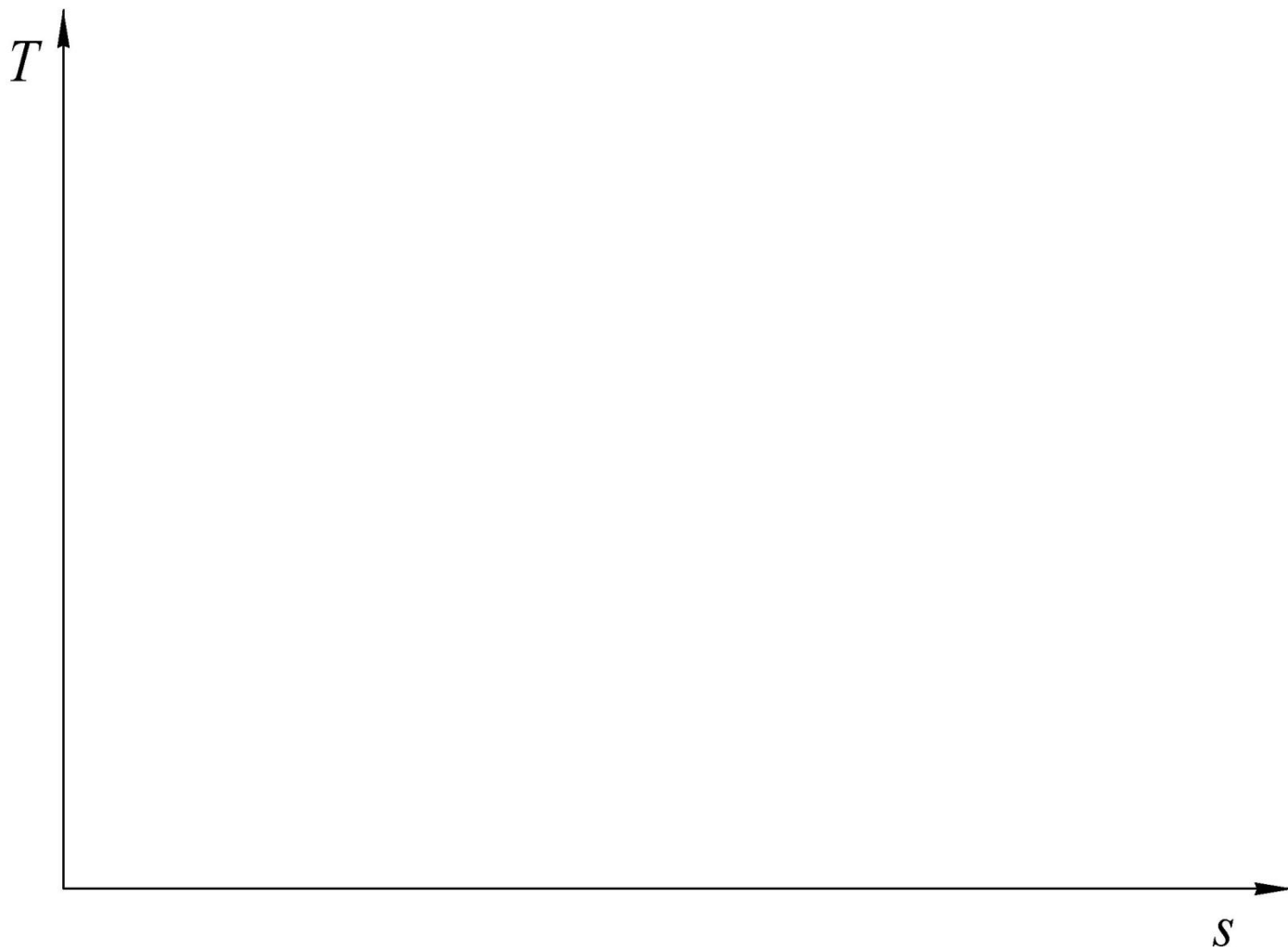


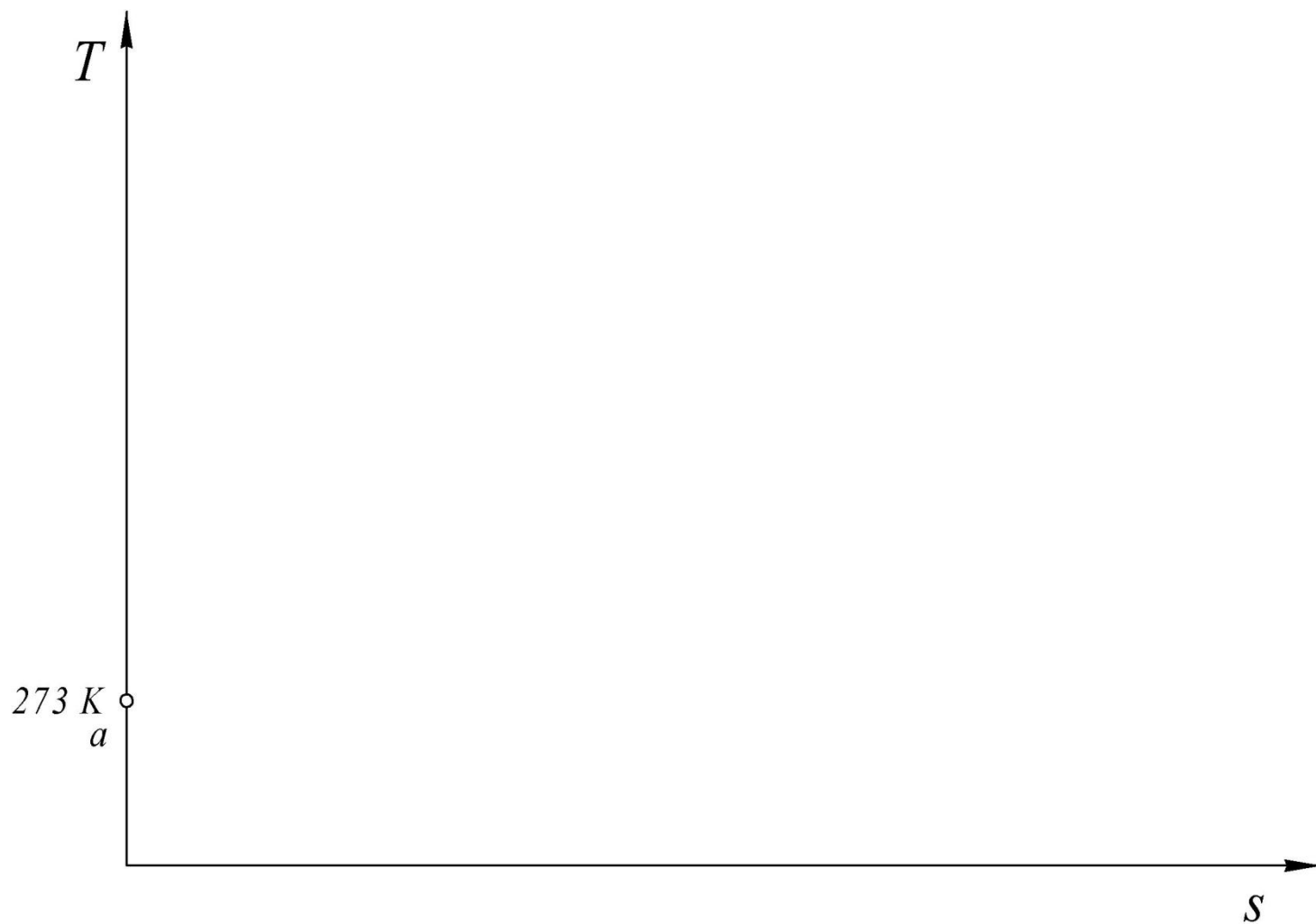


6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

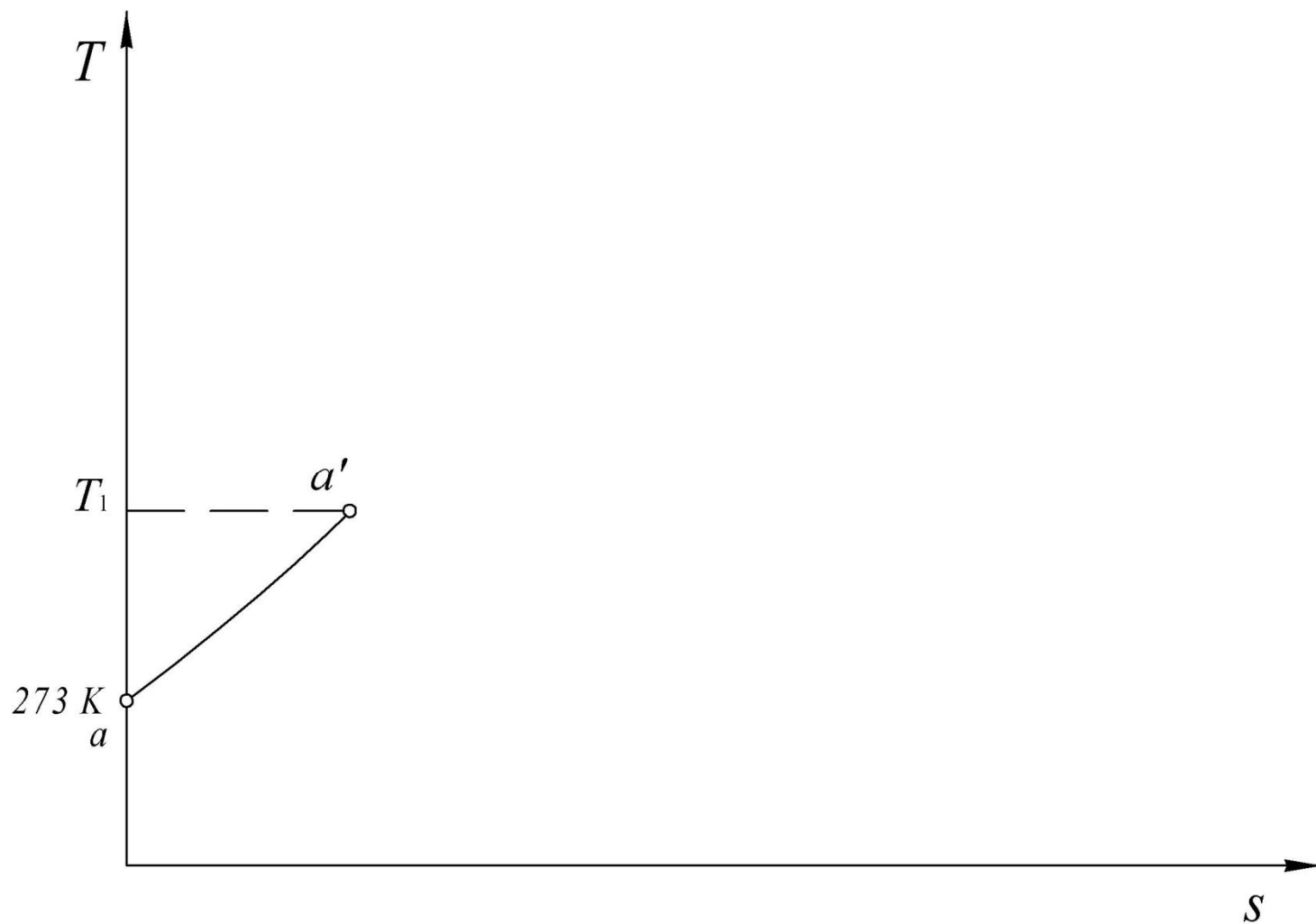


6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

$$s' = 4,19 \ln \frac{T_{\text{н}}}{273},$$

где 4,19 – удельная теплоёмкость воды, кДж/(кг·К).

6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Процесс парообразования протекает при постоянной температуре $t_{\text{н}}$, соответствующей данному давлению, и изображается горизонтальным отрезком $a'a''$.

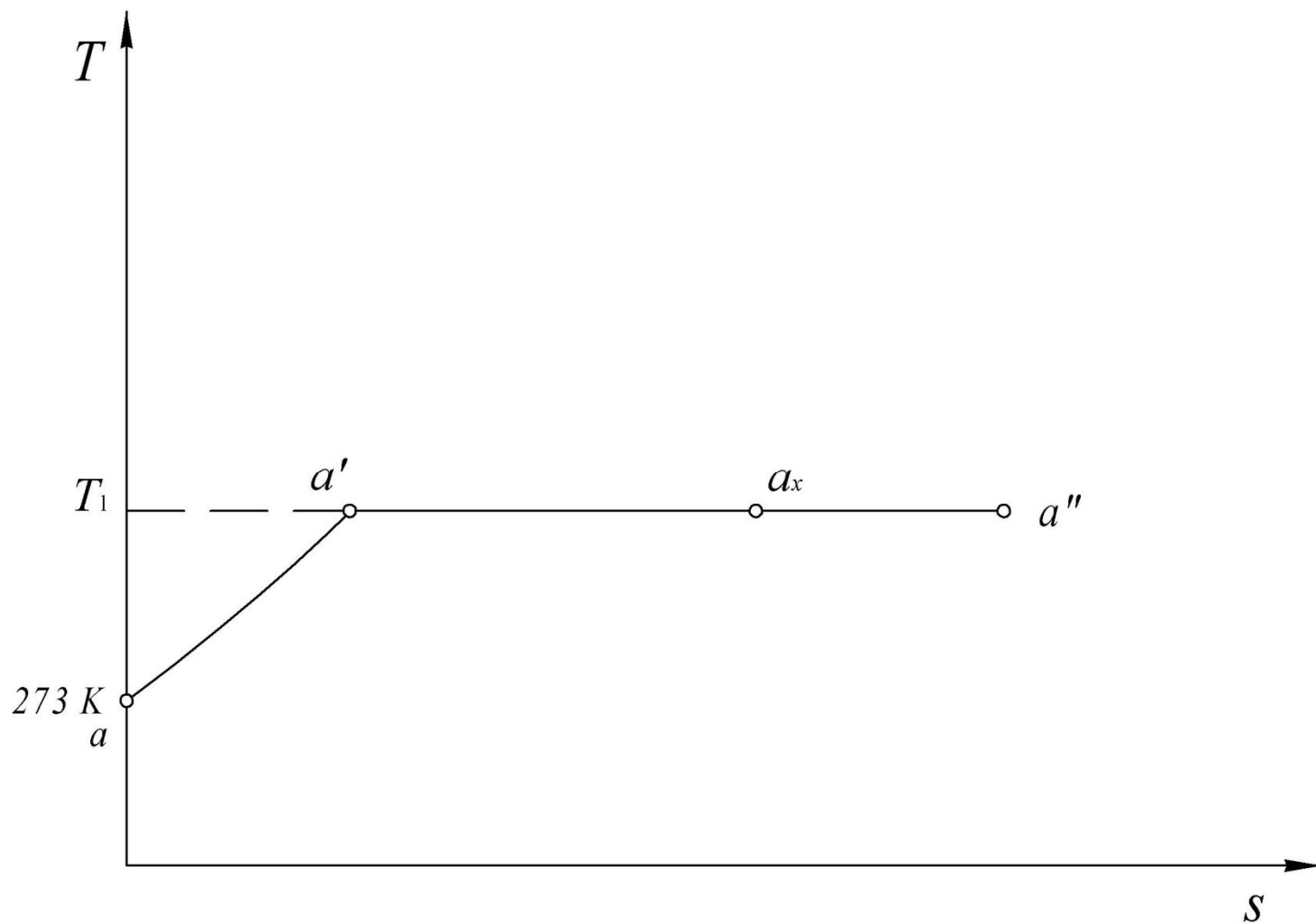
$$a'a'' = s'' - s' = \frac{r}{T_{\text{н}}},$$

где r – теплота парообразования, кДж/кг.

6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар при данном давлении называется *теплотой парообразования* и обозначается *r* .

