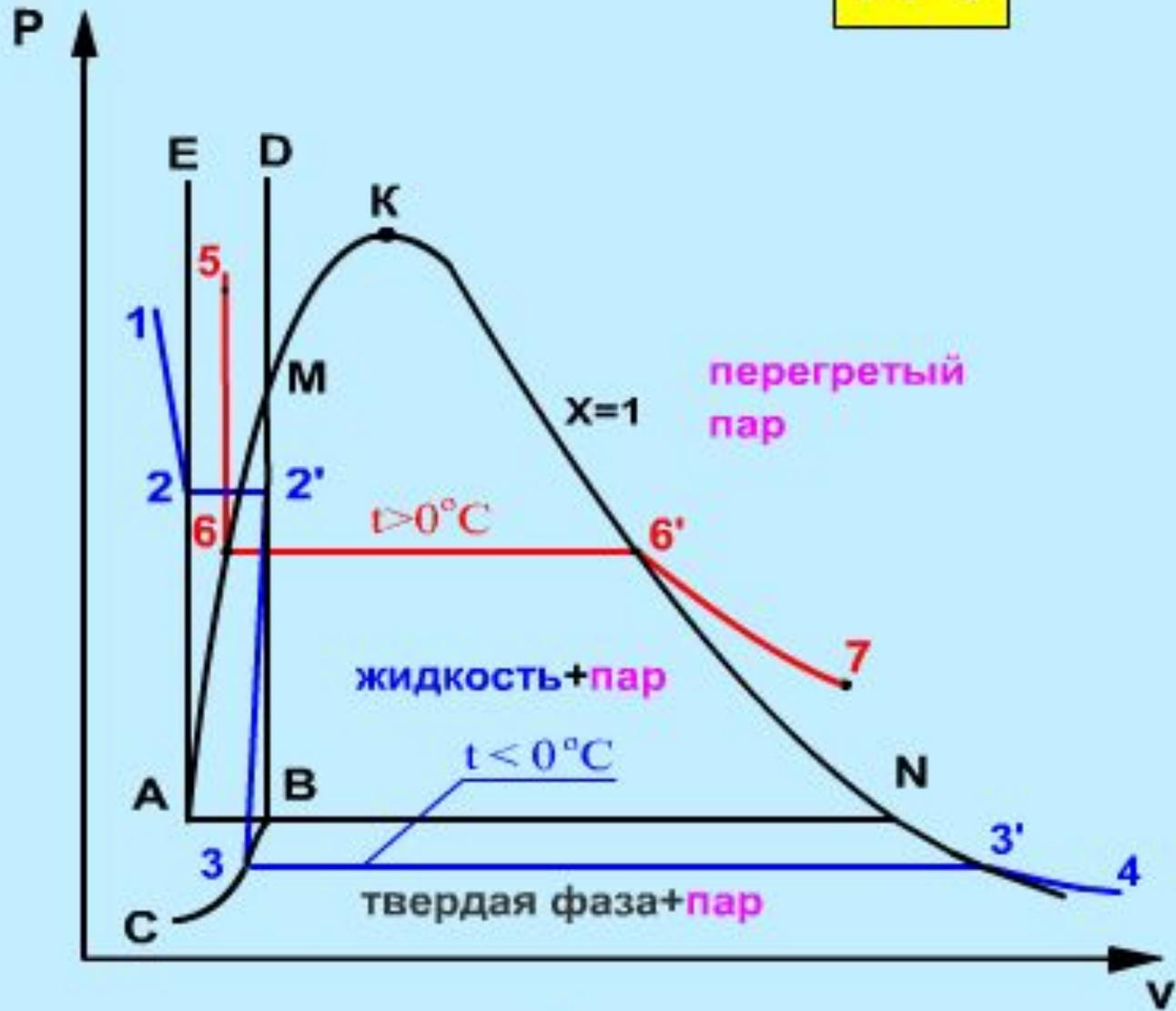






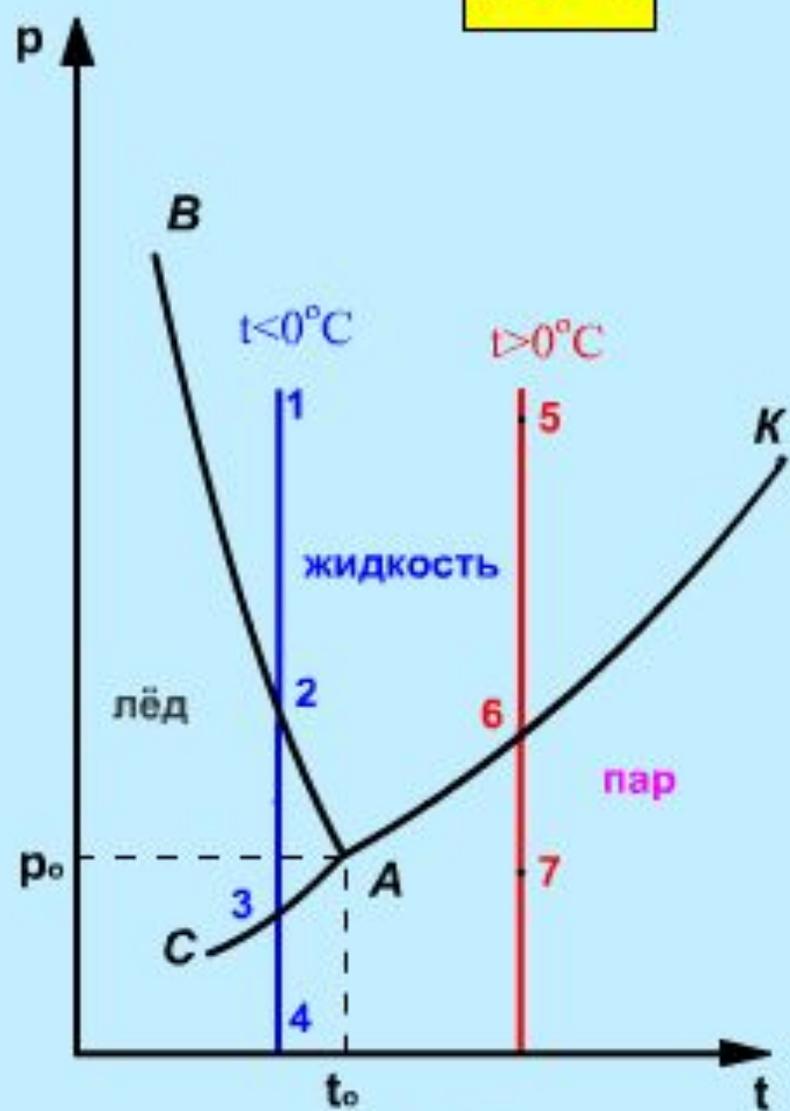


$t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

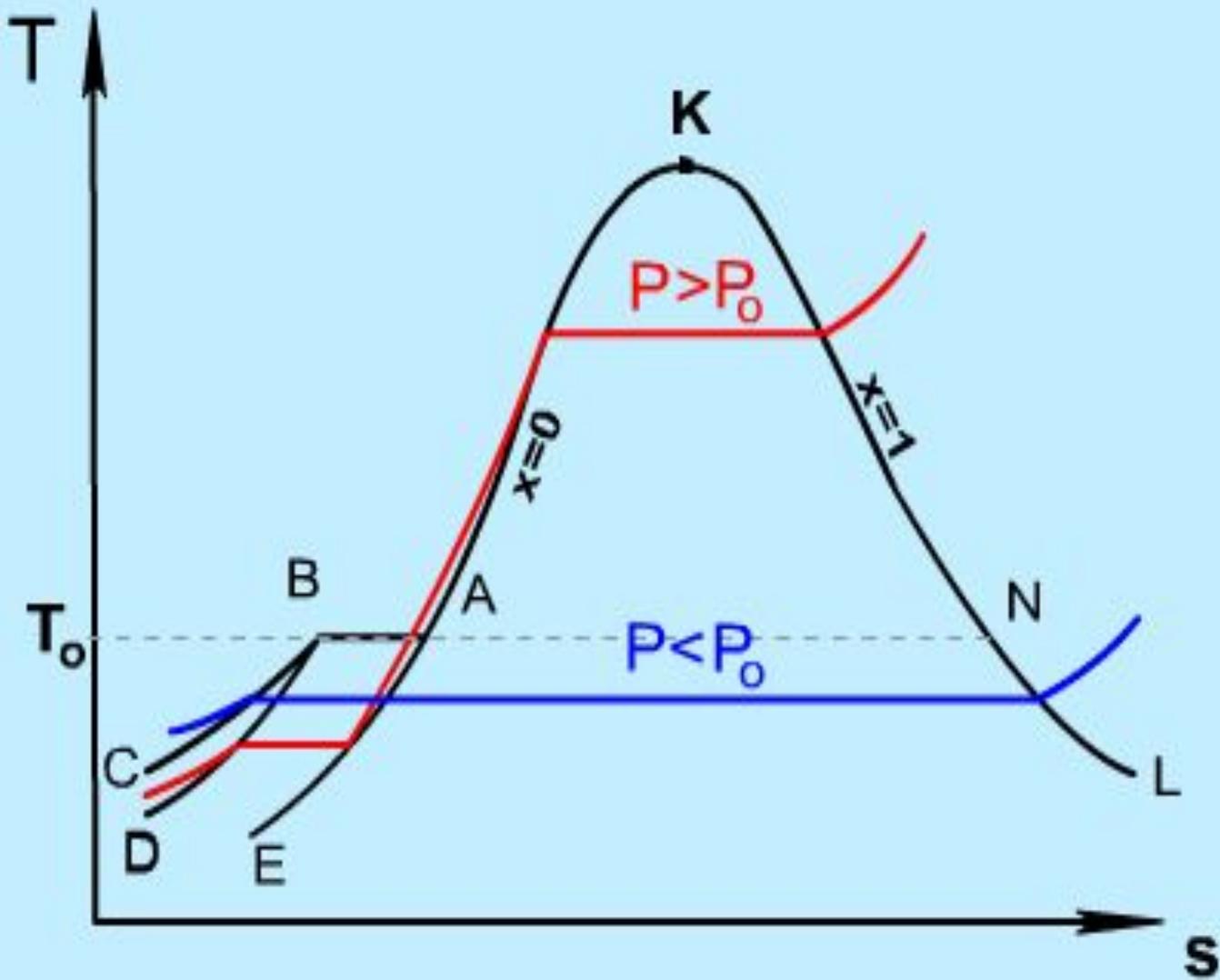


а)

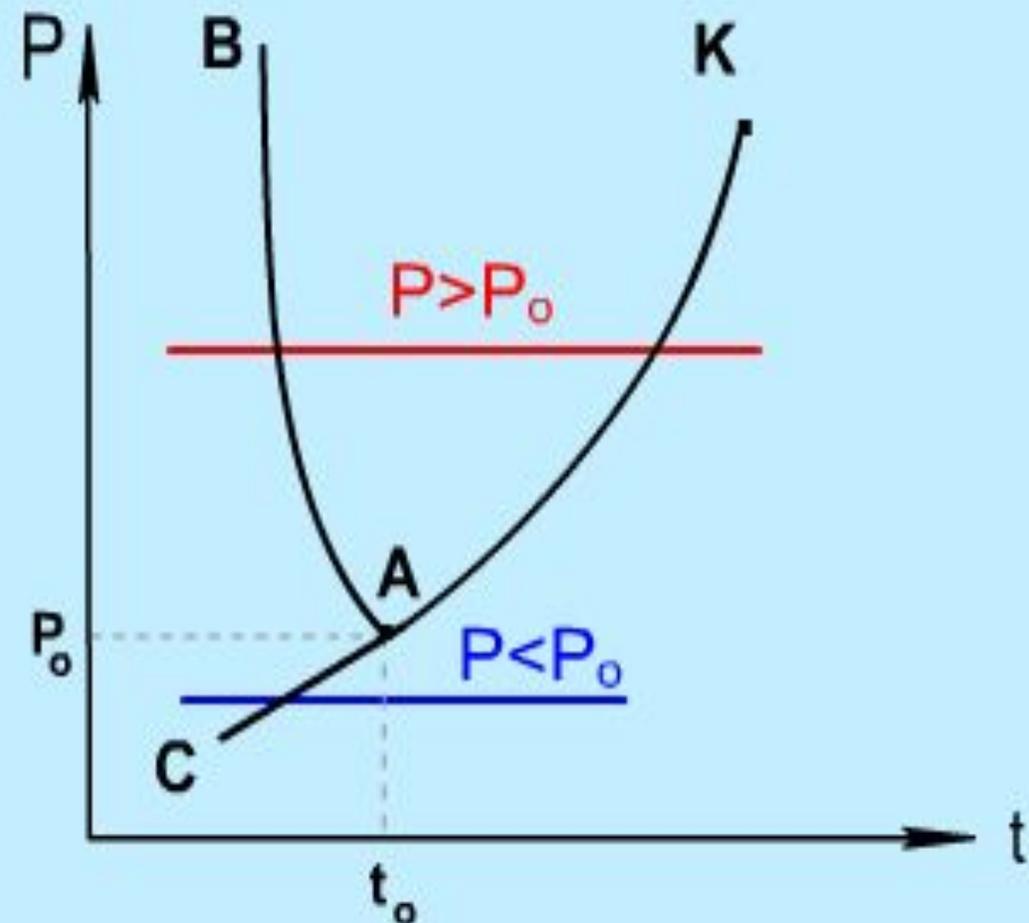
$t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$



б)



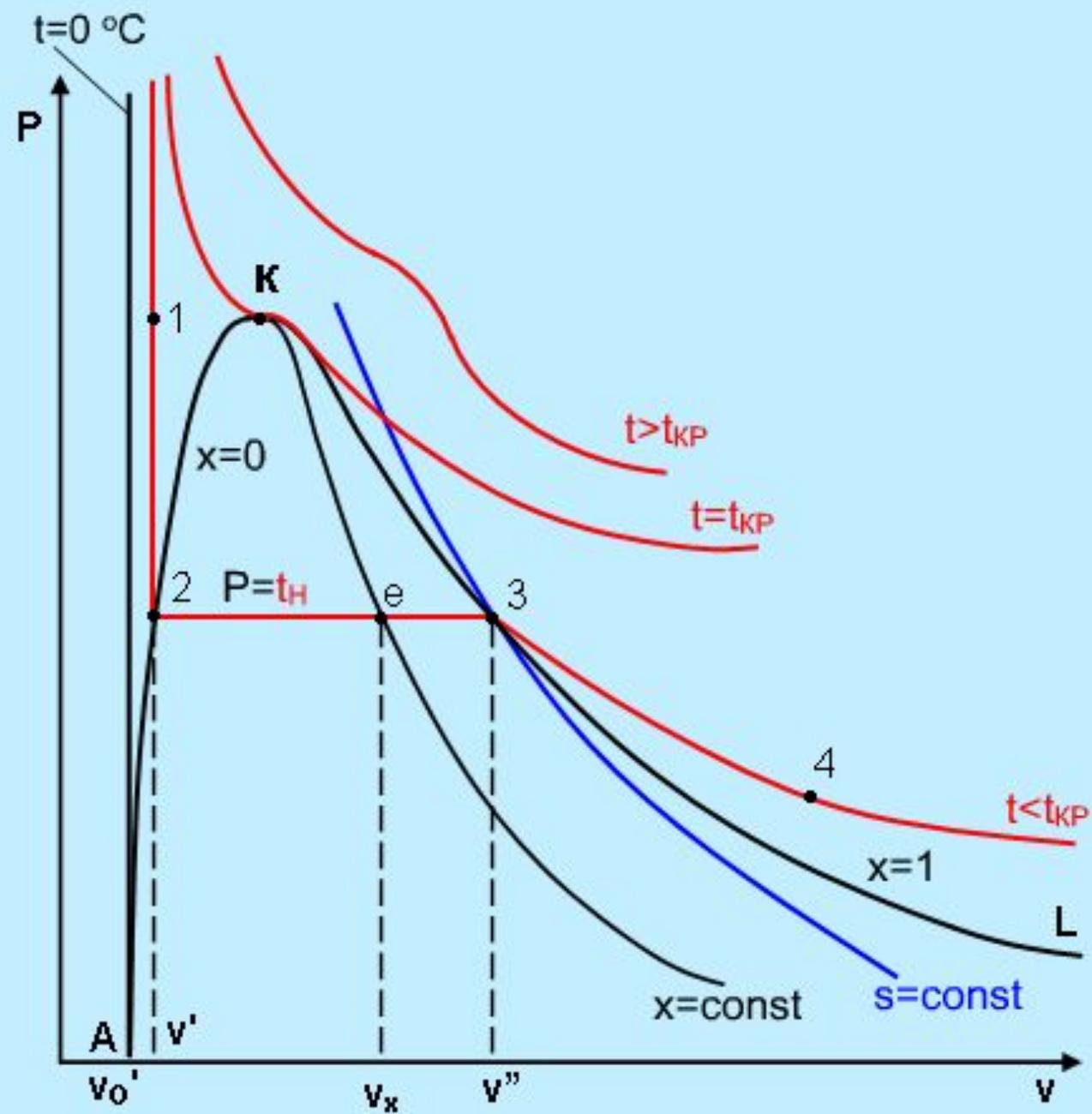
a)



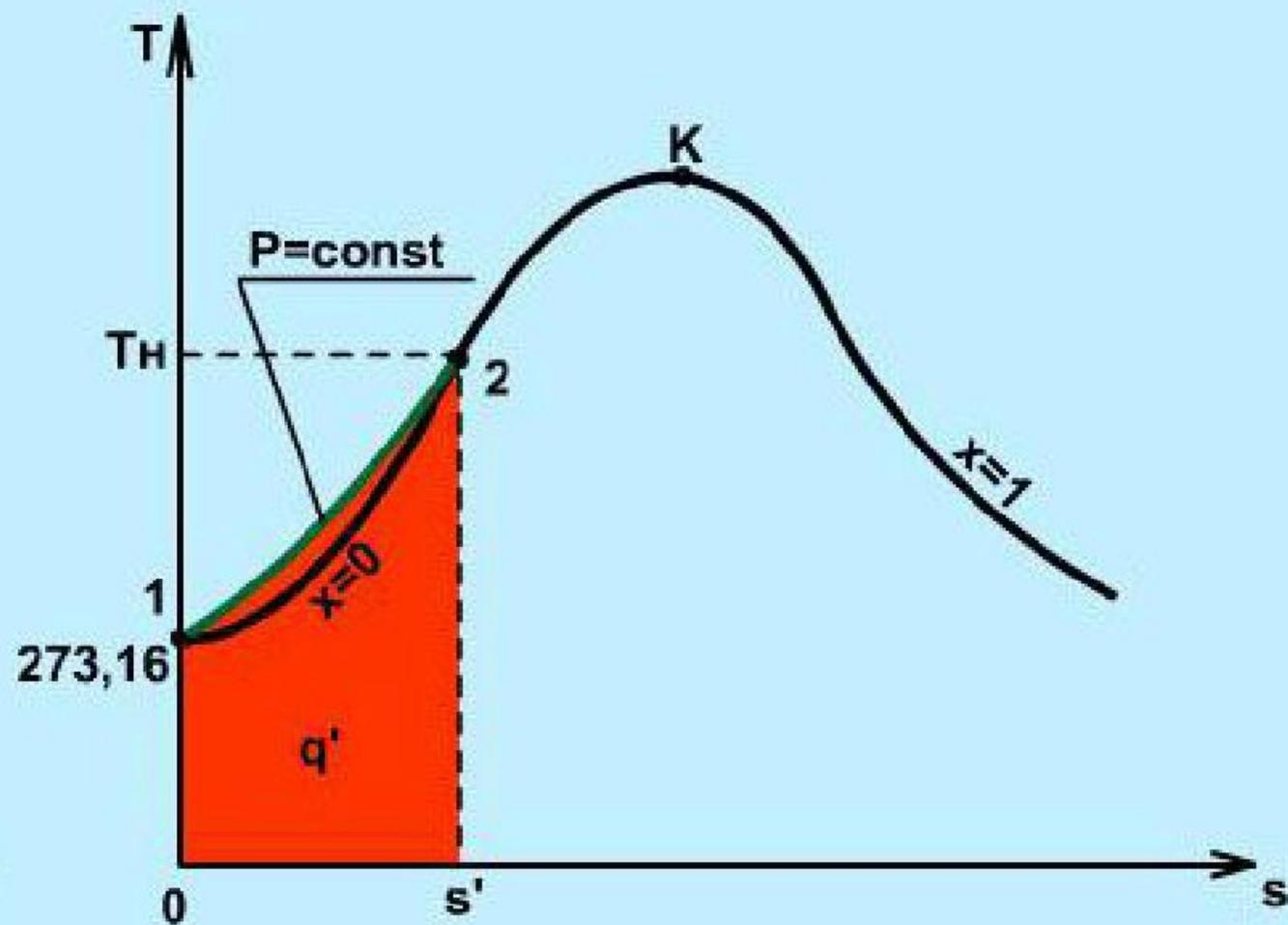
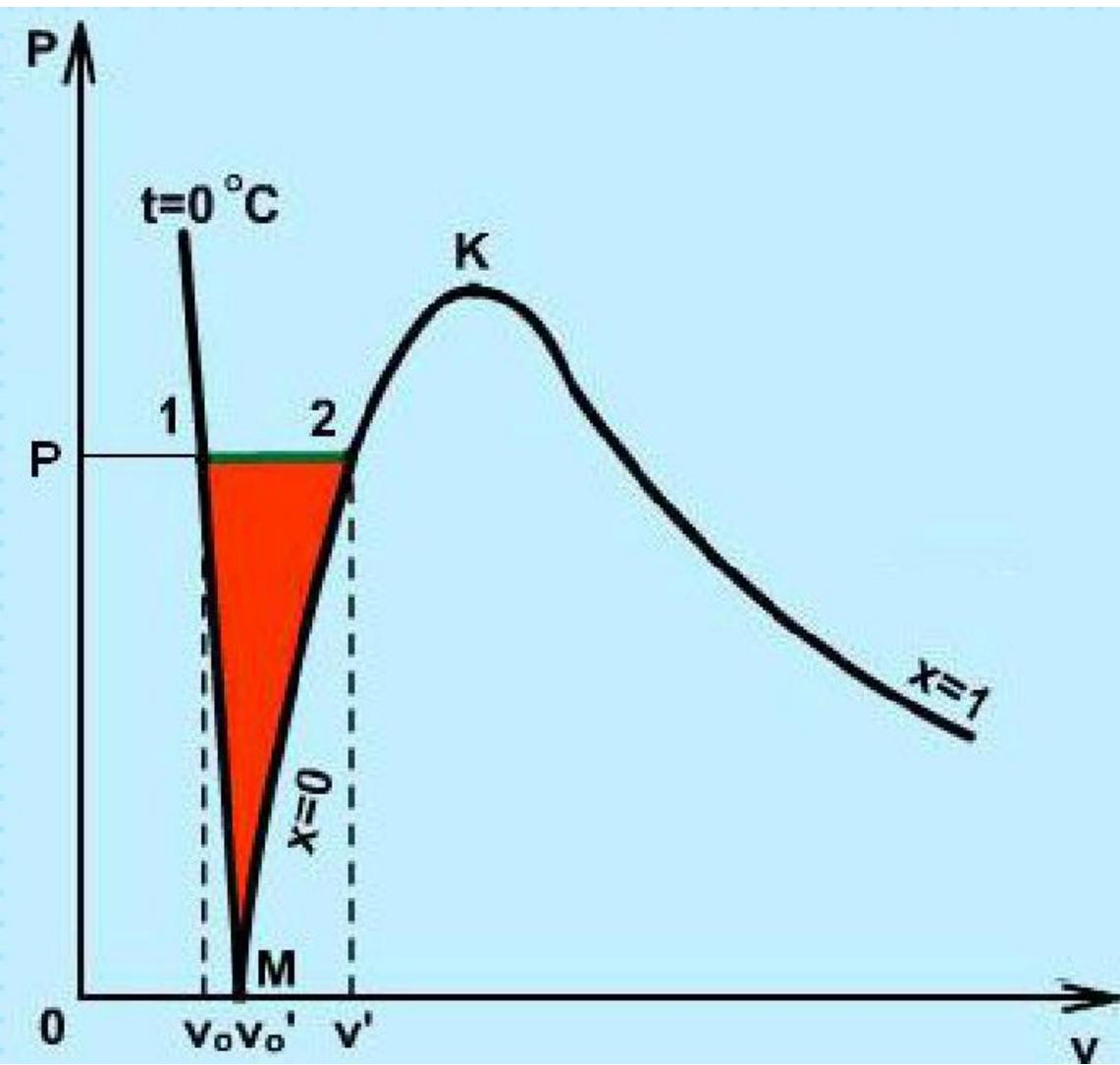
б)