6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме





6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Энтропия сухого насыщенного пара
определяется по формуле

6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Энтропия сухого насыщенного пара определяется по формуле

$$s'' = s' + \frac{r}{T_{\text{н}}}$$

6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Энтропия сухого насыщенного пара определяется по формуле

$$s'' = s' + \frac{r}{T_{\text{н}}} = 4,19 \ln \frac{T_{\text{н}}}{273} + \frac{r}{T_{\text{н}}}.$$

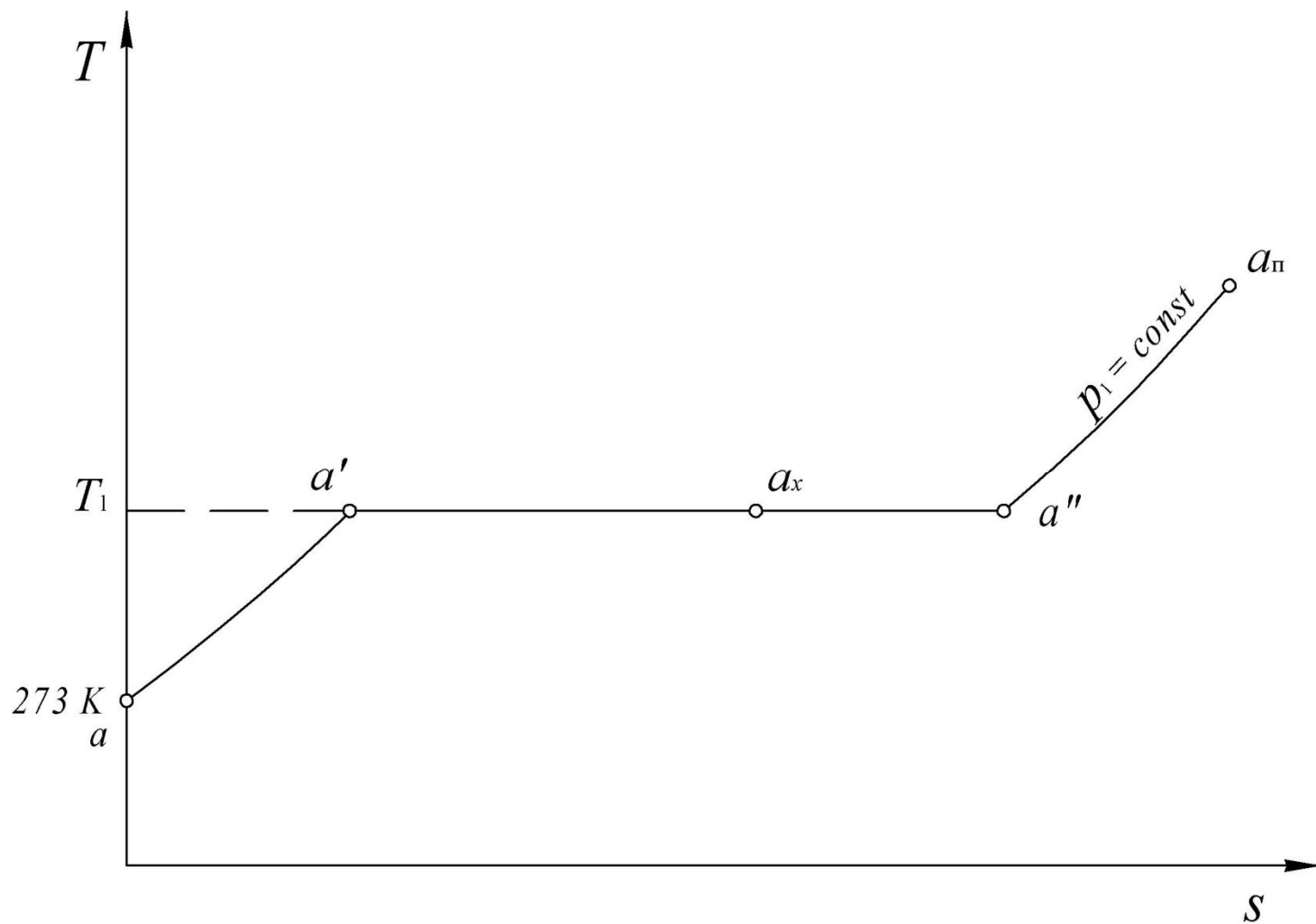
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Энтропия перегретого пара

$$s_{\text{п}} = s'' + C_{\text{ртп}} \ln \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{н}}},$$

где $C_{\text{ртп}}$ – средняя удельная изобарная теплоёмкость водяного пара, кДж/(кг·К).

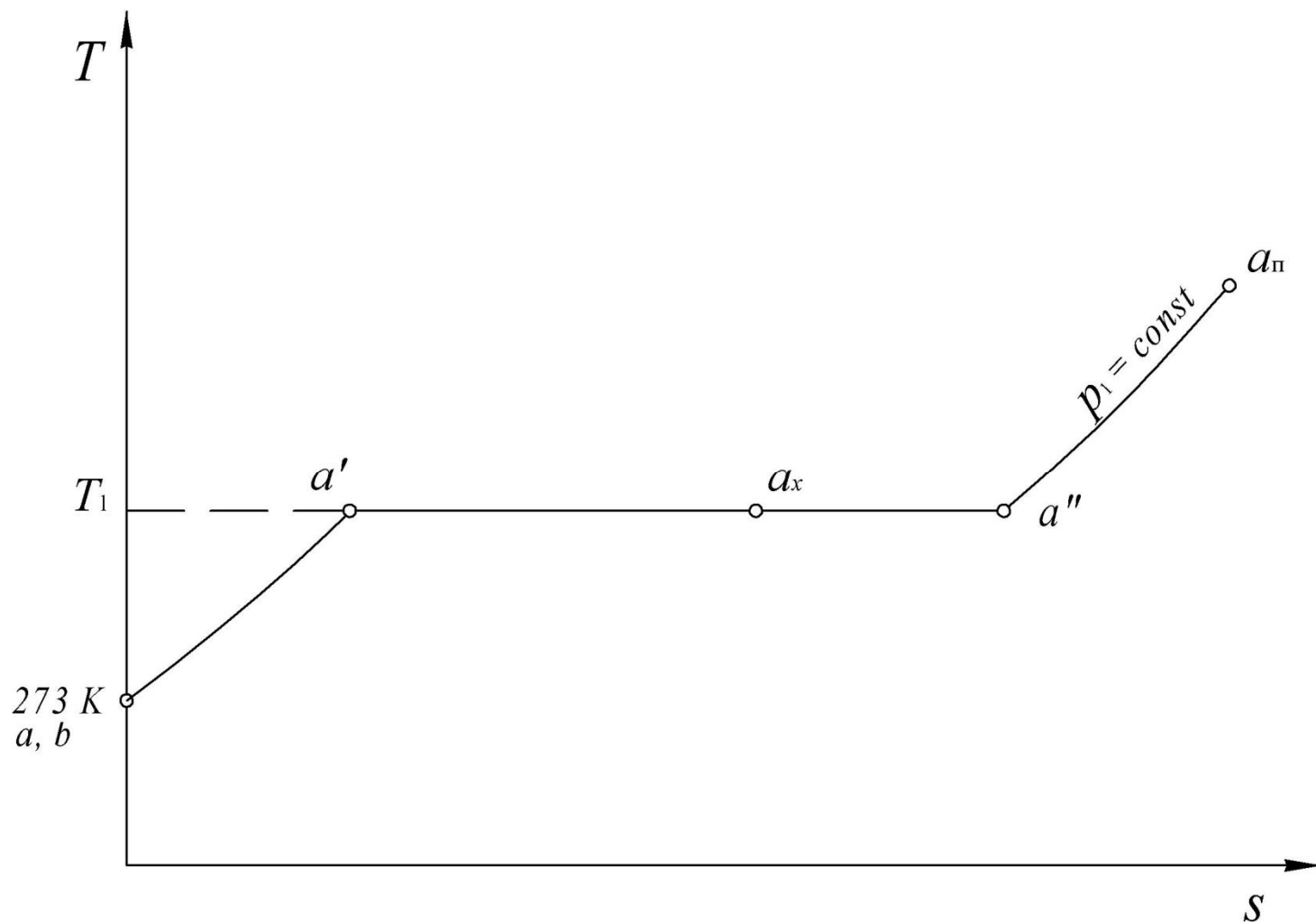
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



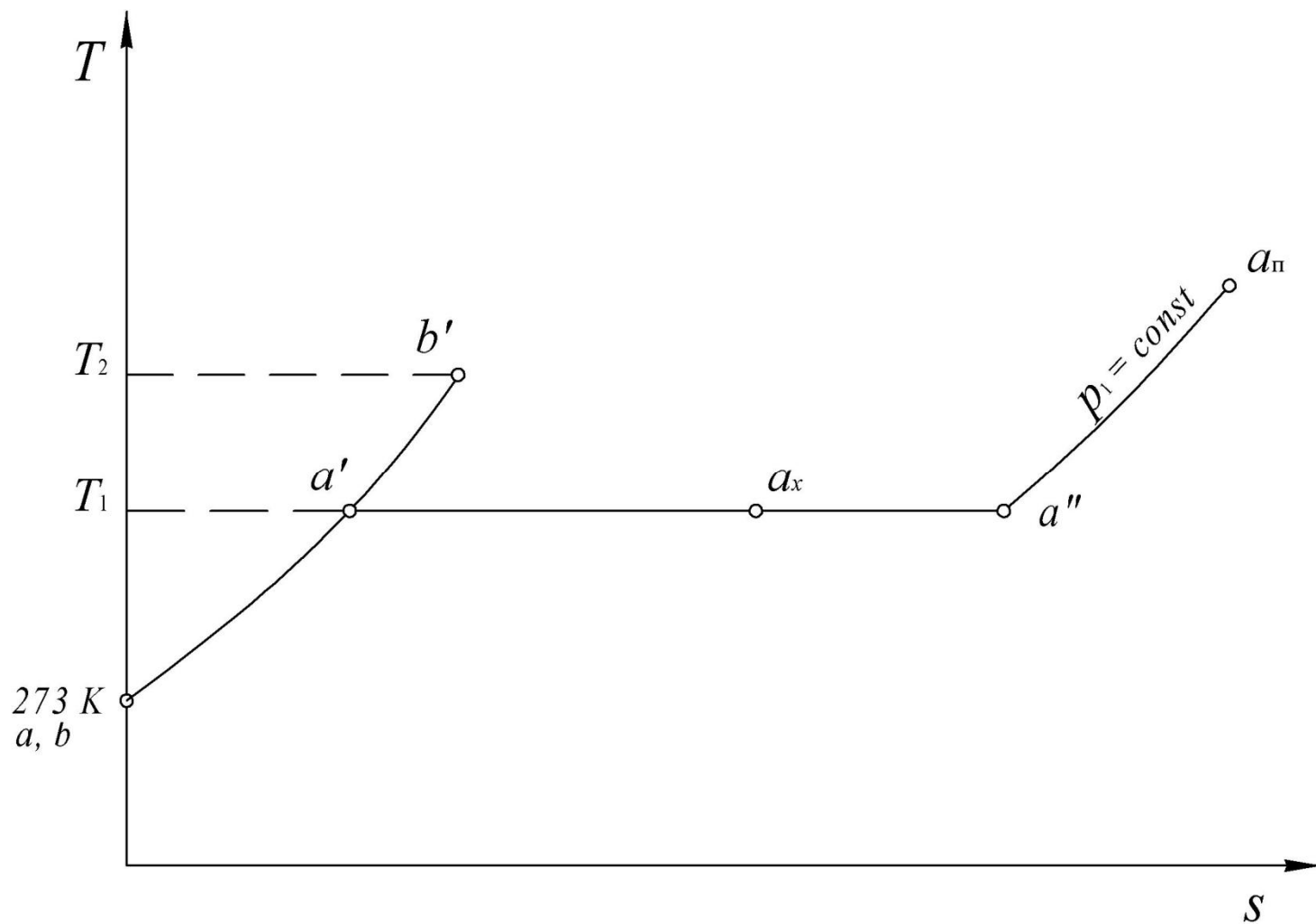
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг сухого насыщенного пара в перегретый пар с требуемой температурой при постоянном давлении, называется *теплотой перегрева* и обозначается q_{II} .

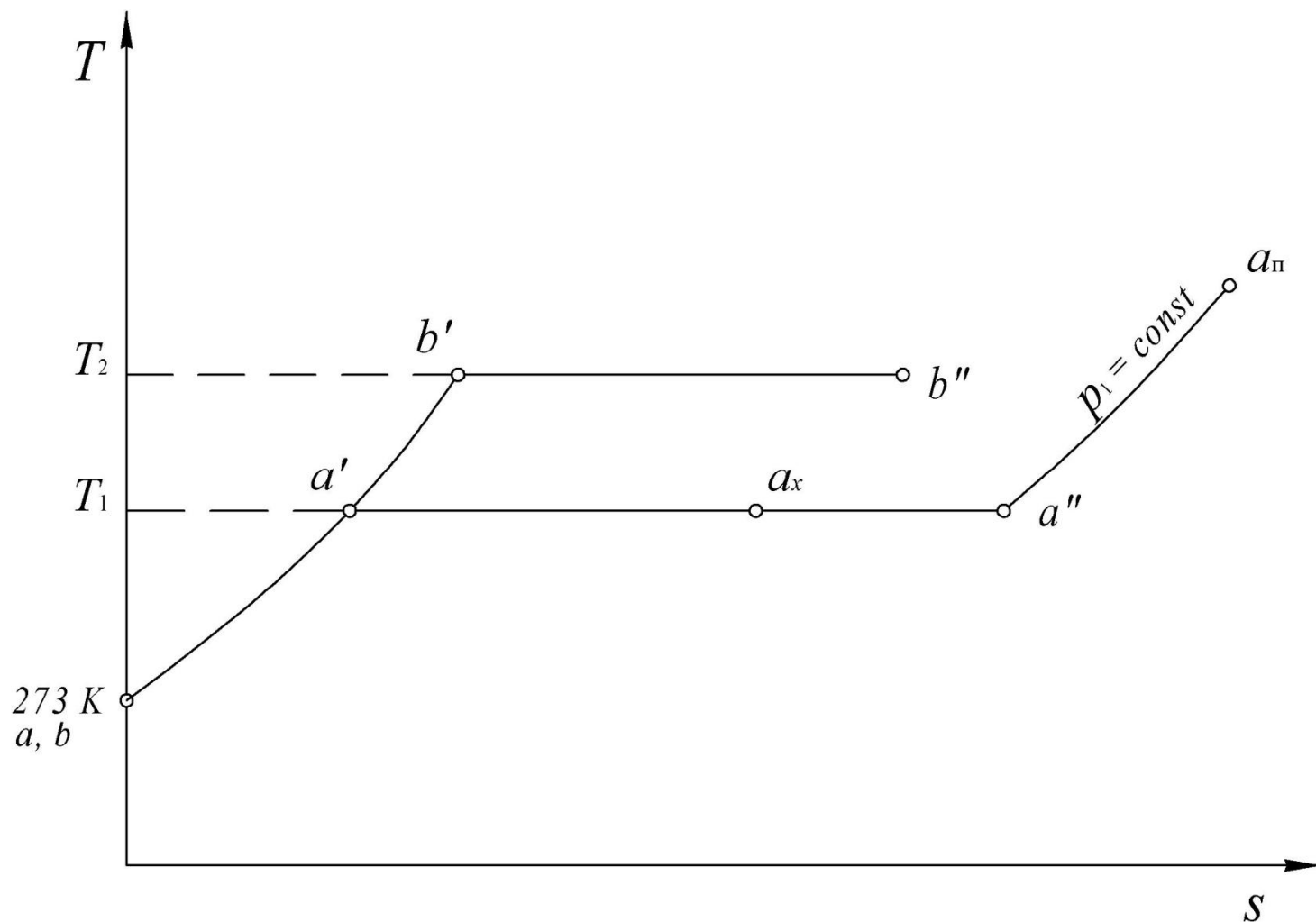
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



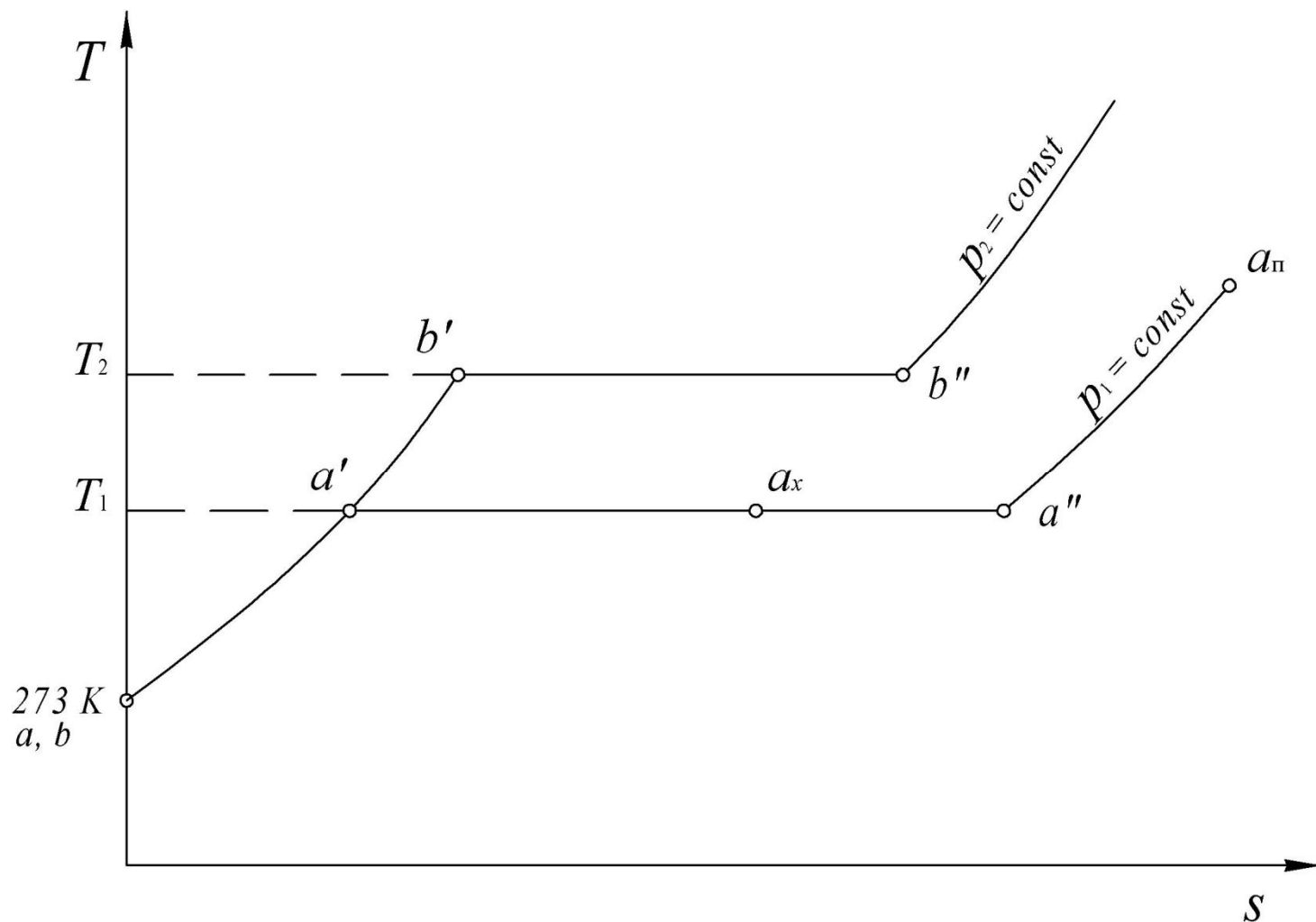
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