$P < P_0$

$P > P_0$



$$X = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}$$



Для нагрева жидкости от $t=0$ °С до температуры насыщения t_H при заданном давлении P (процесс 1-2) ей нужно сообщить количество теплоты

$$q' = \int_0^{t_H} c_p dt = u' - u'_0 + \int_{v'_0}^{v'} P dv \quad (4)$$

Количество теплоты q' , затраченное на нагрев 1 кг жидкости от $t=0$ °С до t_H при заданном постоянном давлении, называется теплотой жидкости. Так как это теплота изобарного процесса - она соответствует разности энтальпий:

$$q' = h' - h_0 \quad (5)$$

оскольку $h_0 = u_0 + Pv_0$, а $u_0 = u'_0 = 0$ и $v'_0 = v_0$ (при всех давлениях жидкости), равенство (5) можно записать как

$$q' = h' - Pv'_0$$

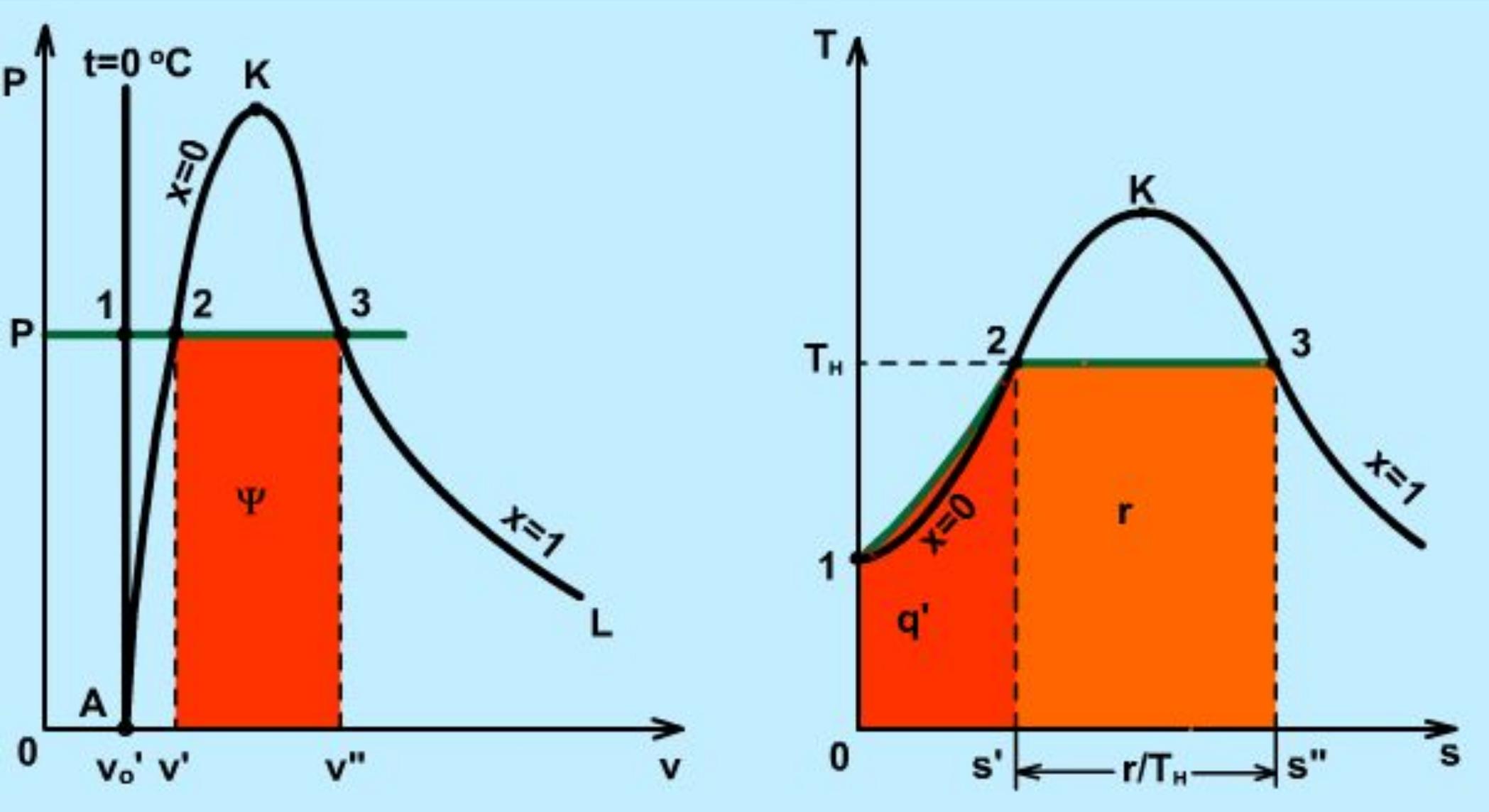
Величина Pv_0' очень мала по отношению к q' , и при невысоких давлениях можно принимать $q' = h'$. Внутренняя энергия жидкости на линии насыщения рассчитывается по энтальпии

$$u' = h' - Pv' \quad (7)$$

Зная значение энтропии s_0 при $t=0$ °С и заданном давлении, энтропию жидкости на линии насыщения при T_H можно определить как

$$s' = s_0 + \int_{T_0}^{T_H} \frac{c_p dT}{T} \approx c_p \ln \frac{T_H}{273,16} = 4,187 \ln \frac{T_H}{273,16} \quad (8)$$

Сухой насыщенный пар



Исходя из первого закона термодинамики для процесса парообразования можно записать:

$$r = u'' - u' + P(v'' - v') = h'' - h' \quad (9)$$

Внутренняя теплота парообразования

$$\rho = u'' - u' \quad (10)$$

Внешняя теплота парообразования

$$\psi = P(v'' - v') \quad (11)$$

Используя введенные обозначения, уравнение (9) можно представить в виде

$$r = \rho + \psi \quad (12)$$

Полная теплота сухого насыщенного пара

$$\lambda'' = q' + r = q' + \rho + \psi = h'' - Pv'_0 \quad (13)$$

Энтальпию сухого насыщенного пара можно определить как

$$h'' = h' + r = q' + Pv'_0 + r = \lambda'' + Pv'_0 \quad (14)$$

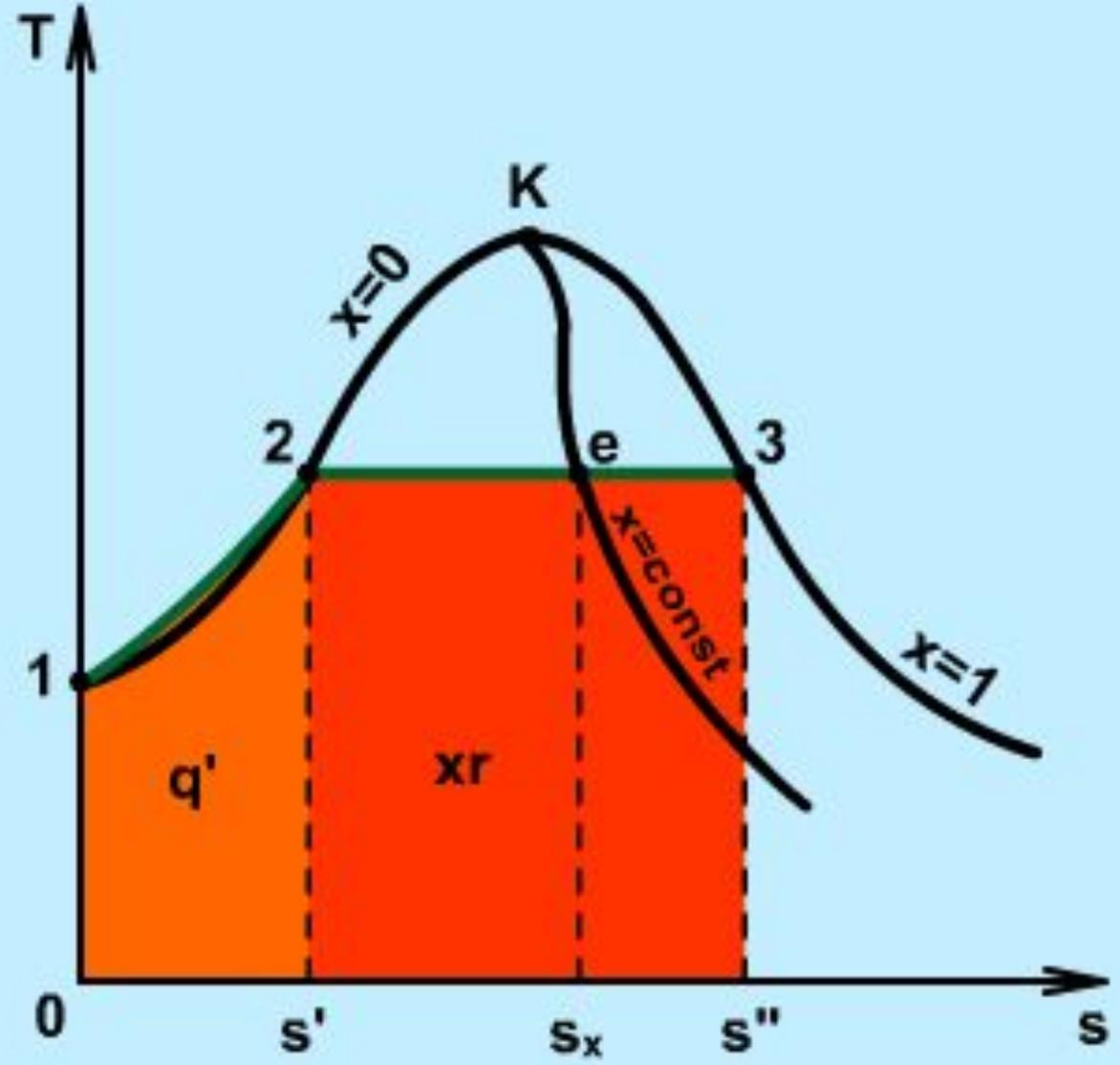
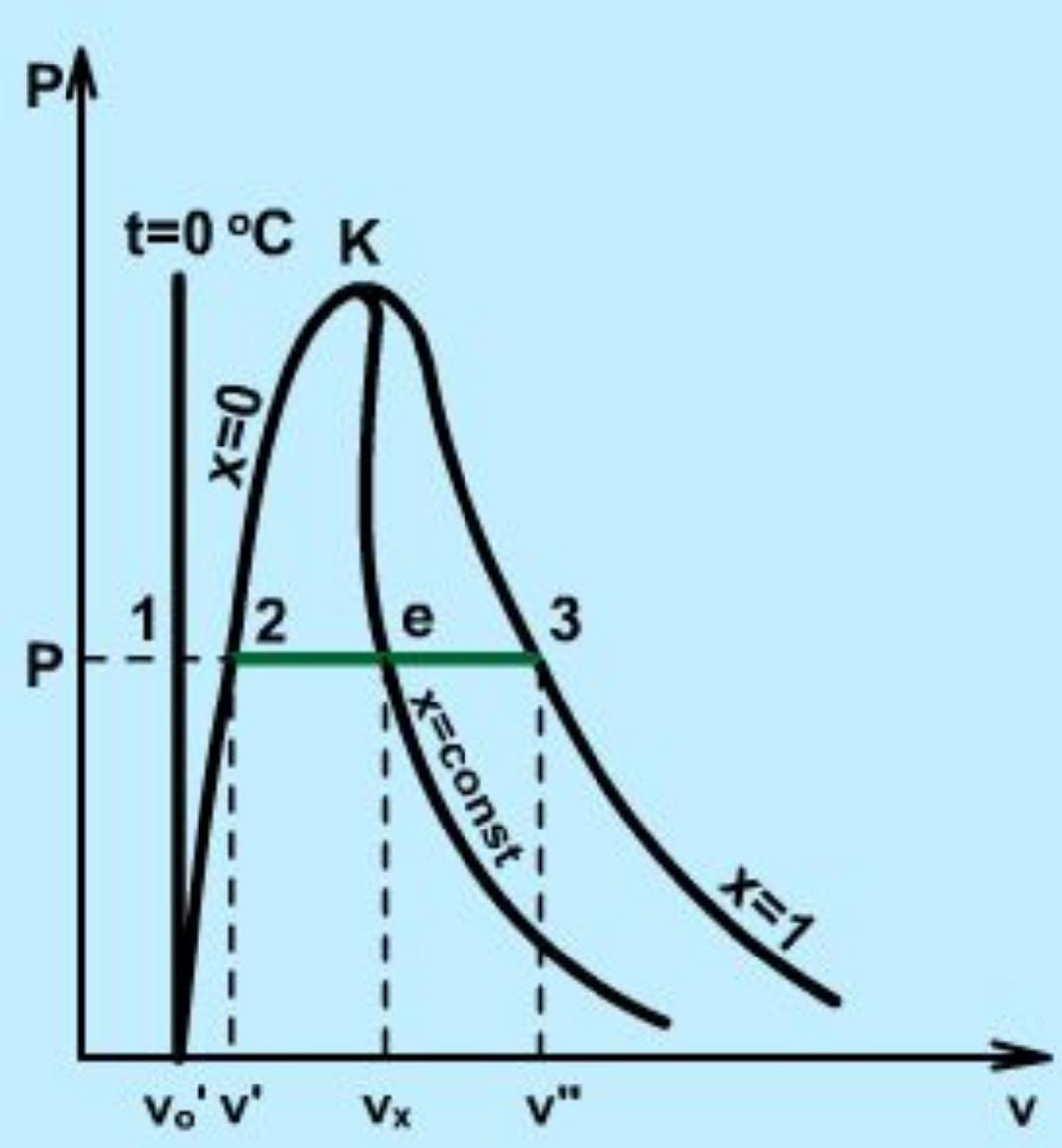
Внутренняя энергия сухого насыщенного пара определяется из соотношения

$$u'' = h'' - Pv'' \quad (15)$$

Значение энтропии сухого насыщенного пара

$$s'' = s' + \frac{r}{T_H} \quad (16)$$

Влажный насыщенный пар



Расчет удельного объема, энтальпии, энтропии и внутренней энергии для влажного пара можно выполнить по формулам:

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v') \quad (18)$$

$$h_x = h' + x(h'' - h') = h' + xr \quad (19)$$

$$s_x = s' + x(s'' - s') \quad (20)$$

$$u_x = u' + x(u'' - u') \quad (21)$$

Используя параметры влажного насыщенного пара, можно рассчитать его степень сухости:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} = \frac{1-e}{1-2} \quad (22)$$

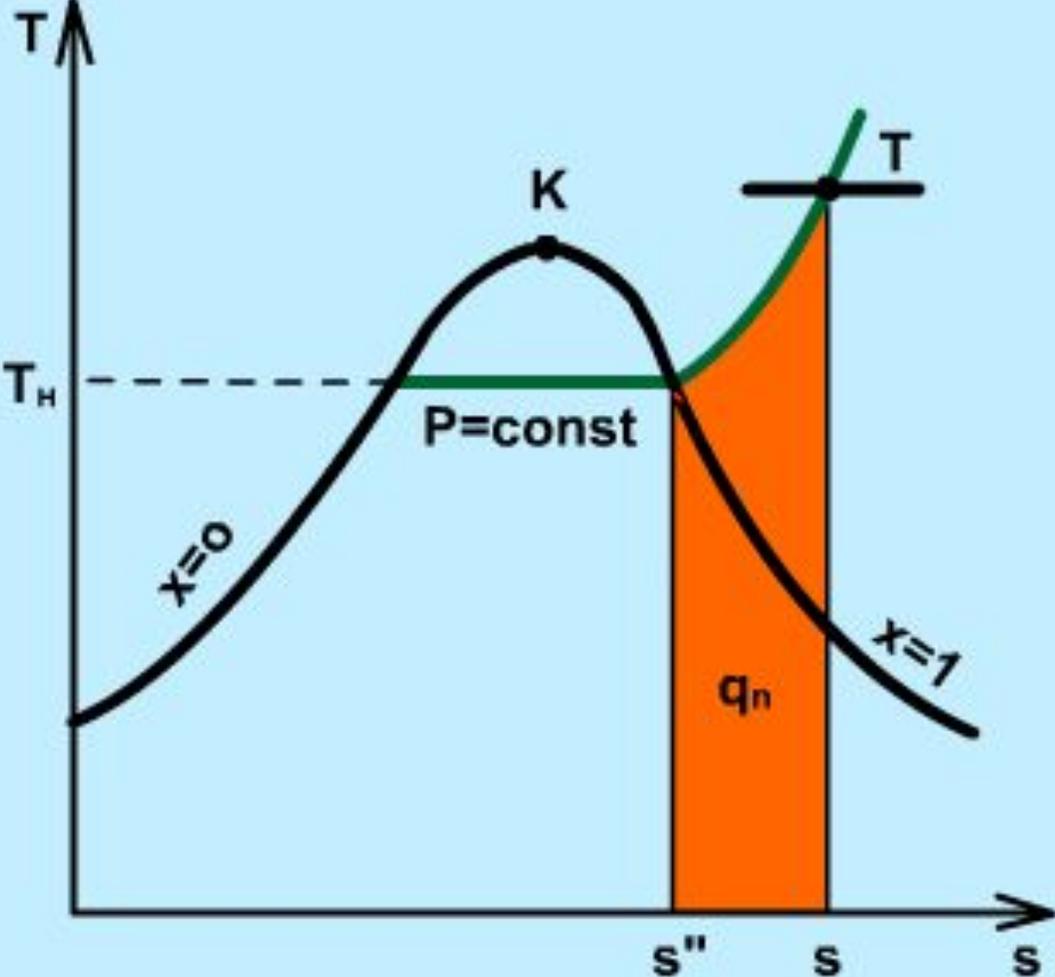
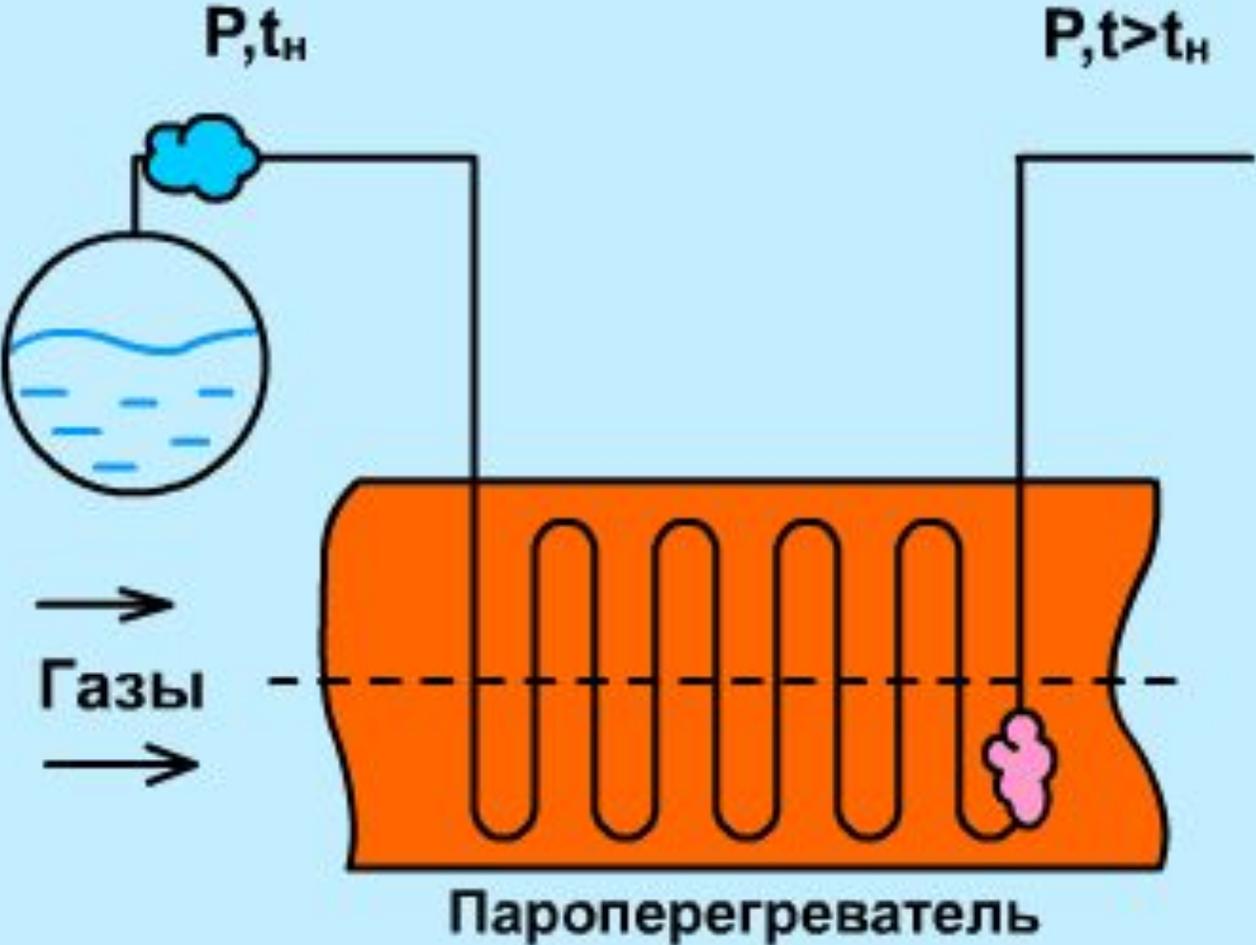
Внутренняя энергия влажного пара проще определяется как

$$u_x = h_x - Pv_x \quad (23)$$

Теплота, необходимая для получения влажного пара из воды с $t=0$ оС при изобарном ее нагревании, называется полной теплотой влажного пара и определяется как

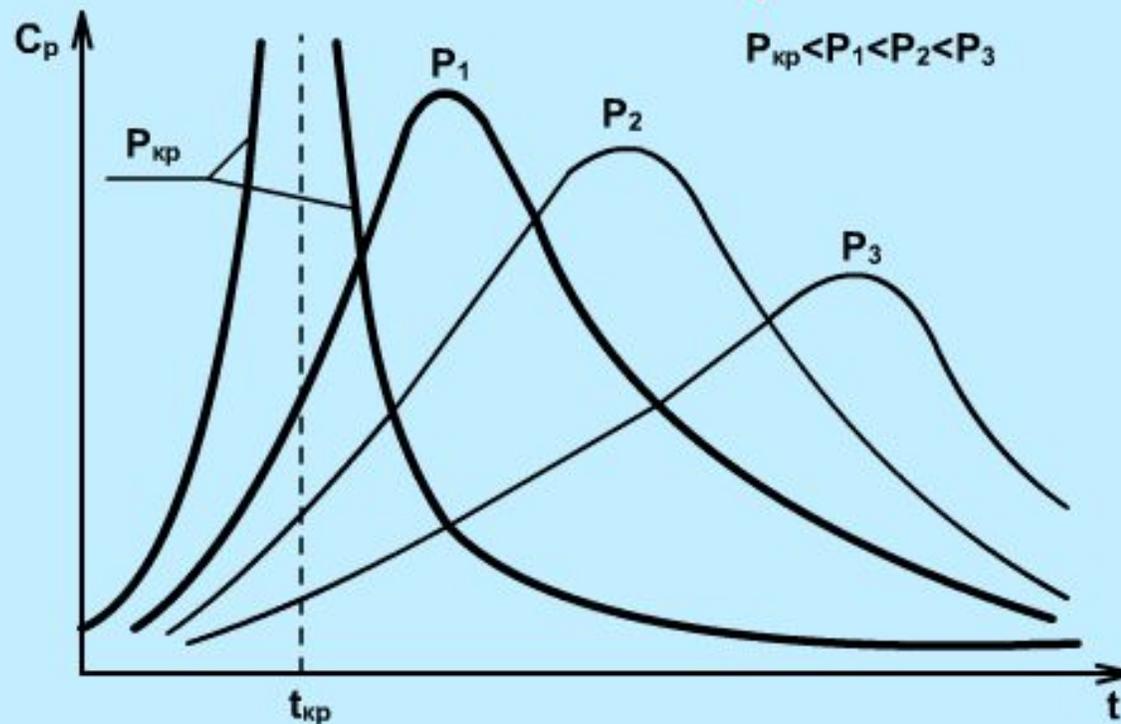
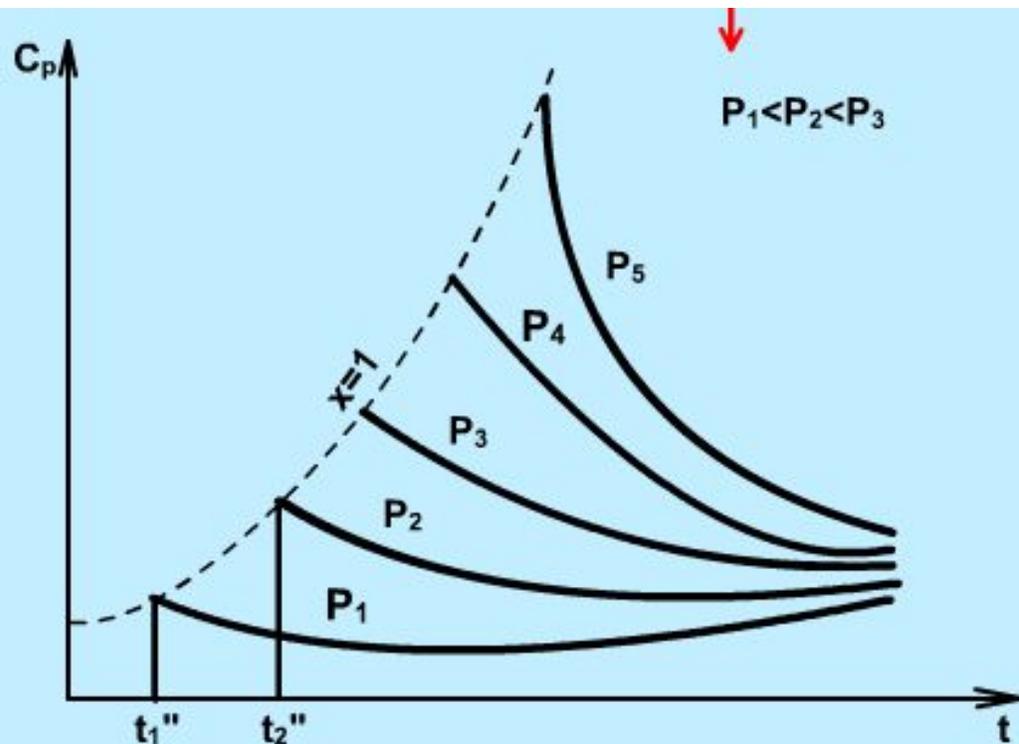
$$\lambda_x = q' + xr = h_x - Pv'_0 \quad (24)$$

Перегретый пар



Расчет удельного объема, энтальпии, энтропии и внутренней энергии для влажного пара можно выполнить по формулам:

$$q_{\text{п}} = \int_{t_{\text{н}}}^t c_p dt = h - h'' = u - u'' + P(v - v'') \quad (25)$$