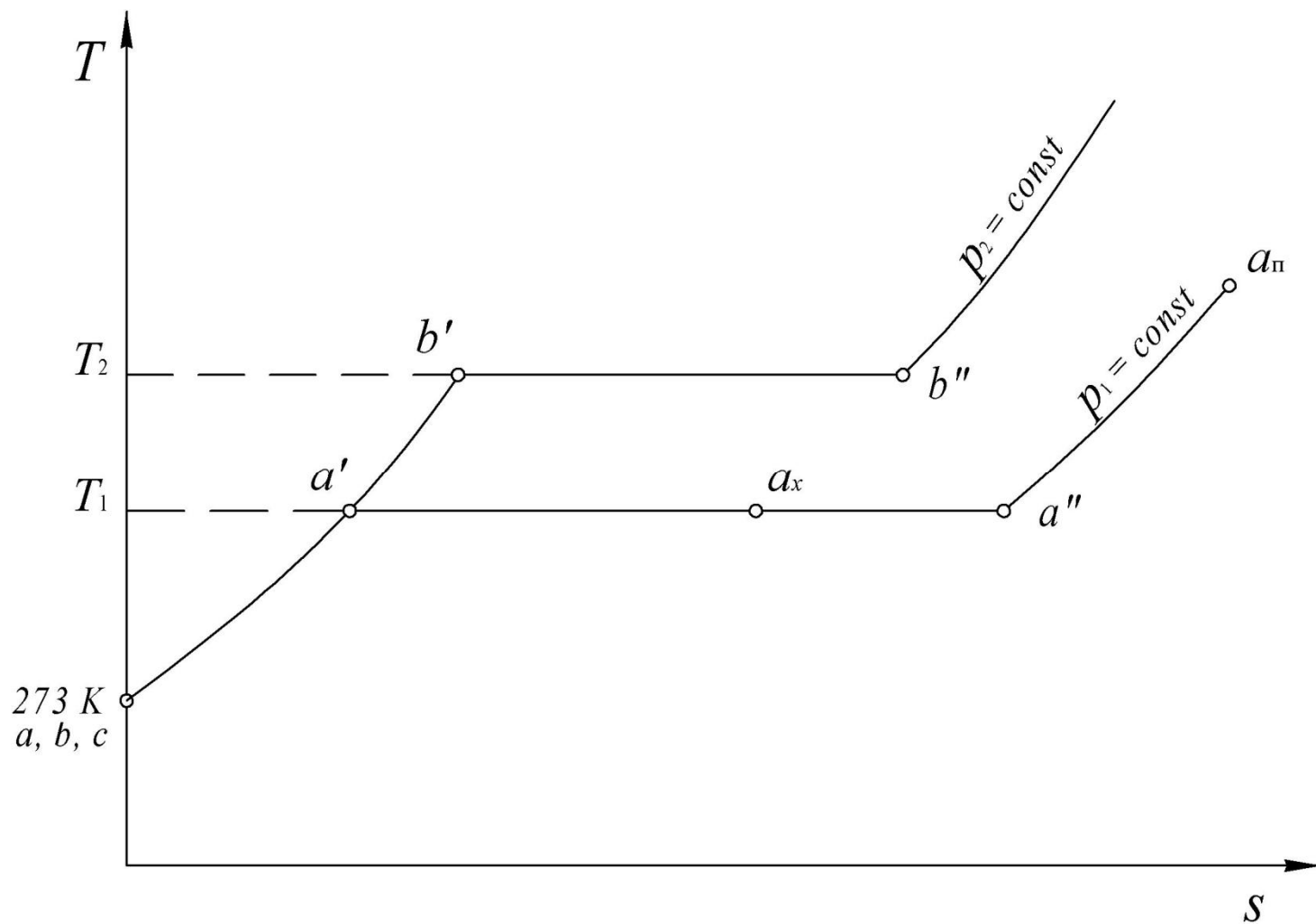
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



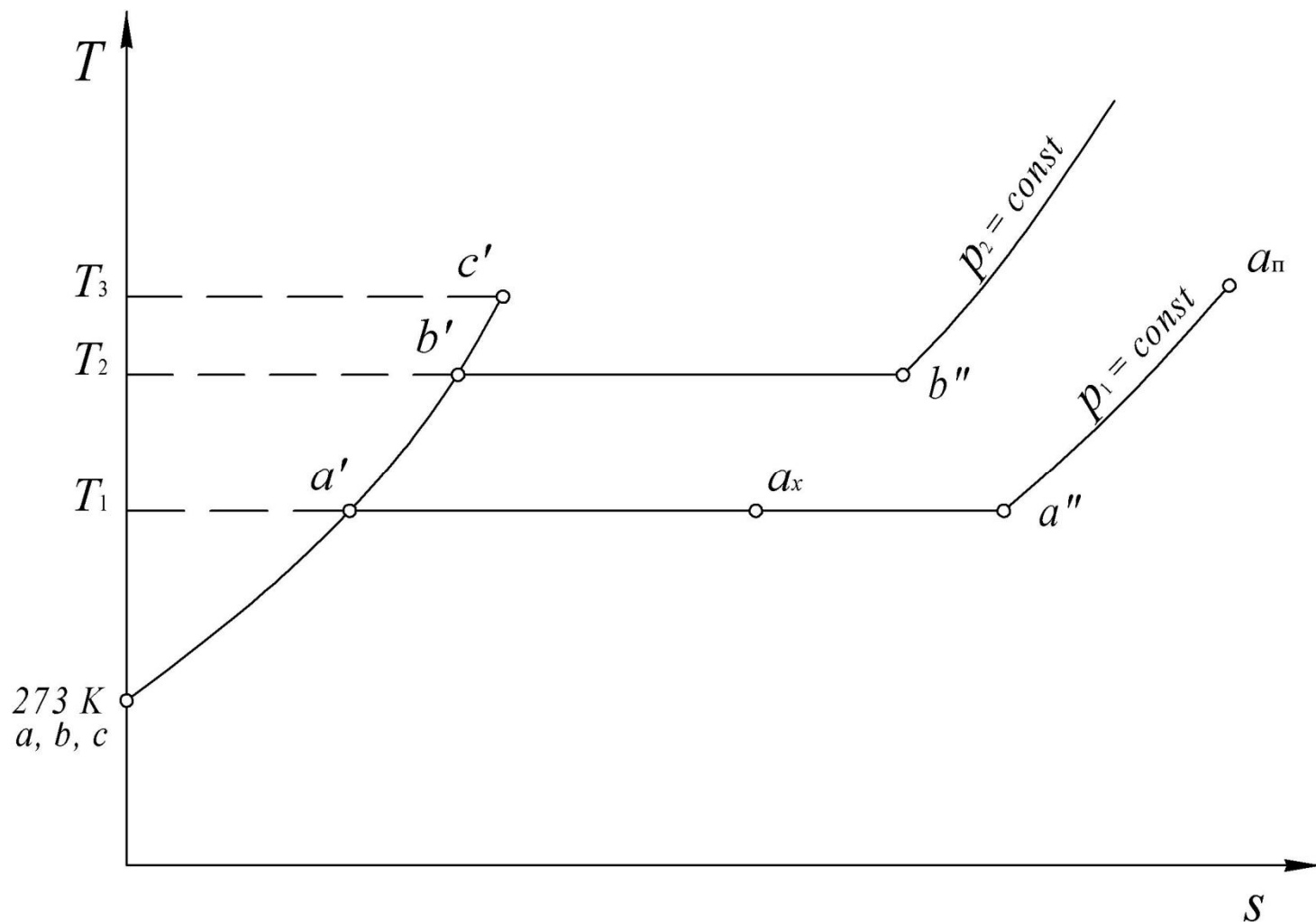
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



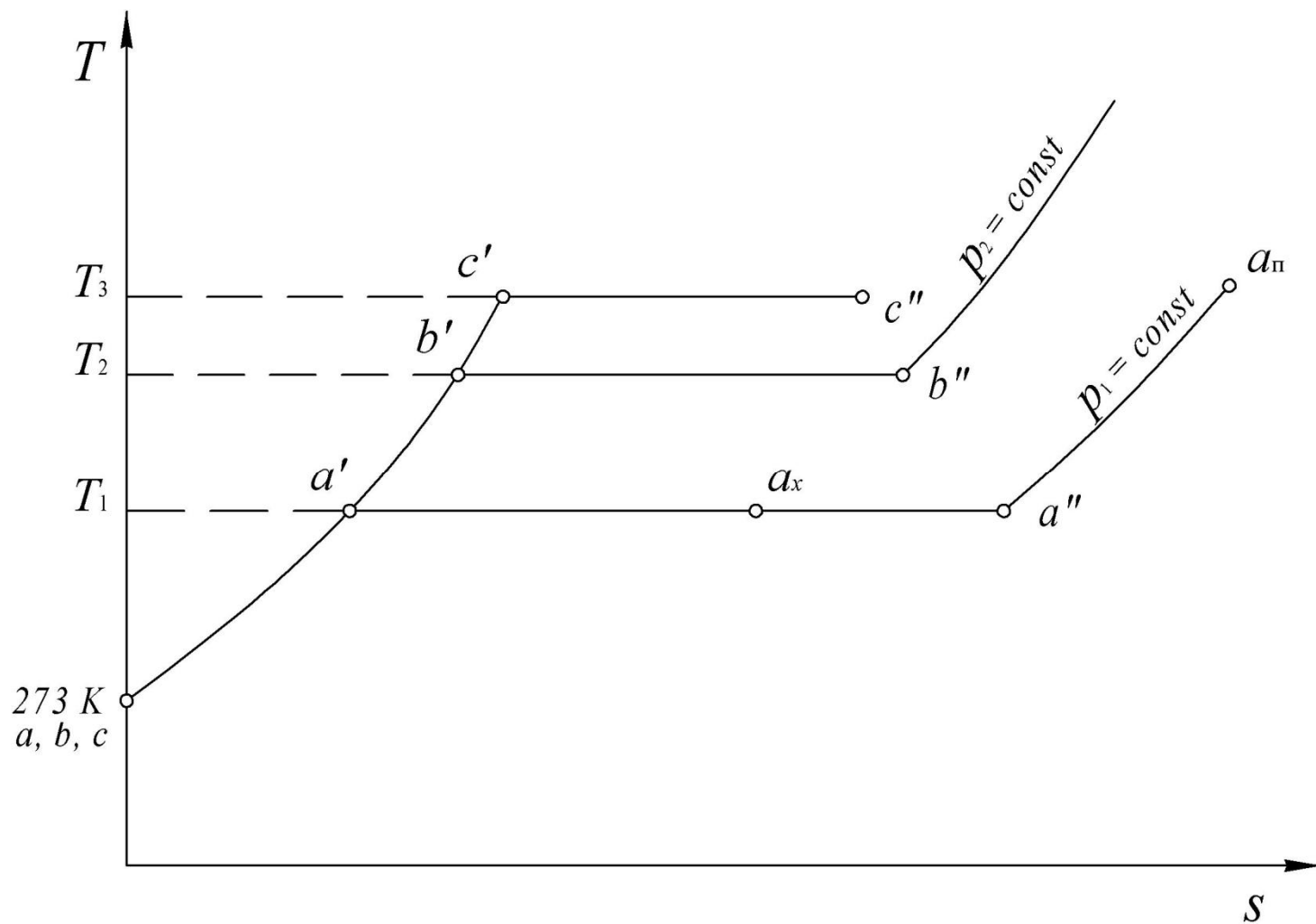
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



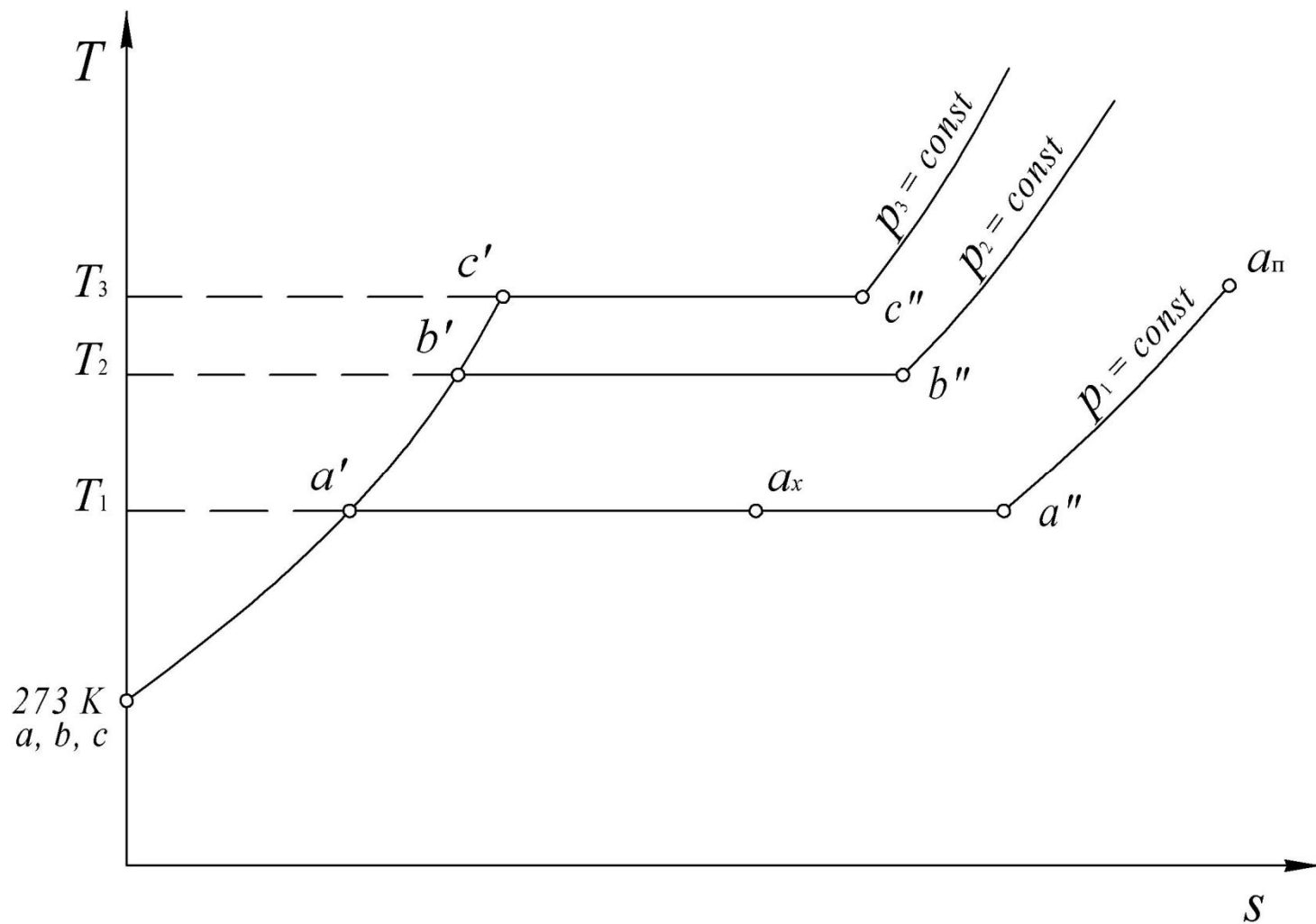
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