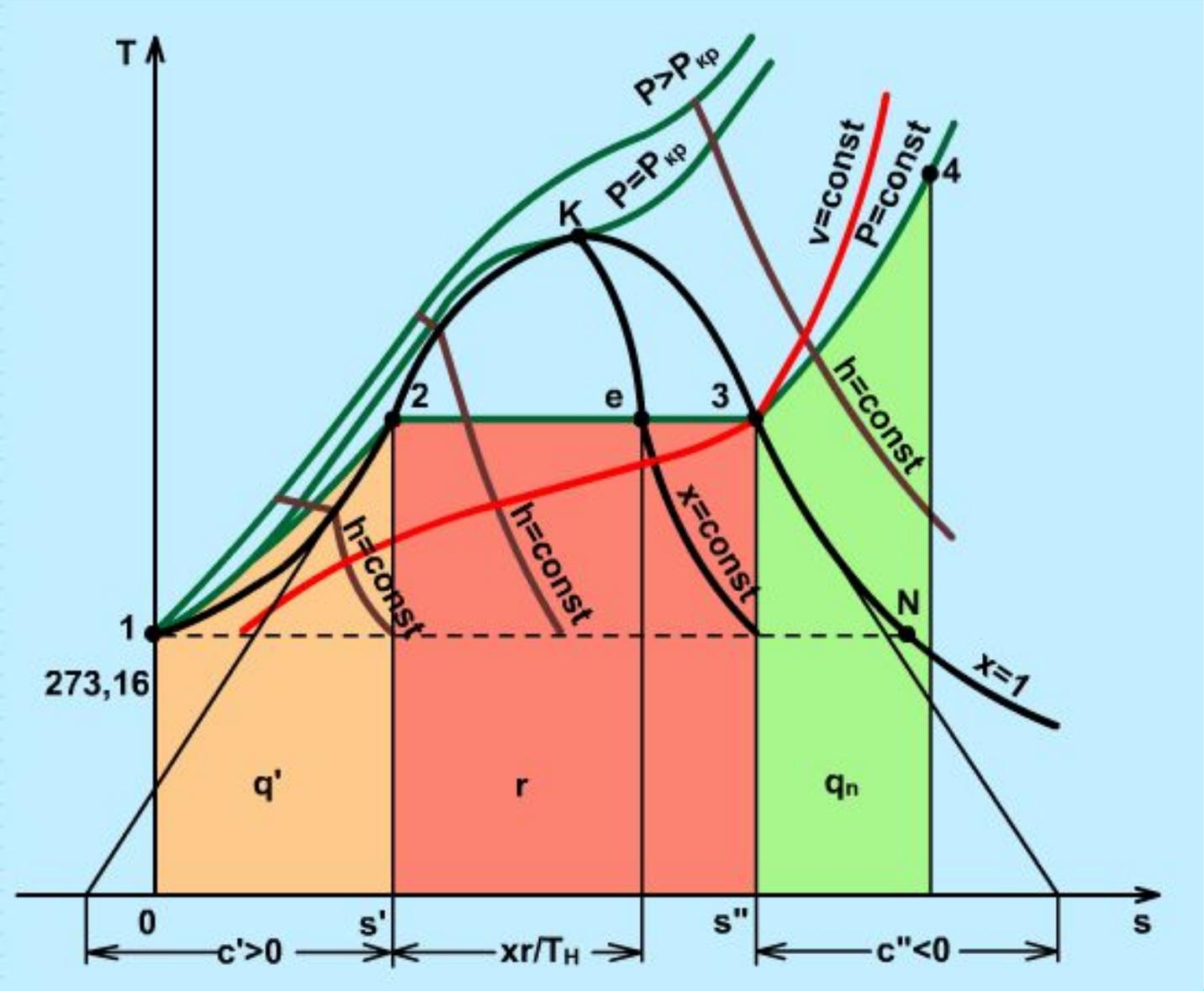
Энтальпия перегретого пара

$$h = h'' + q_{\text{п}} \quad (26)$$

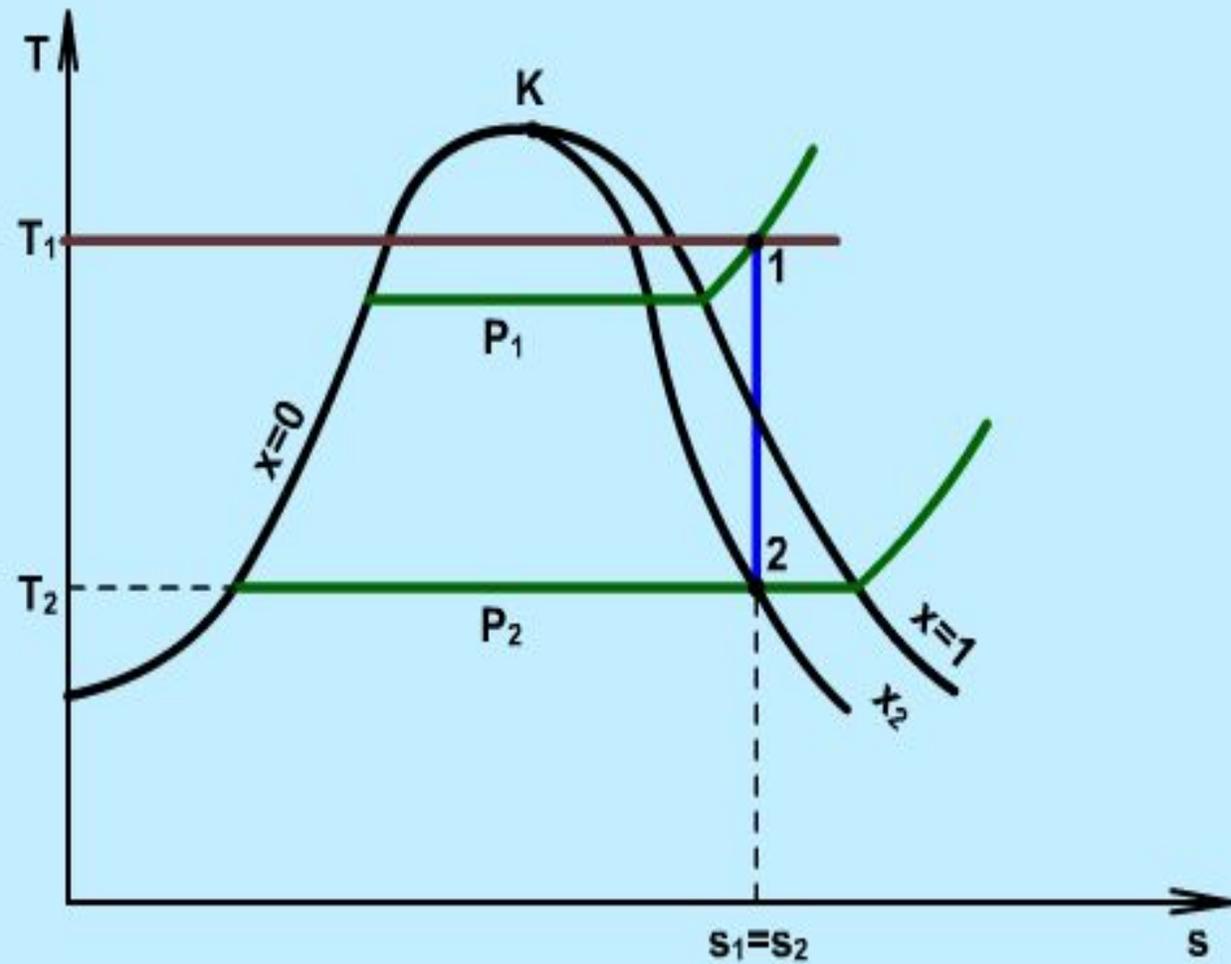
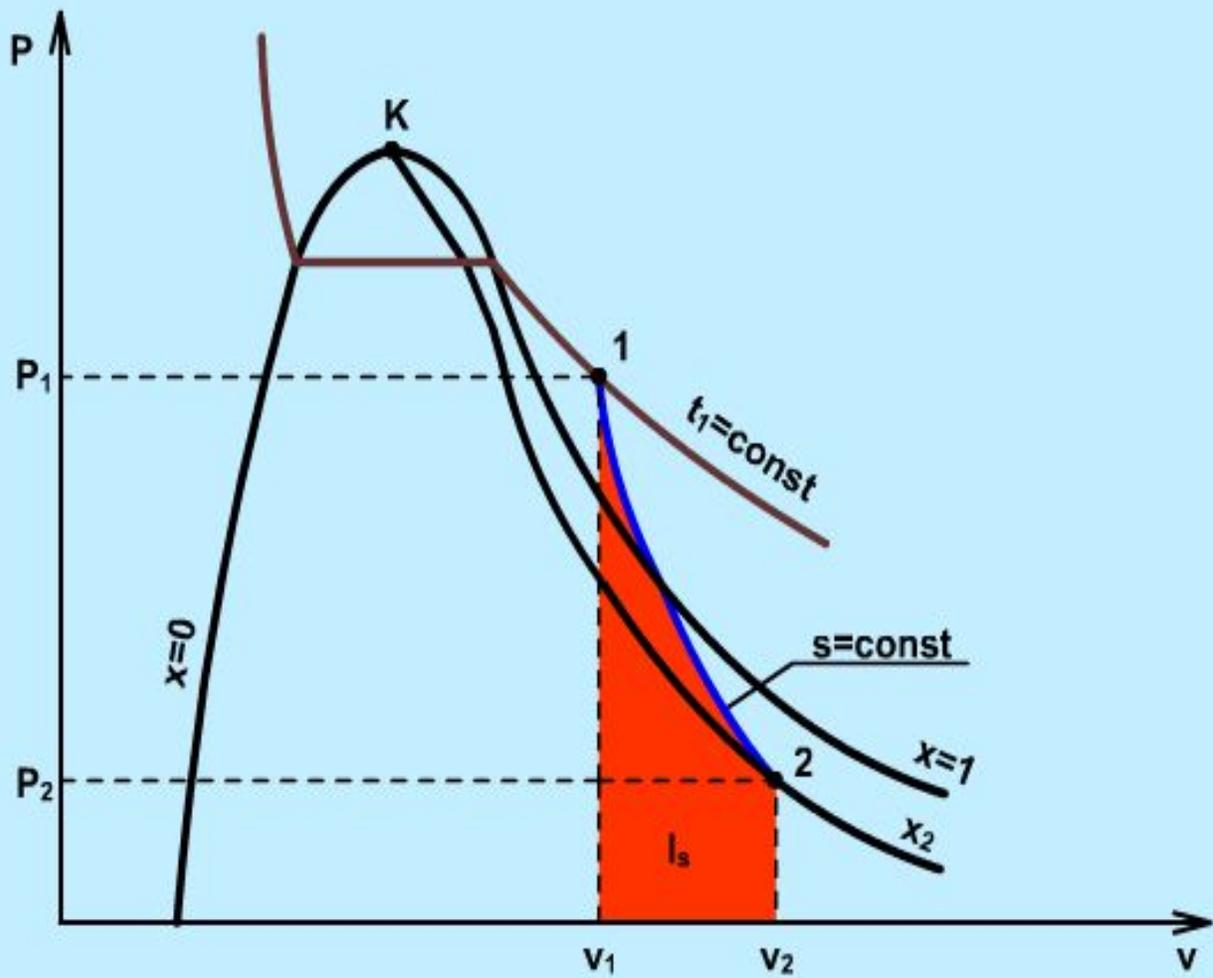
Энтропия перегретого пара

$$s = s'' + \int_{T_{\text{H}}}^T \frac{dq_{\text{п}}}{T} = s'' + \int_{T_{\text{H}}}^T \frac{c_p dT}{T} \quad (27)$$