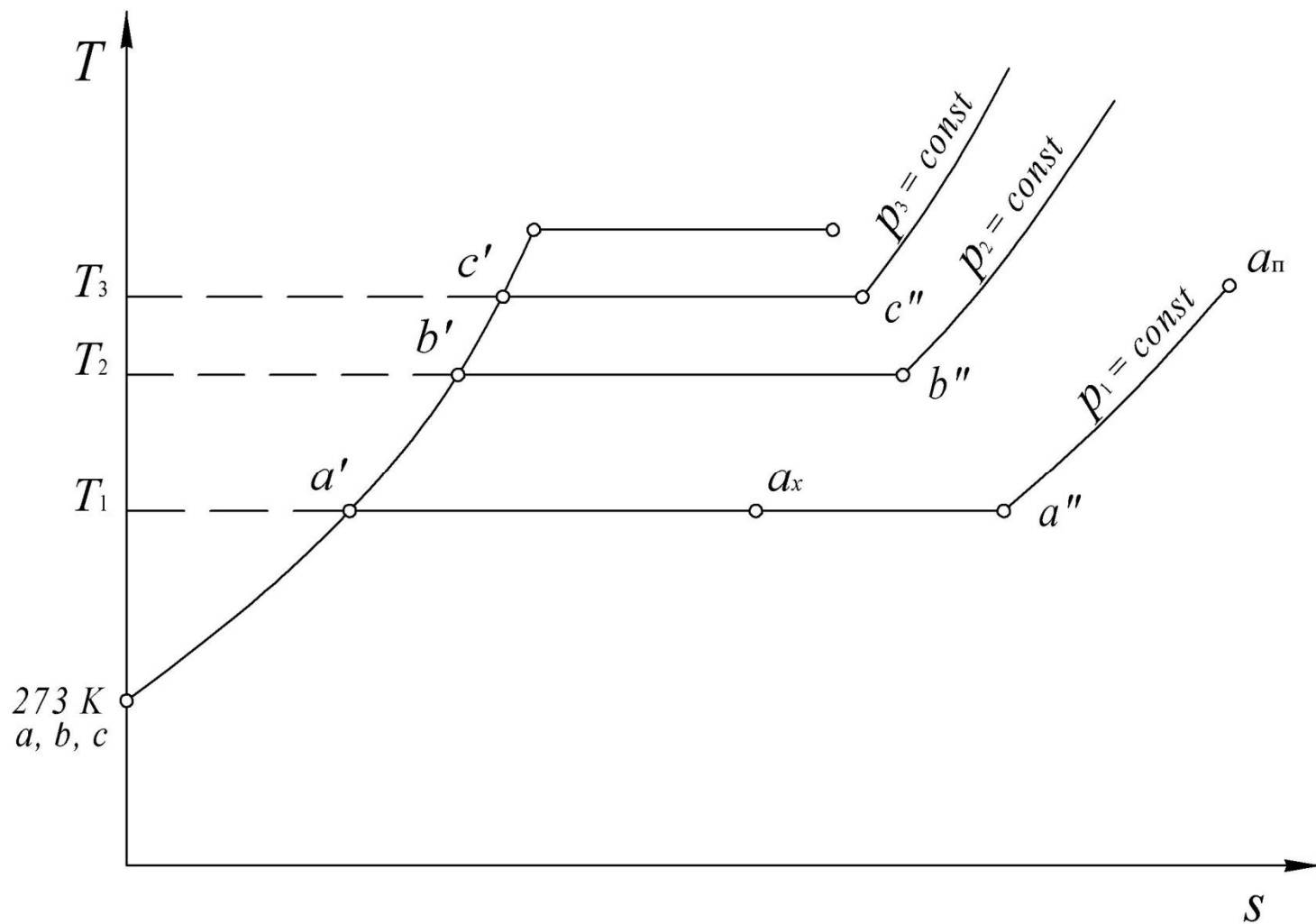
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



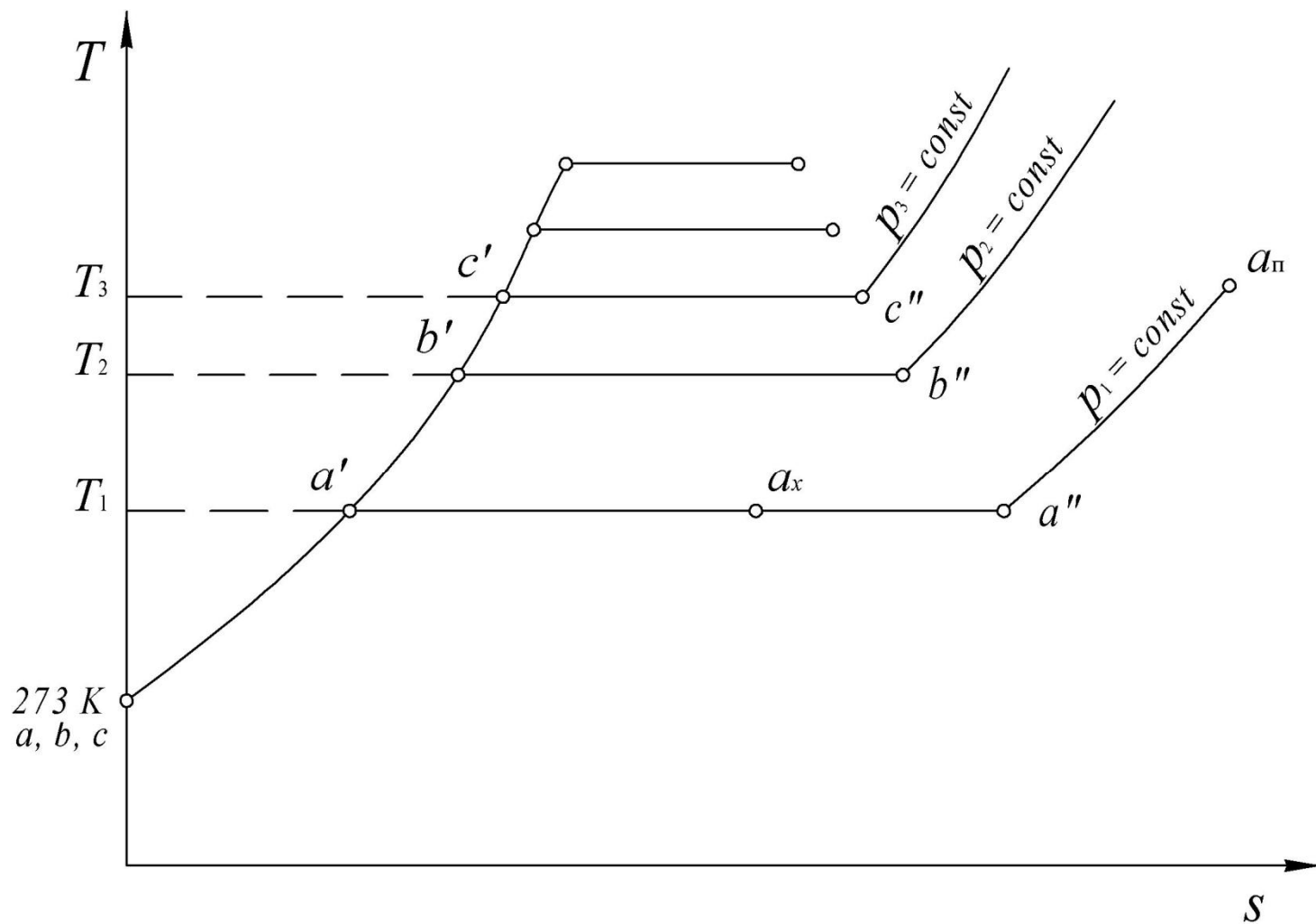
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



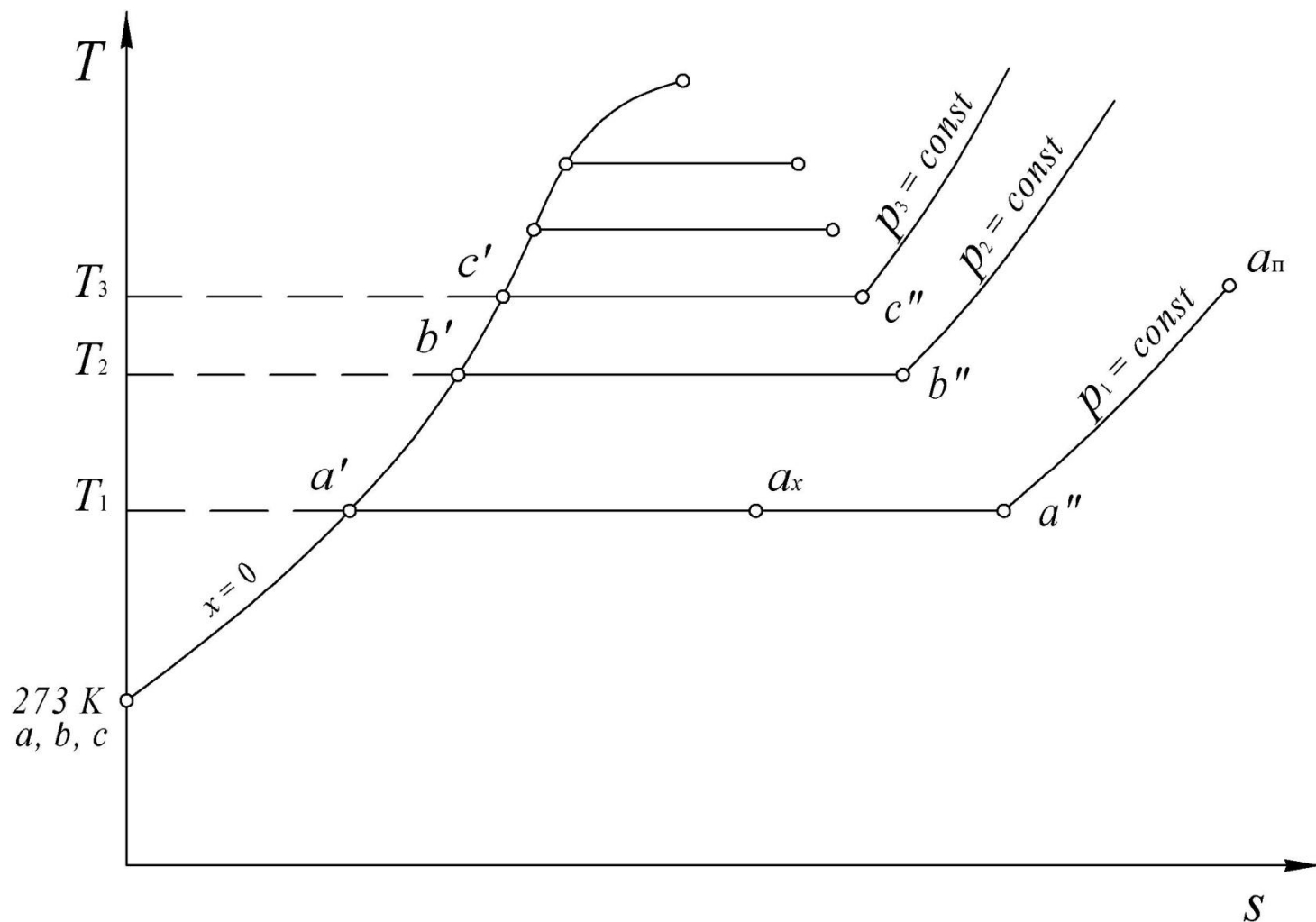
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



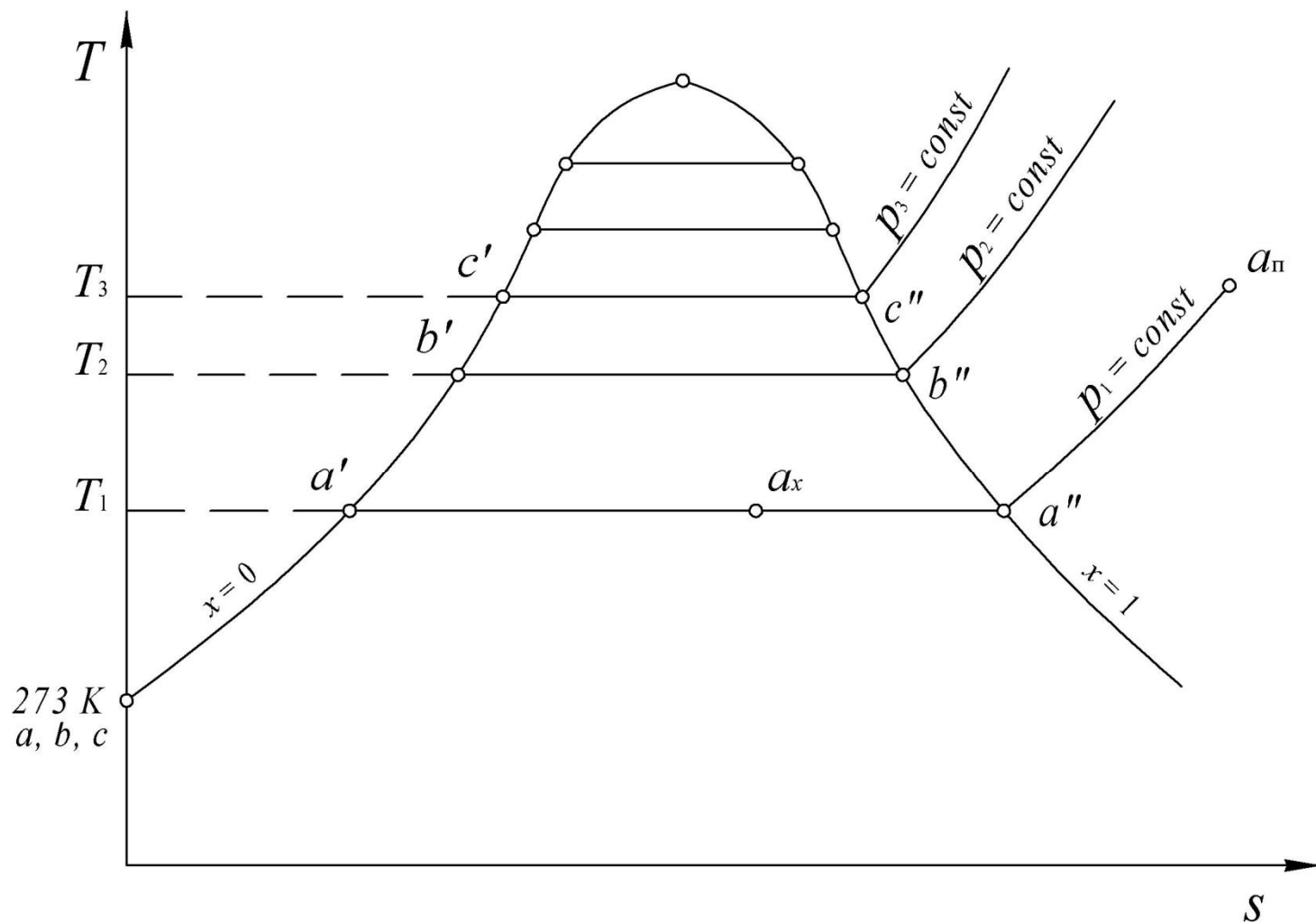
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



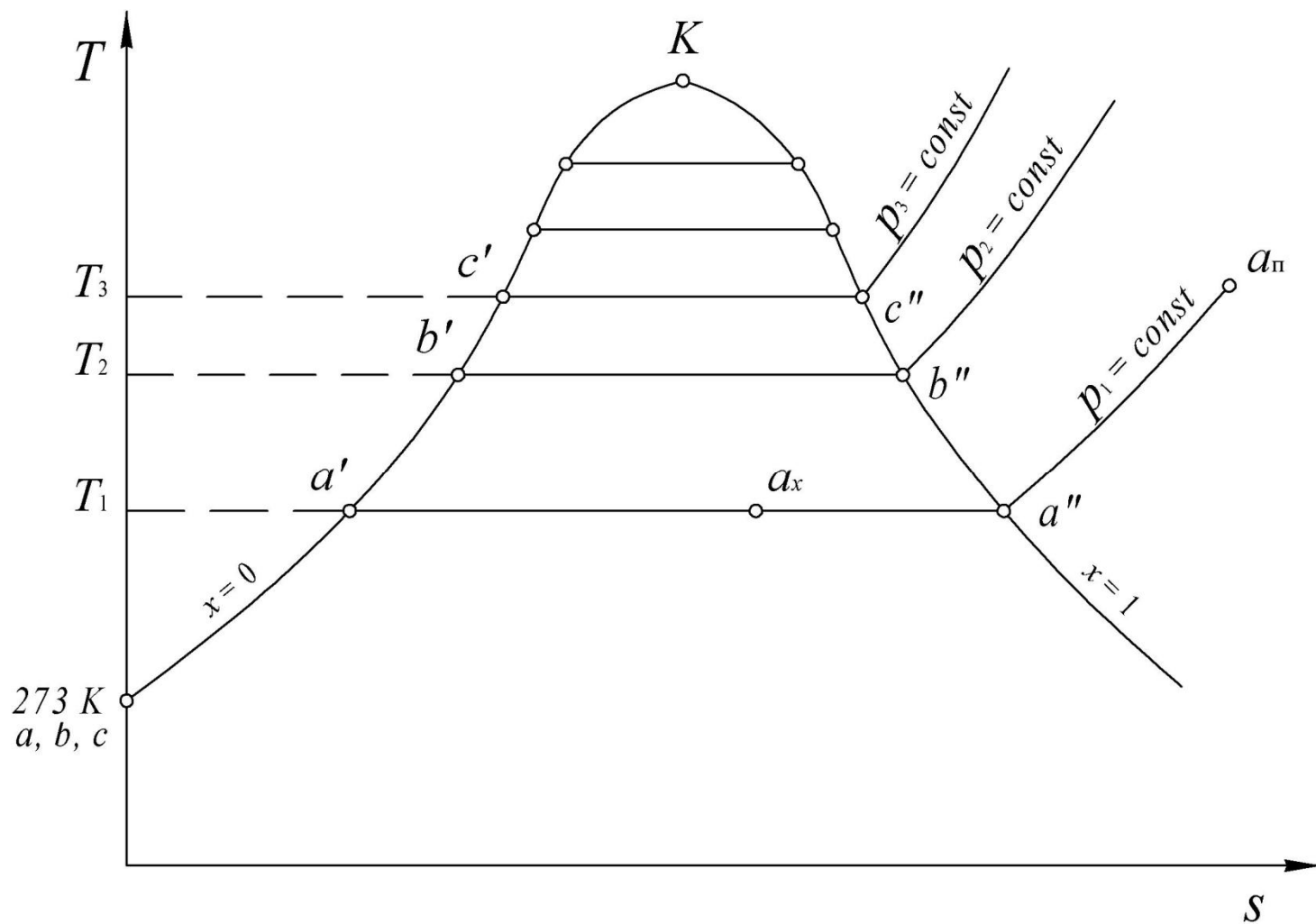
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



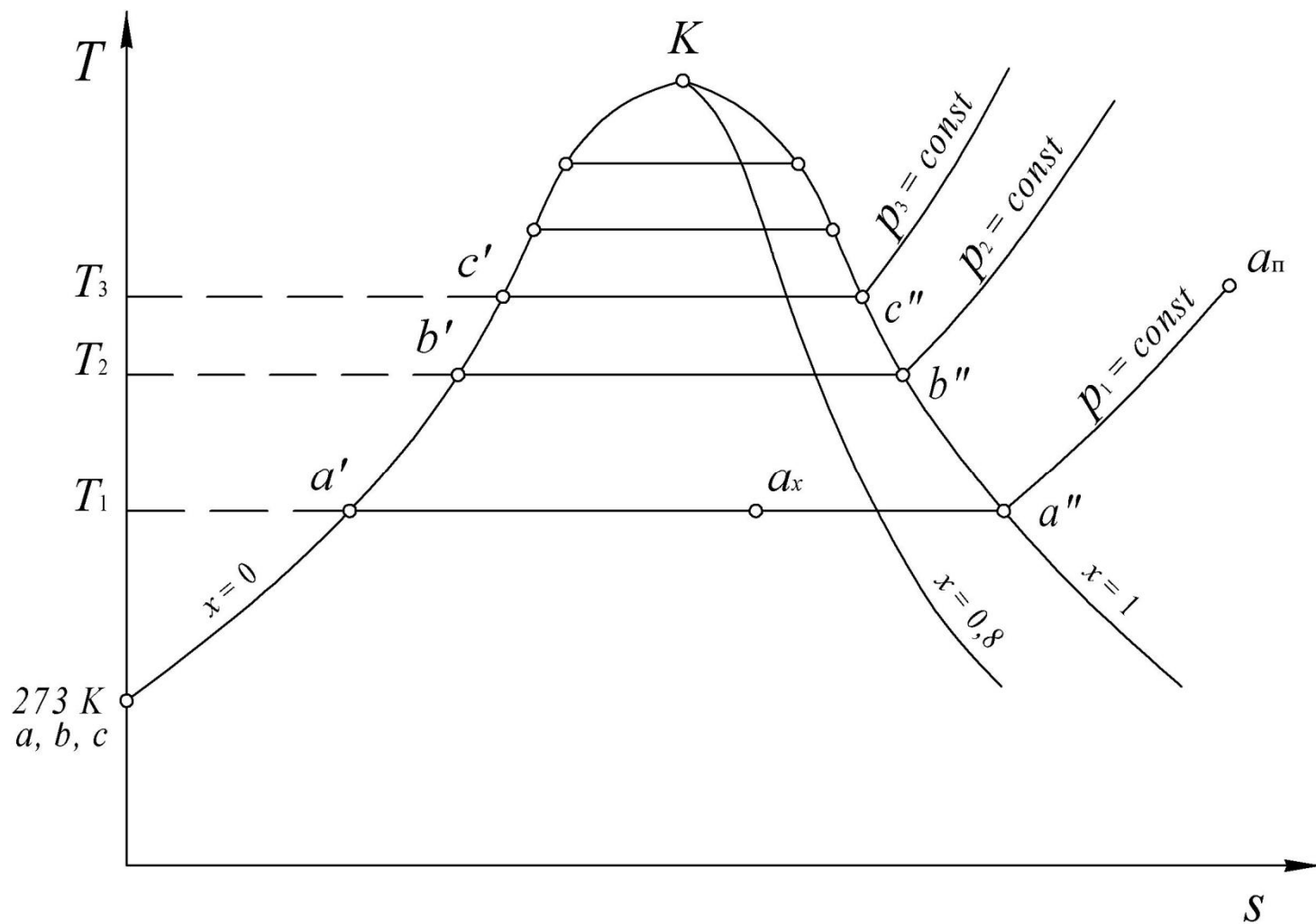
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



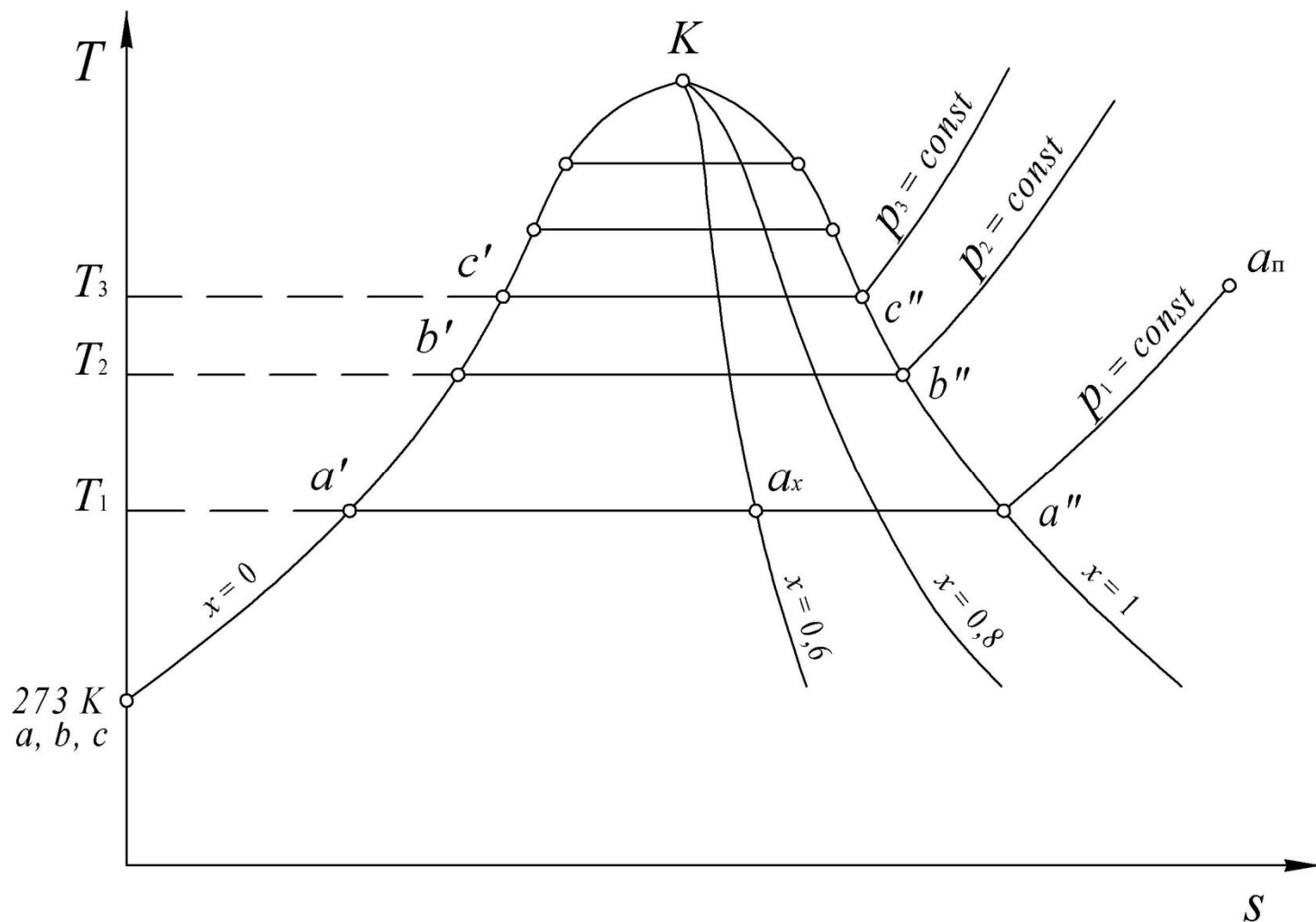
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



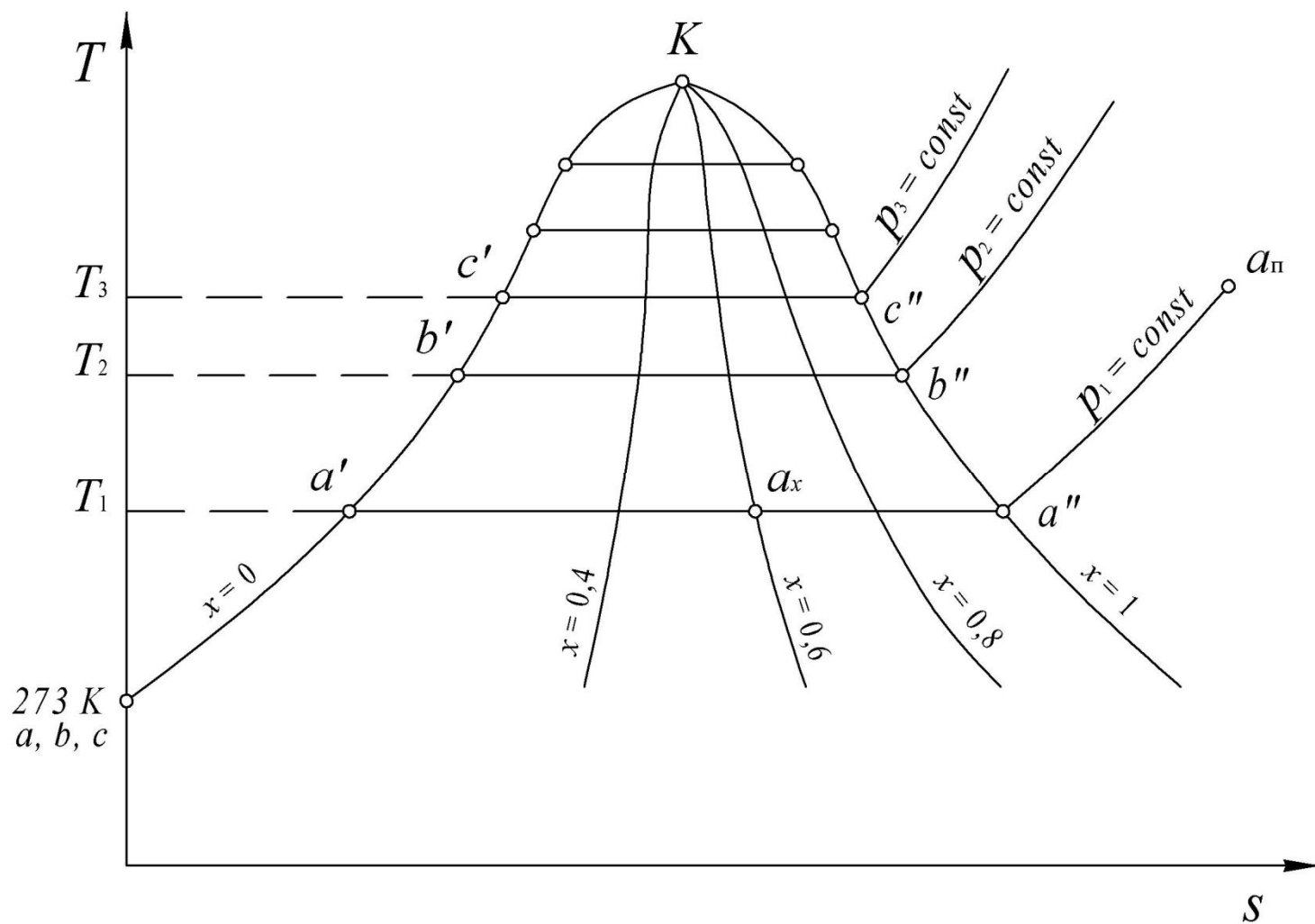
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



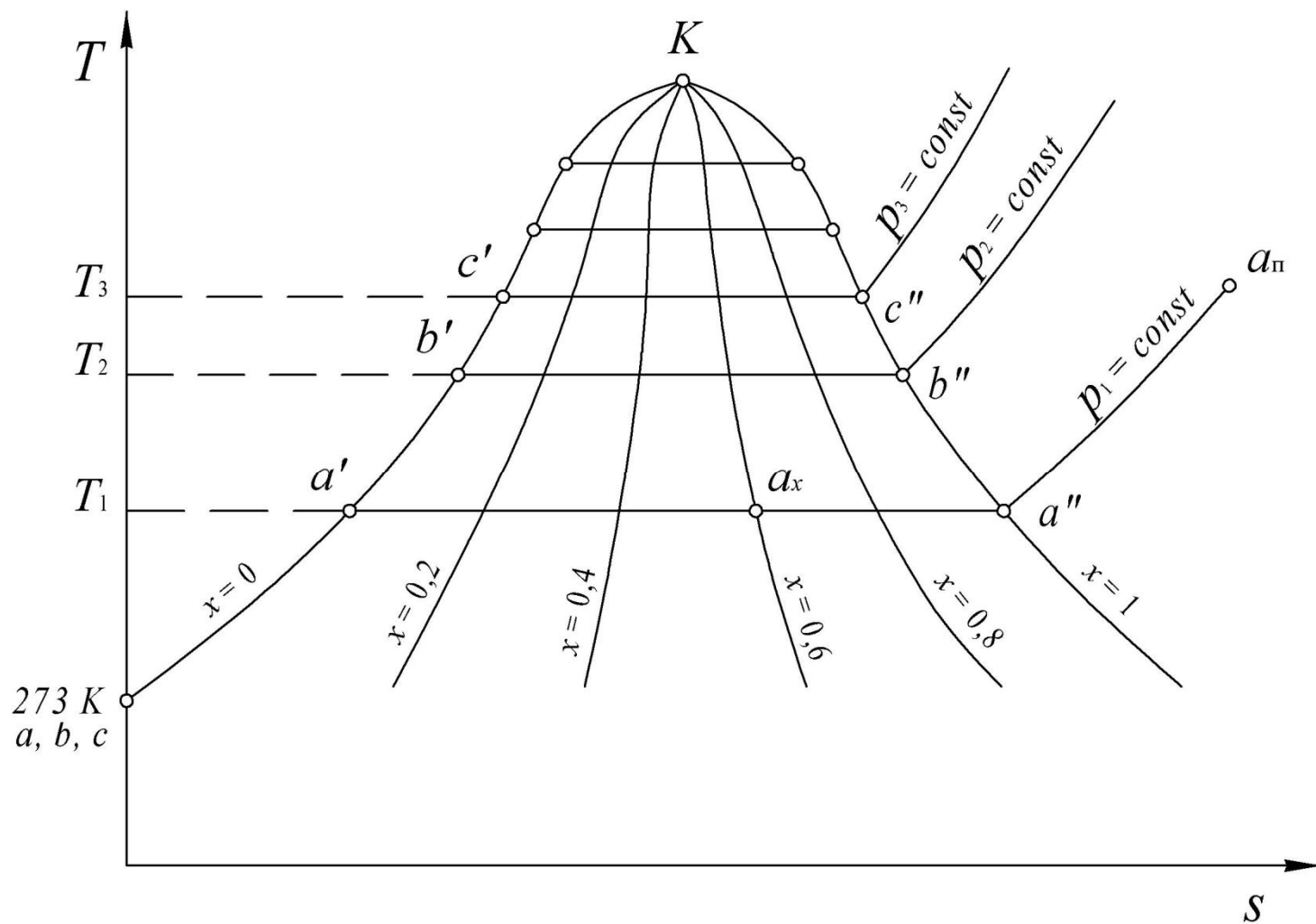
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