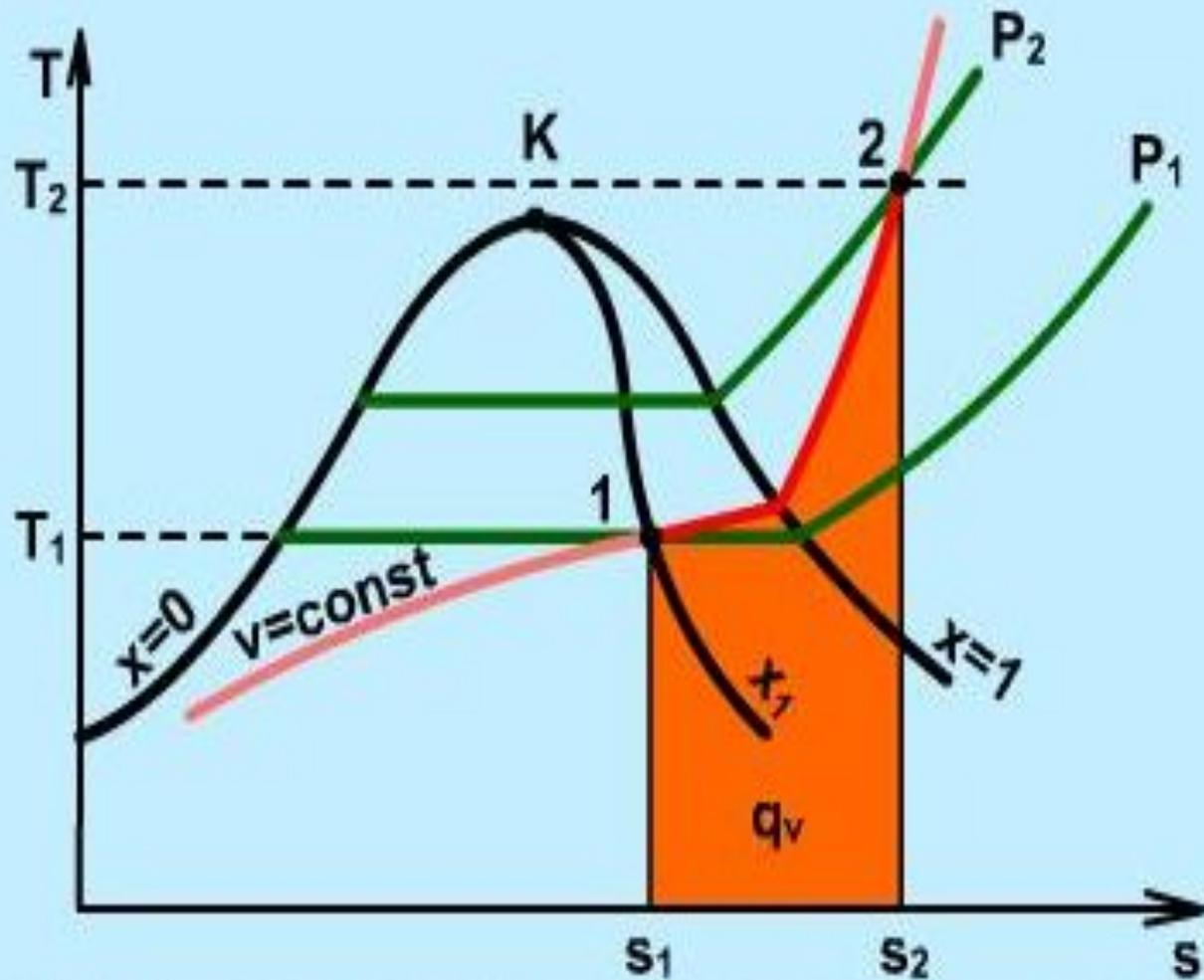
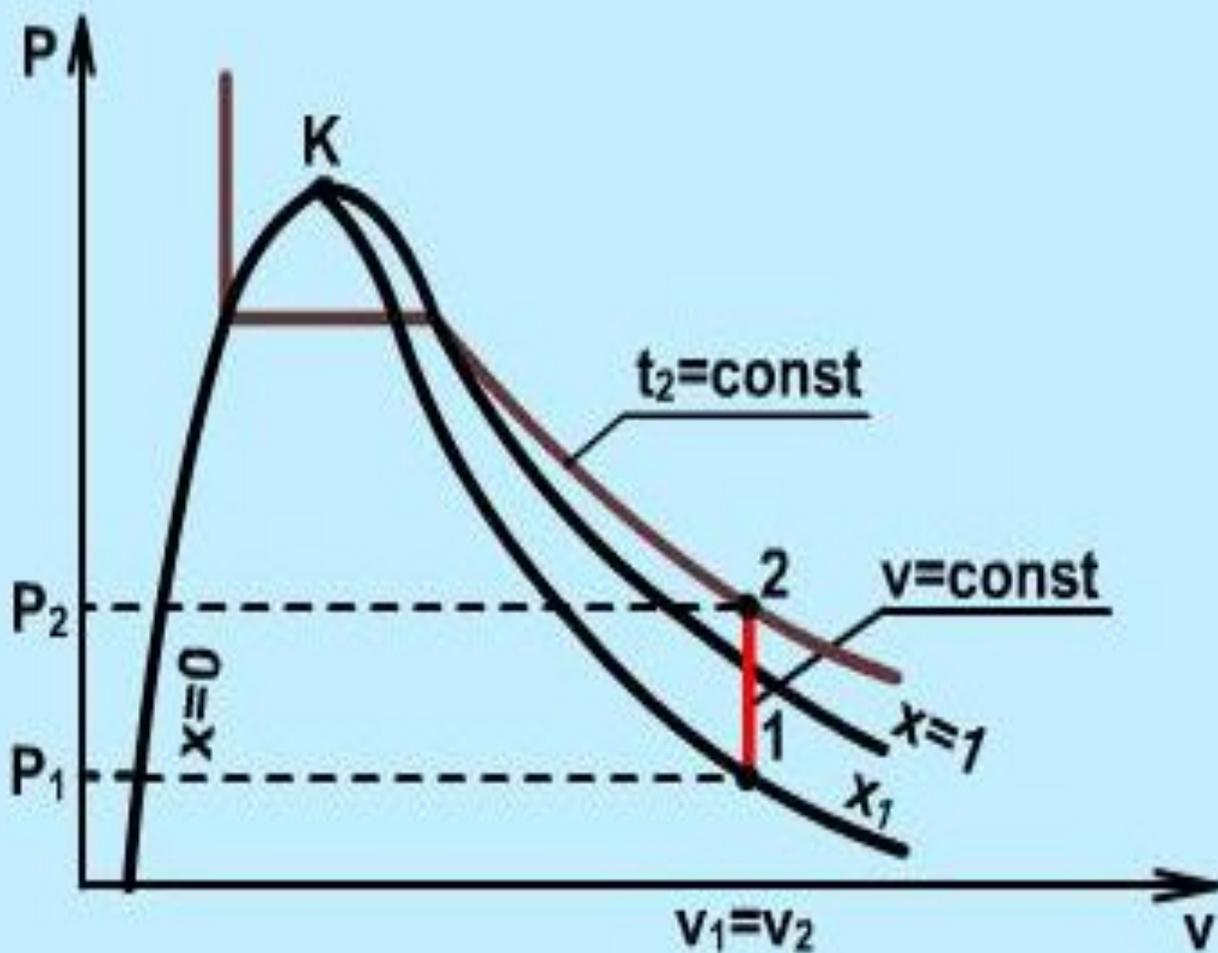
Диаграмма T,S- для воды и водяного пара



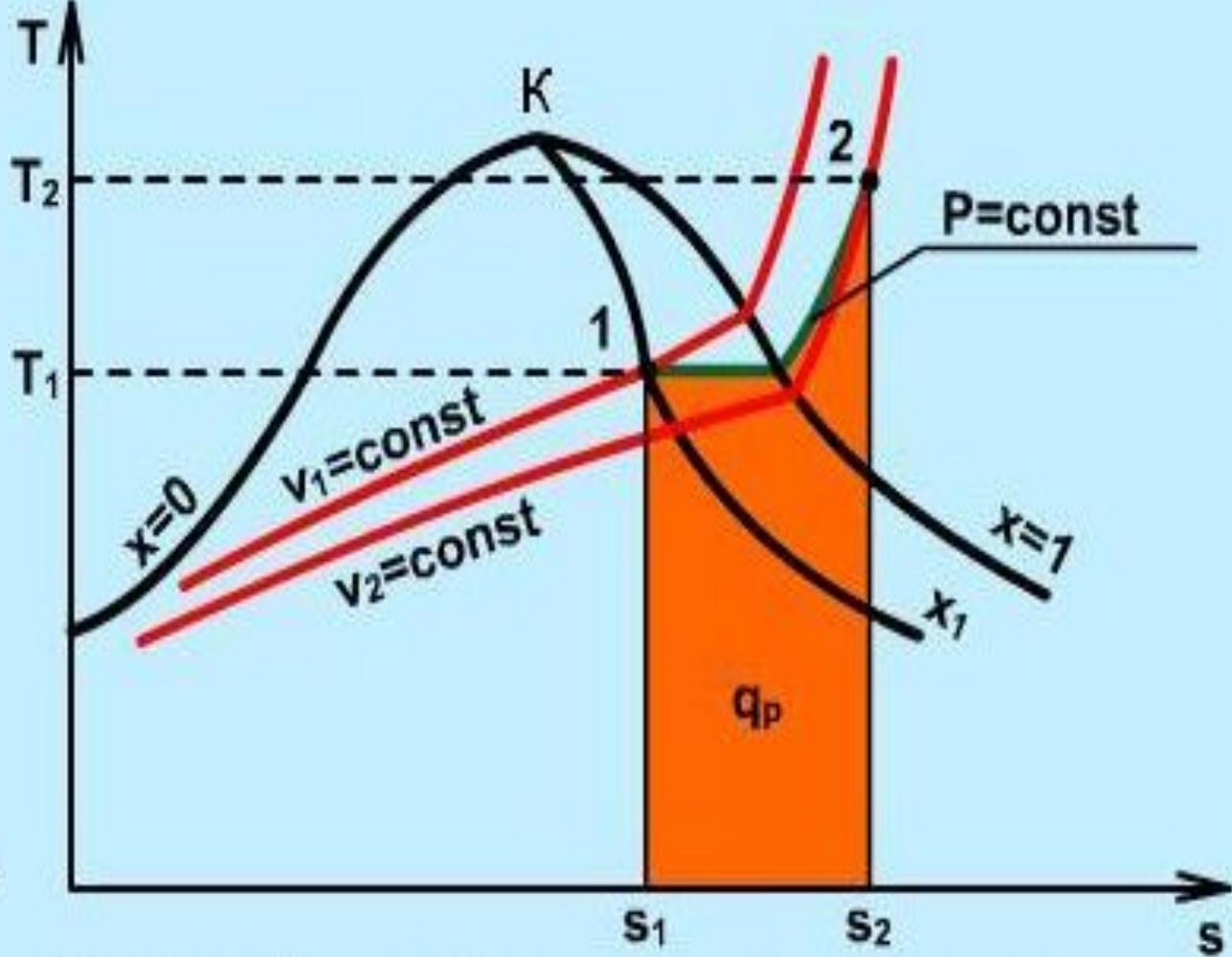
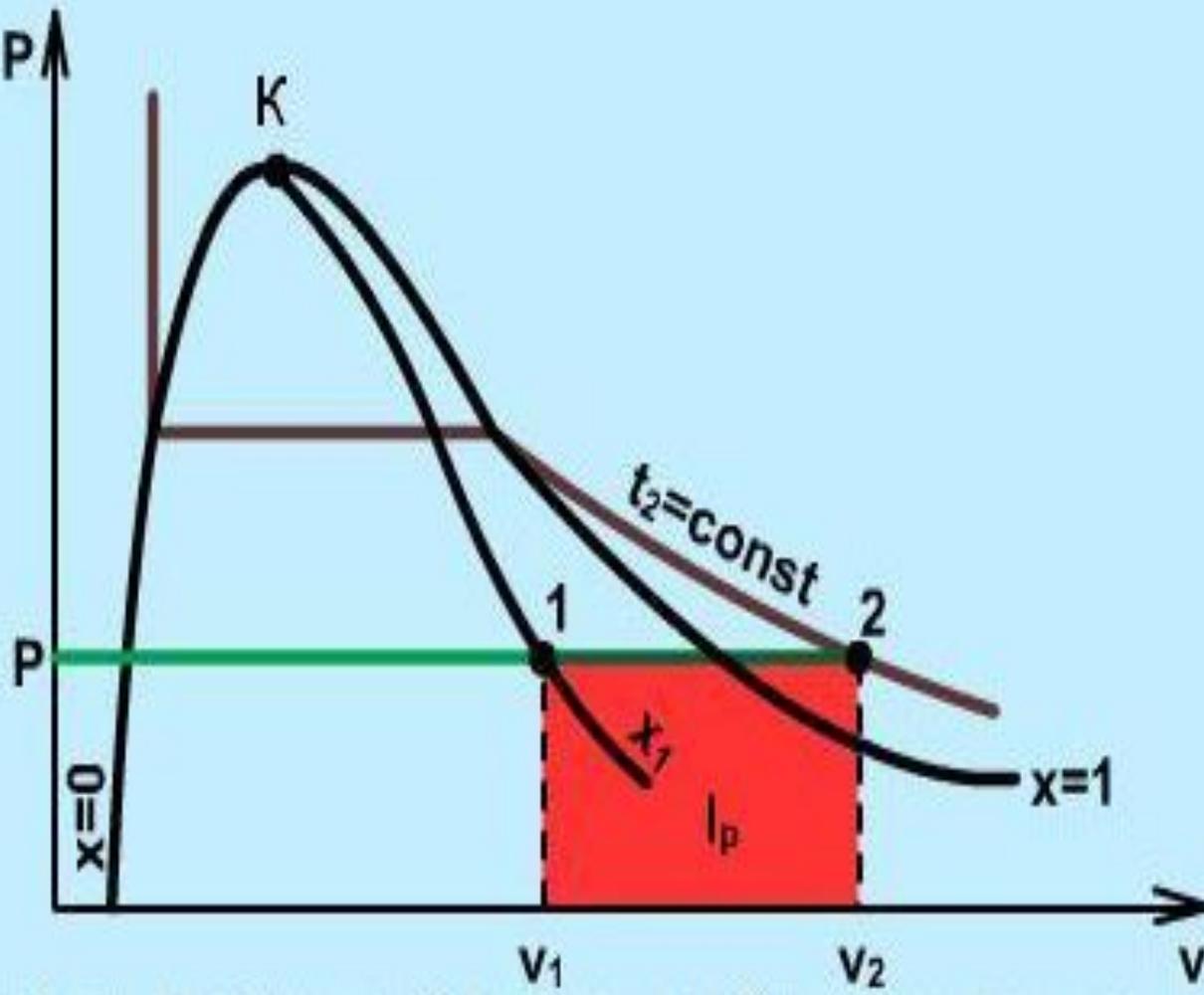
Адиабатный процесс