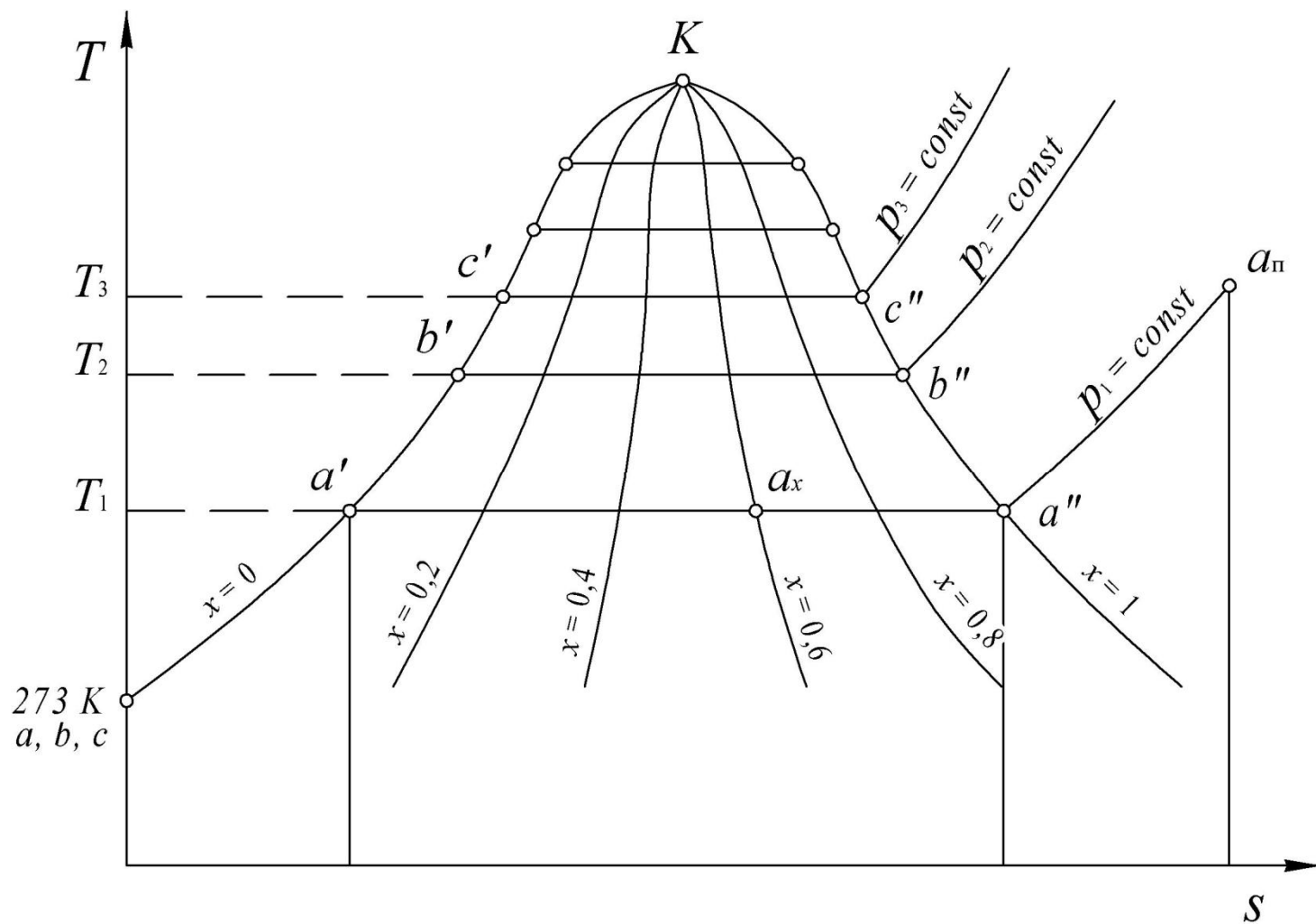
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

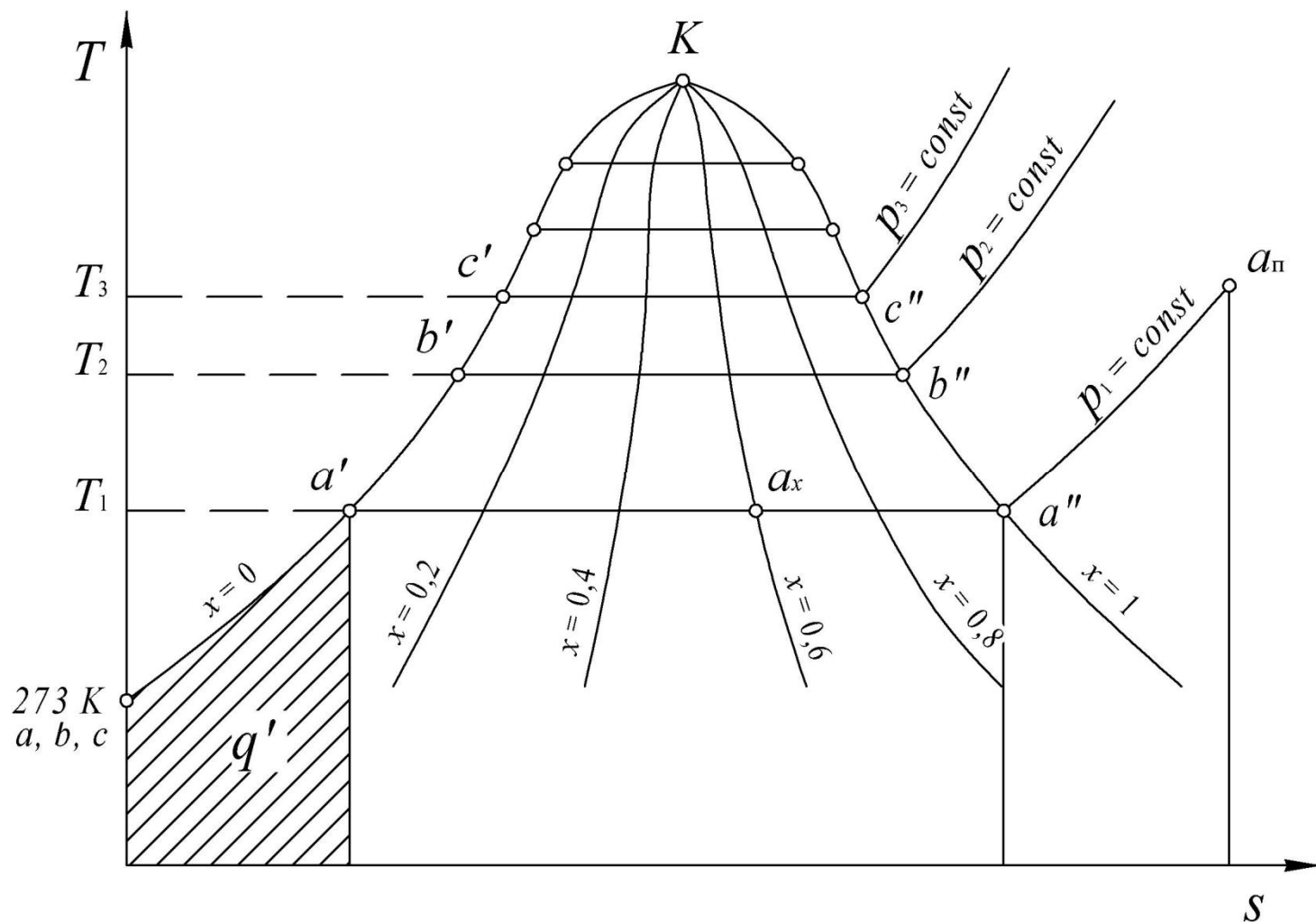


6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

Количество теплоты, подводимой в процессе к 1 кг воды или водяного пара, равно площади под линией данного процесса.

Поэтому в Ts -диаграмме площадь под линией $a-a'$ равна теплоте жидкости q' .

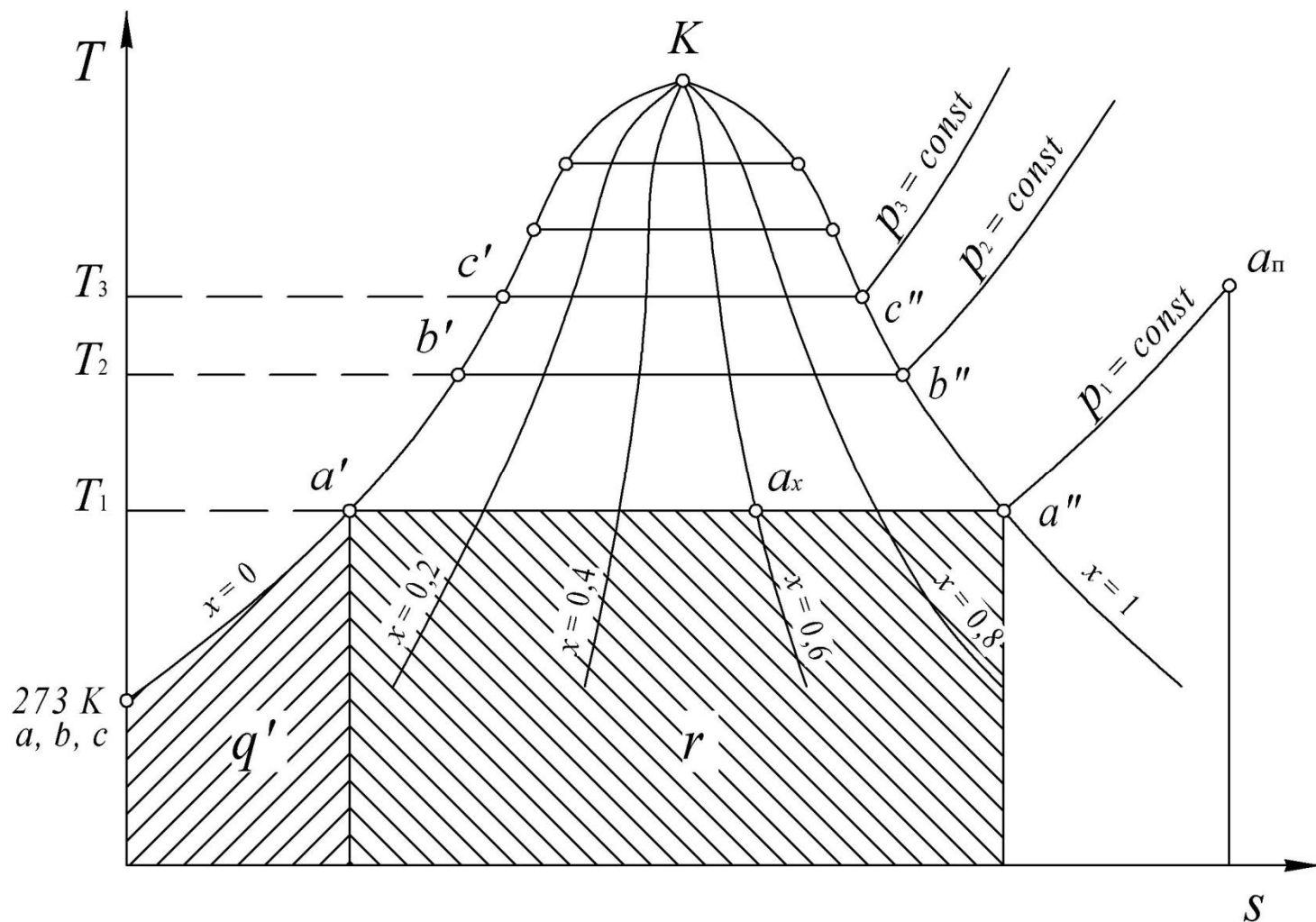
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

площадь под линией $a'-a''$ — теплоте парообразования r ,

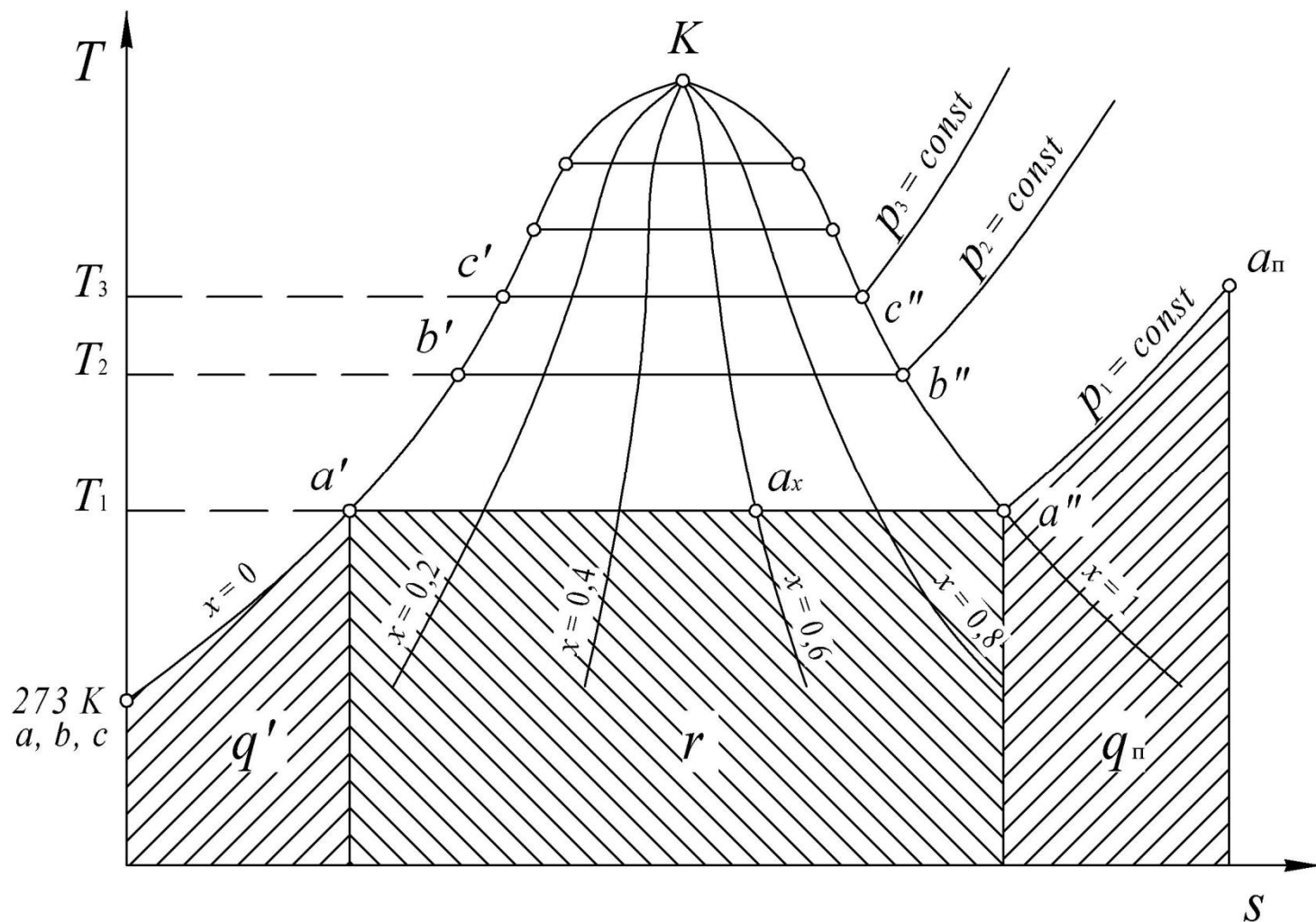
6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме

а площадь под линией процесса $a''-a_{\text{II}}$ – теплоте перегрева пара q_{II} .


6.4. Процесс парообразования в Ts -диаграмме



6.5. Процесс парообразования в hs -диаграмме

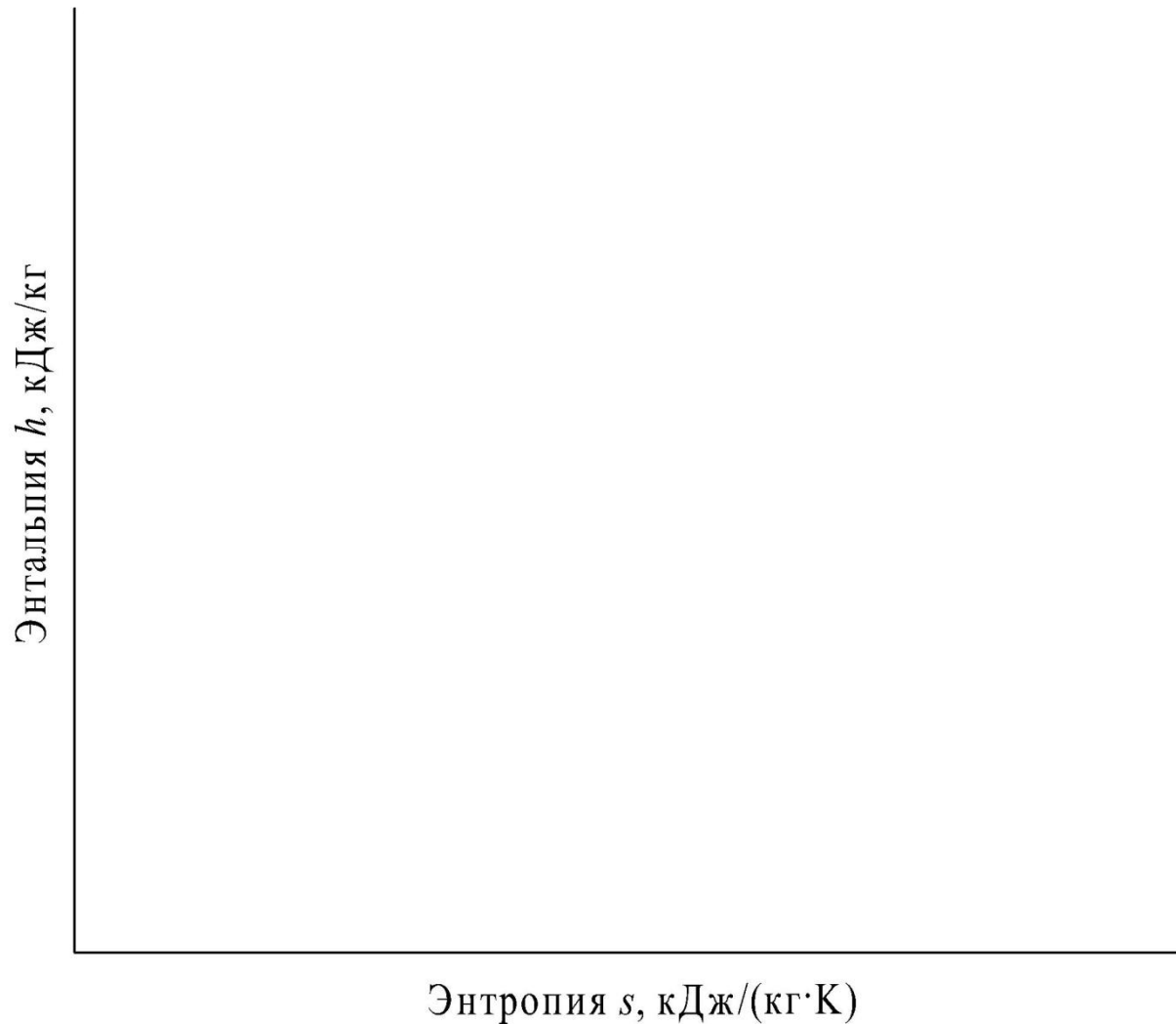
В 1904 г. Рихард Мольте предложил использовать для определения параметров водяного пара hs -диаграмму, составленную им для интервала давлений от 0,001 до 30 МПа и температур от 20 до 700° С.

Преимуществом hs -диаграммы по сравнению с Ts -диаграммой является то, что количество теплоты, участвующей в различных изобарных процессах, в ней изображается отрезками линий, а не площадями, как в Ts -диаграмме.

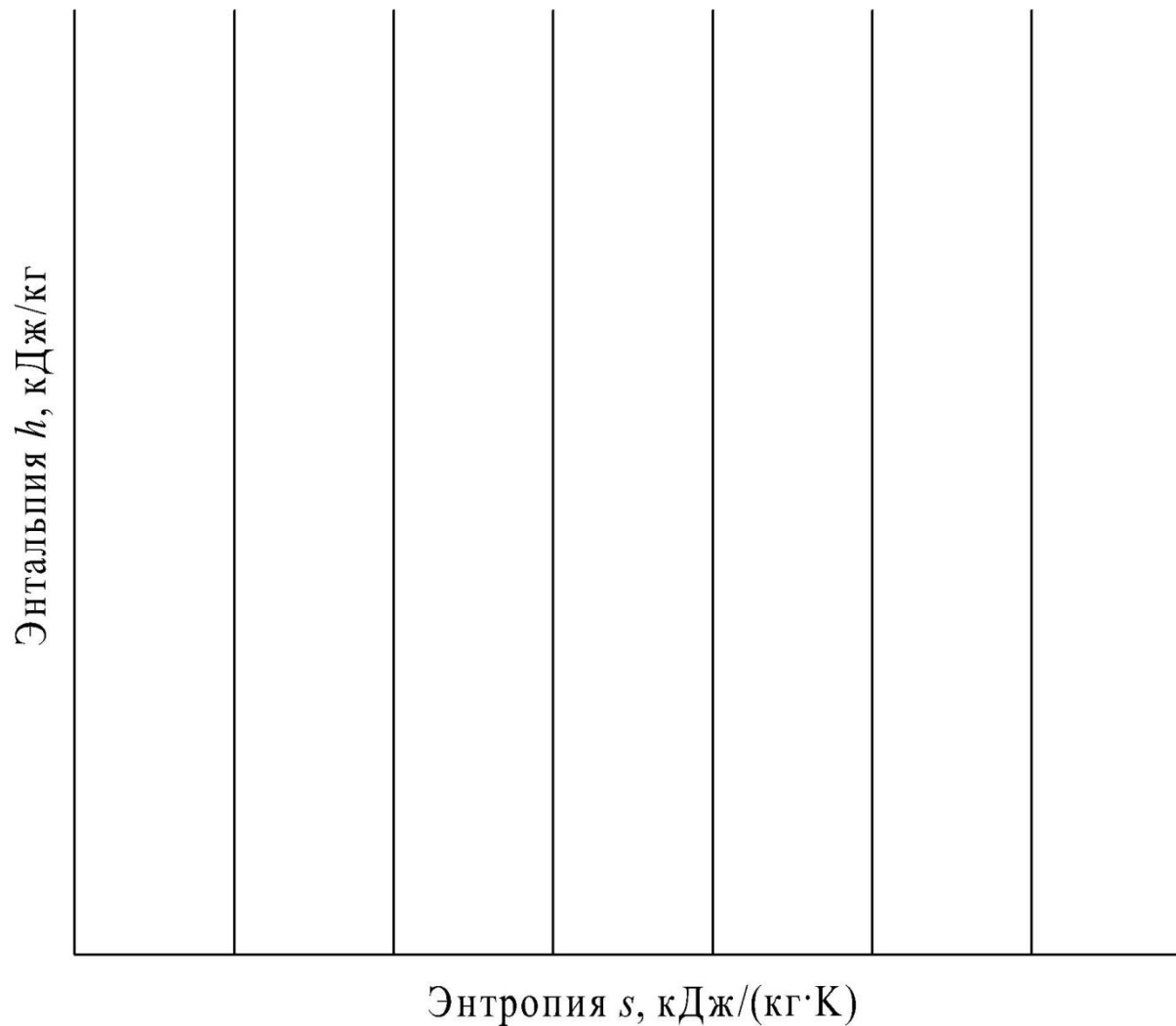


Кроме того, hs -диаграмма водяного пара позволяет определять основные параметры пара – энтальпию, энтропию, температуру, удельный объём, степень сухости и давление графическим способом без применения формул и таблиц.

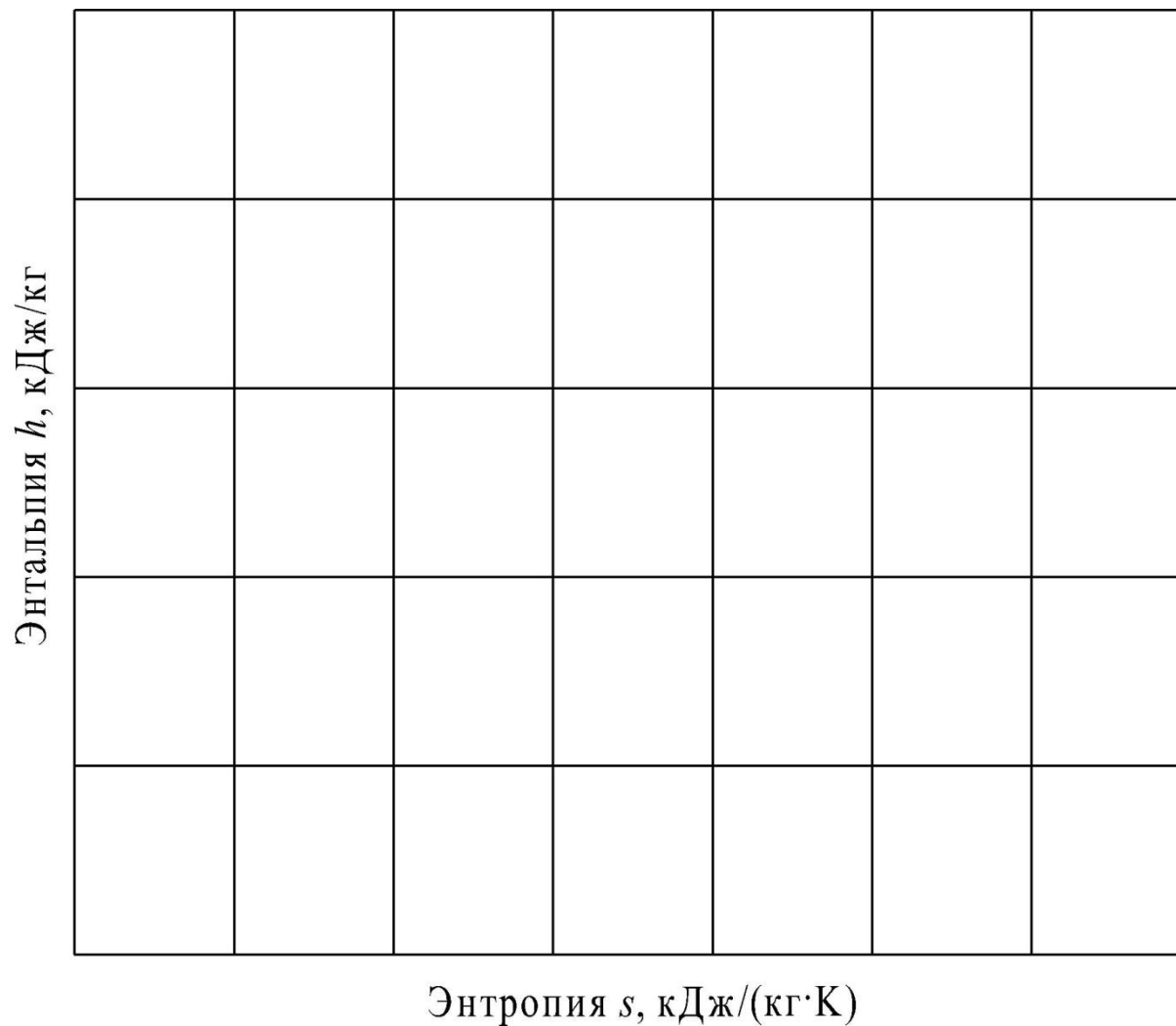
hs -диаграмма водяного пара



hs -диаграмма водяного пара



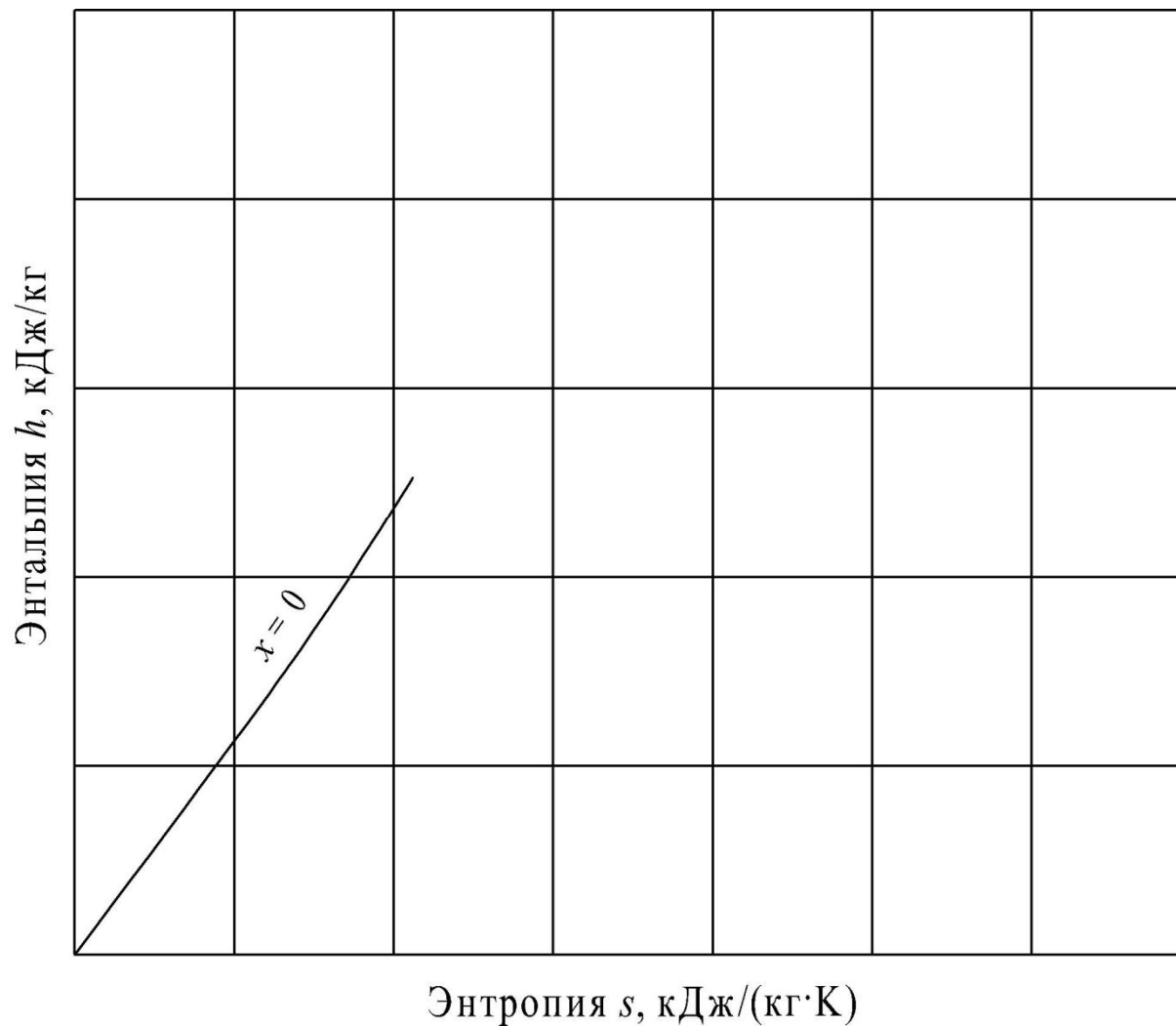
hs -диаграмма водяного пара



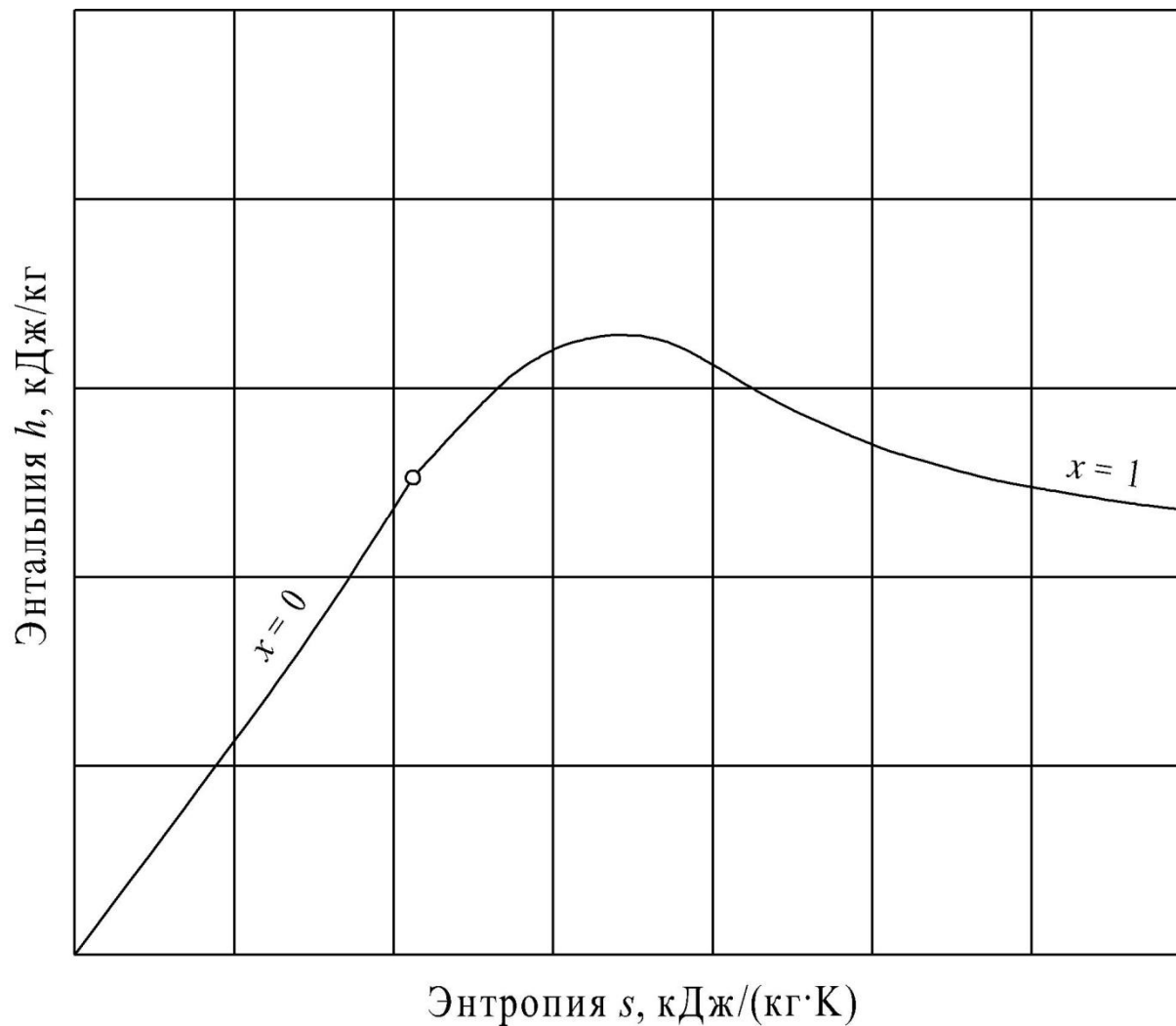
hs-диаграмма водяного пара

За начало координат принято состояние воды в тройной точке ($T = 273,16$ К, $p = 611$ Па), в которой $s_0 = 0$ и $h_0 = 0$, и откуда выходит нижняя пограничная кривая.