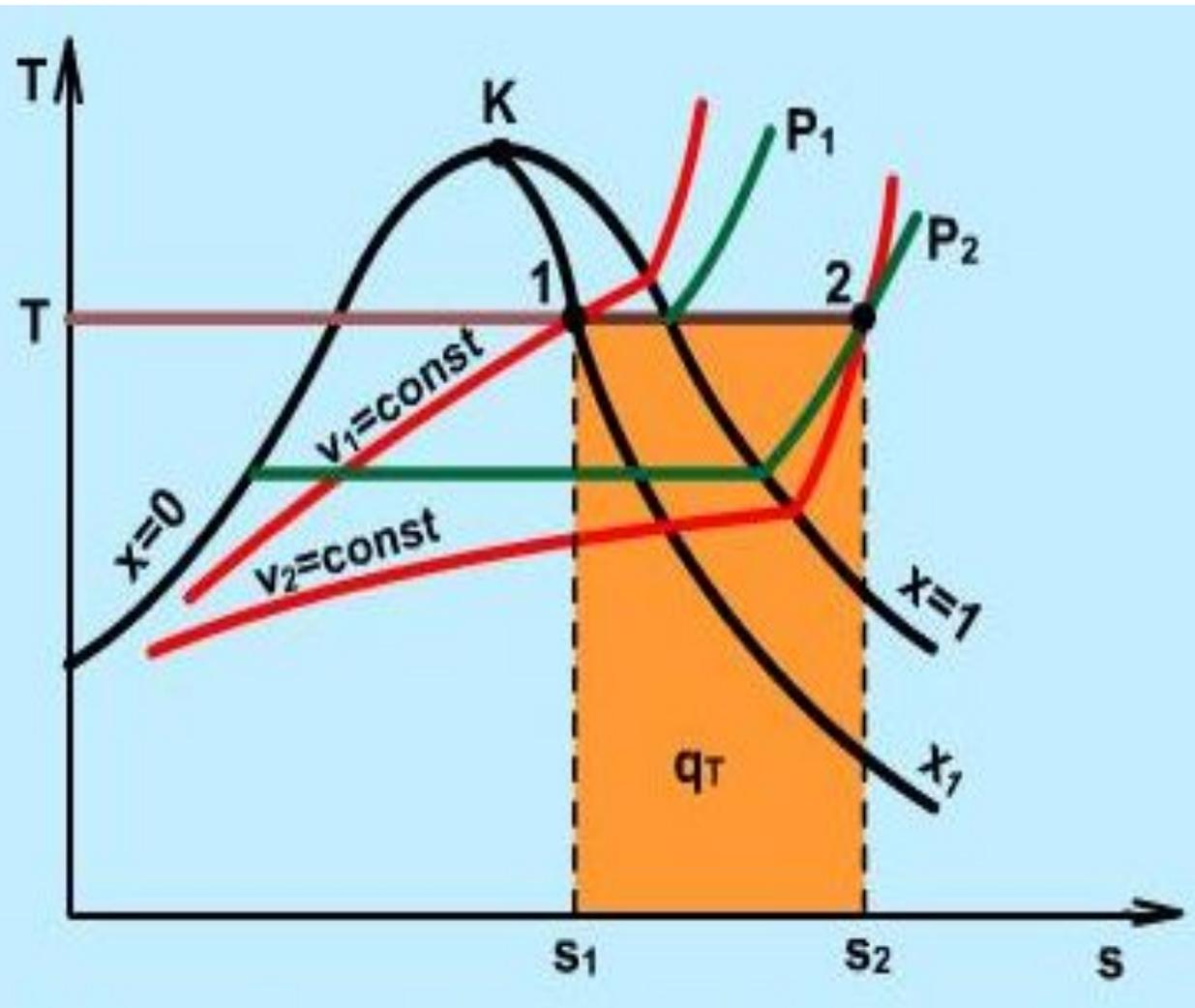
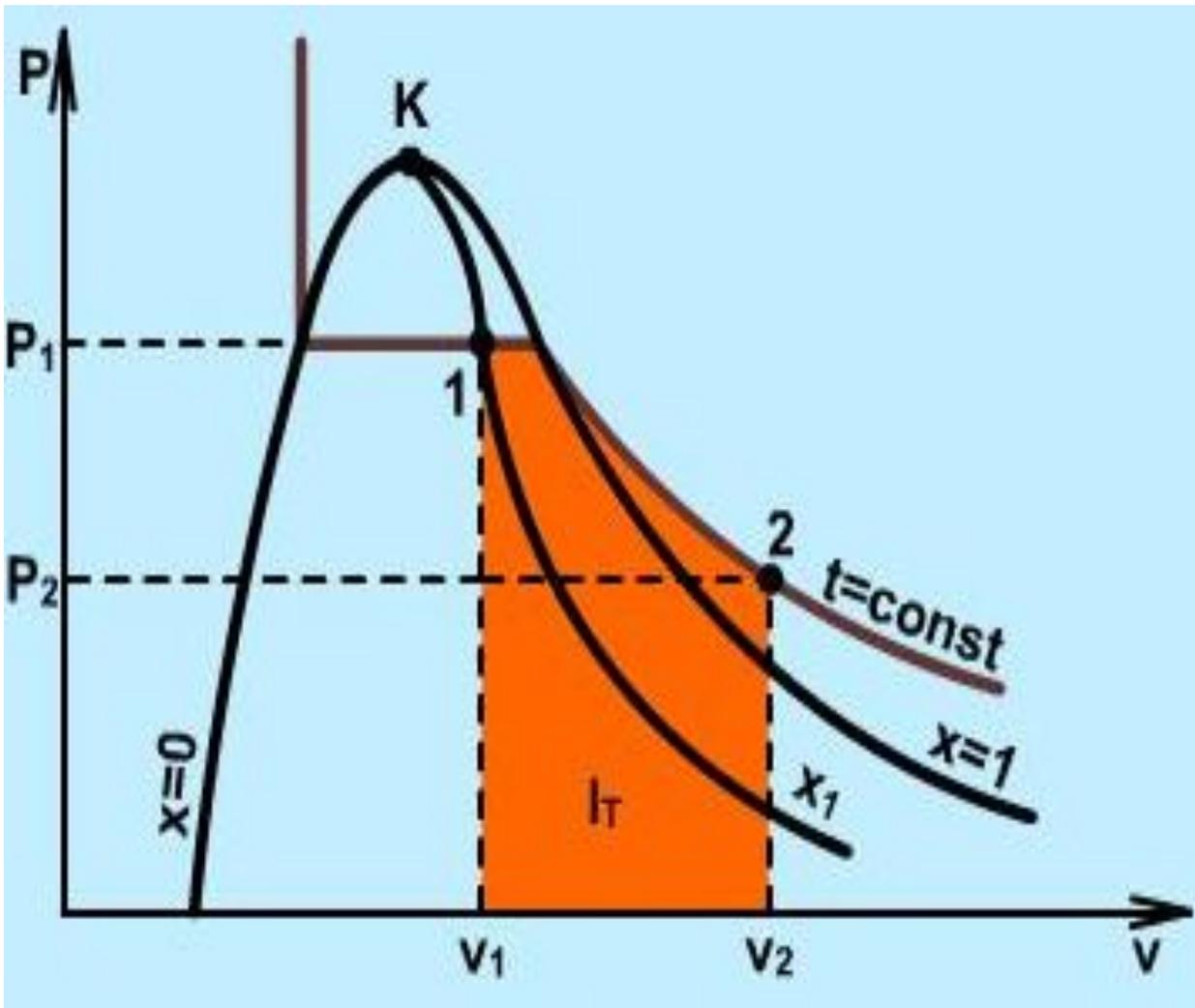
Изохорный процесс



Изобарный процесс



Изотермический процесс



Изотермический процесс