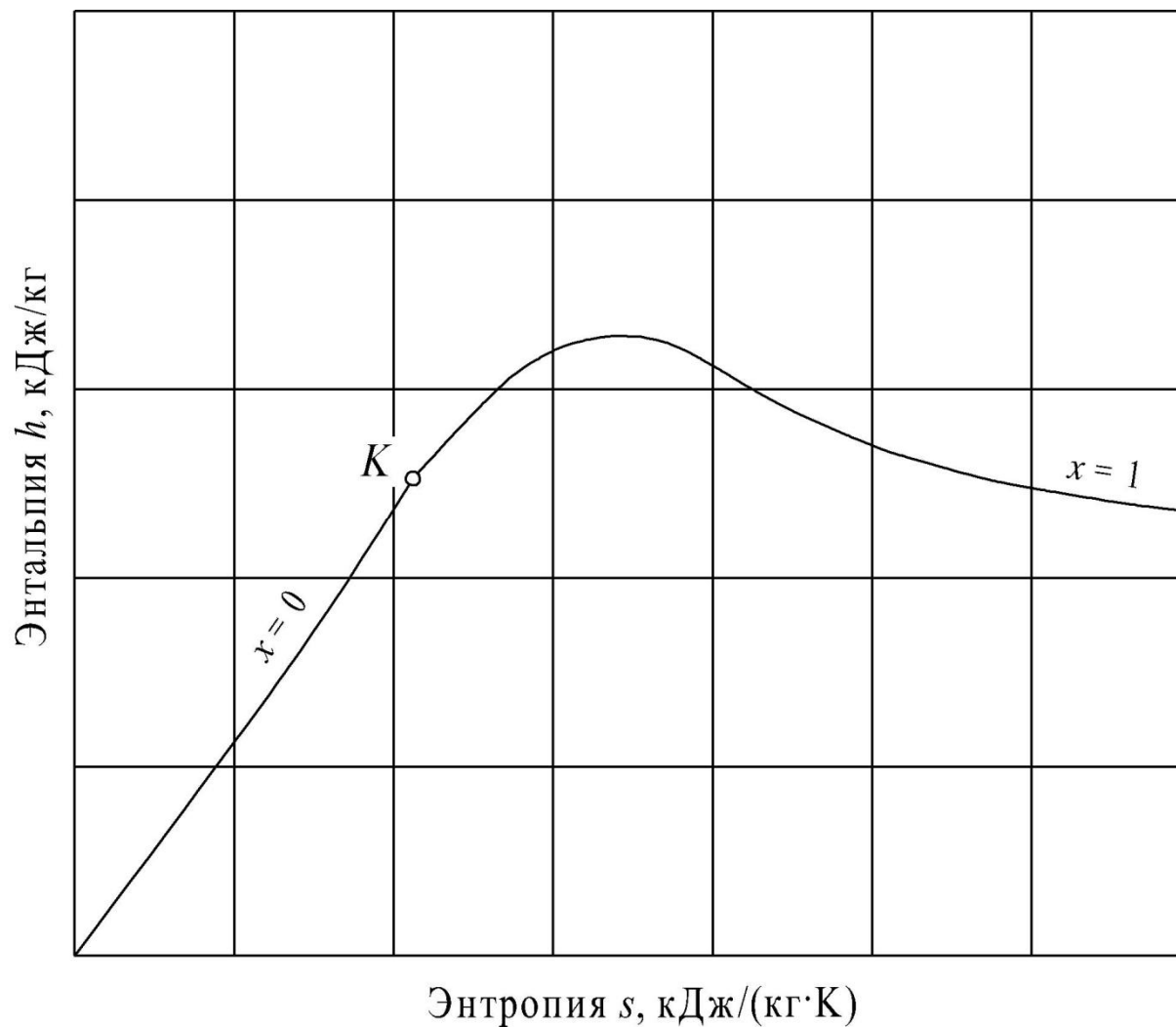
hs -диаграмма водяного пара



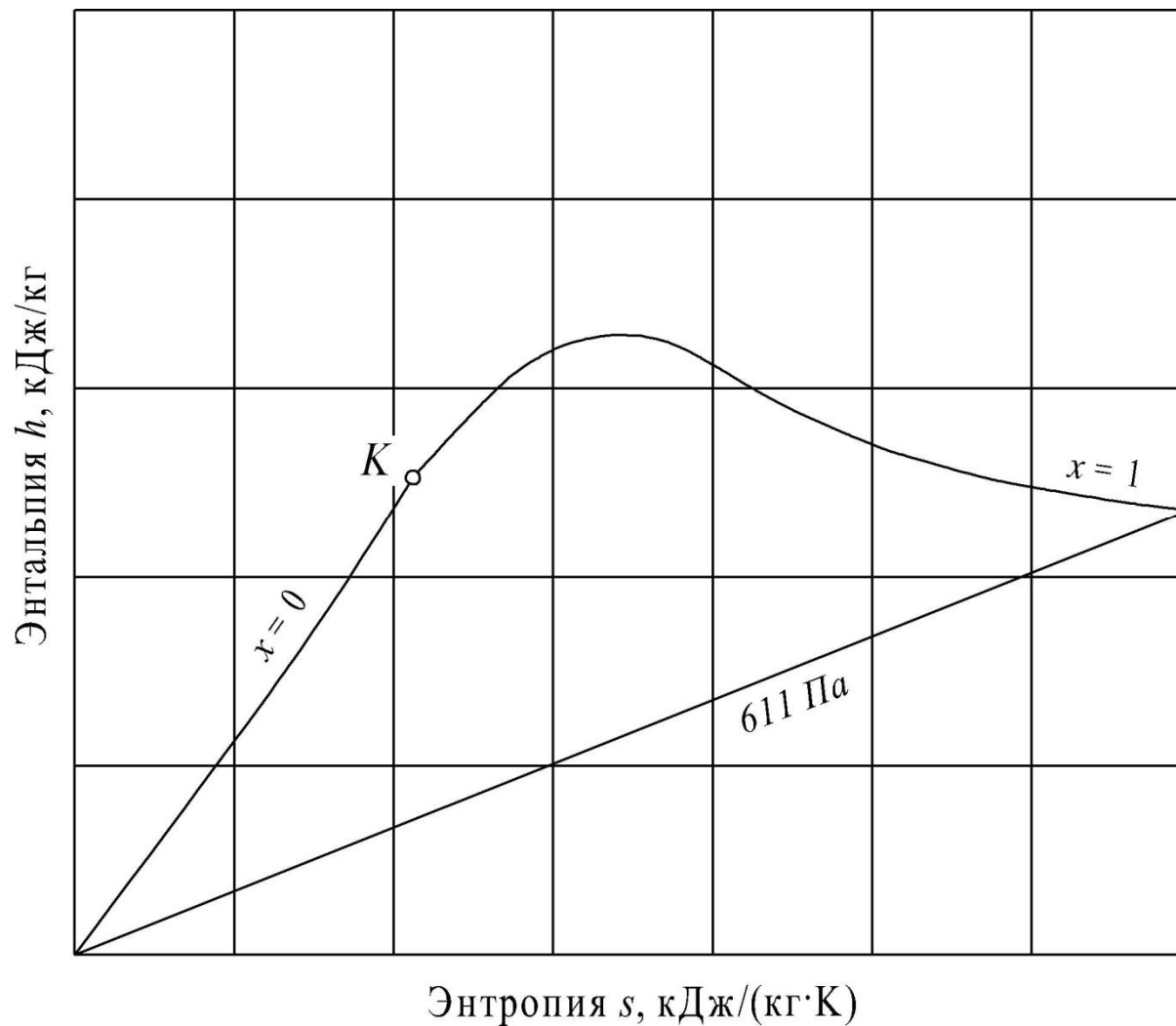
hs -диаграмма водяного пара



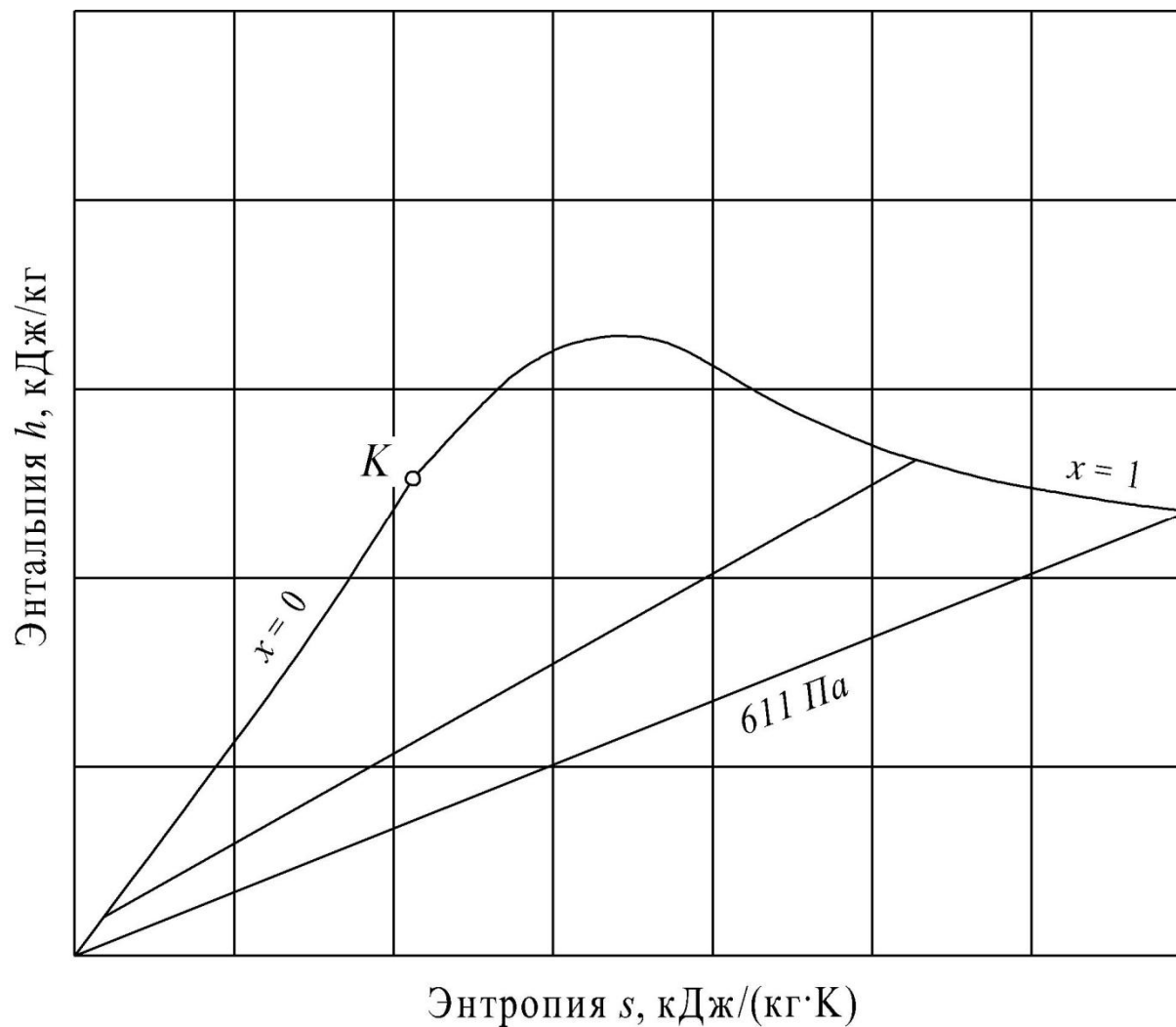
hs -диаграмма водяного пара



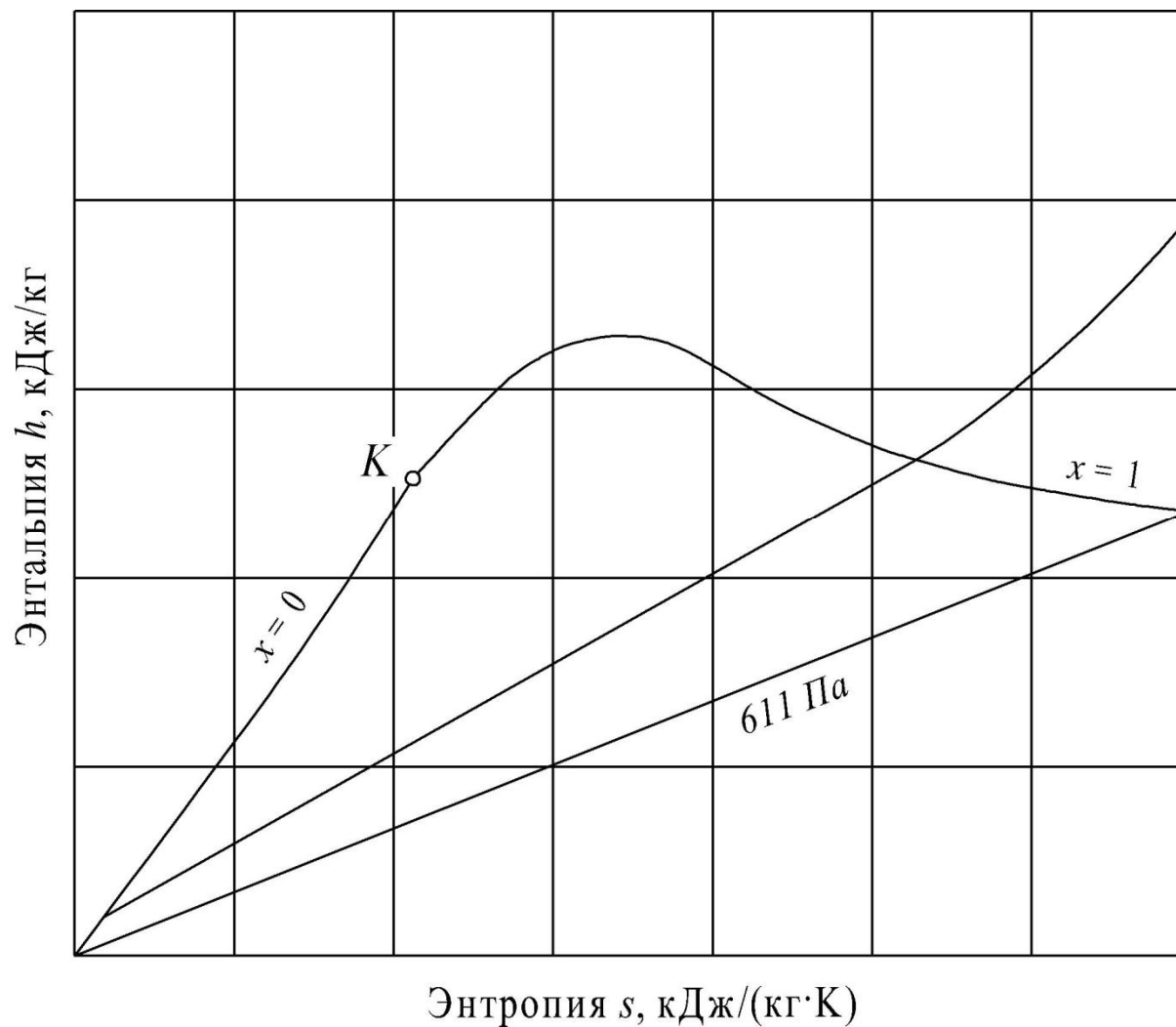
h s -диаграмма водяного пара



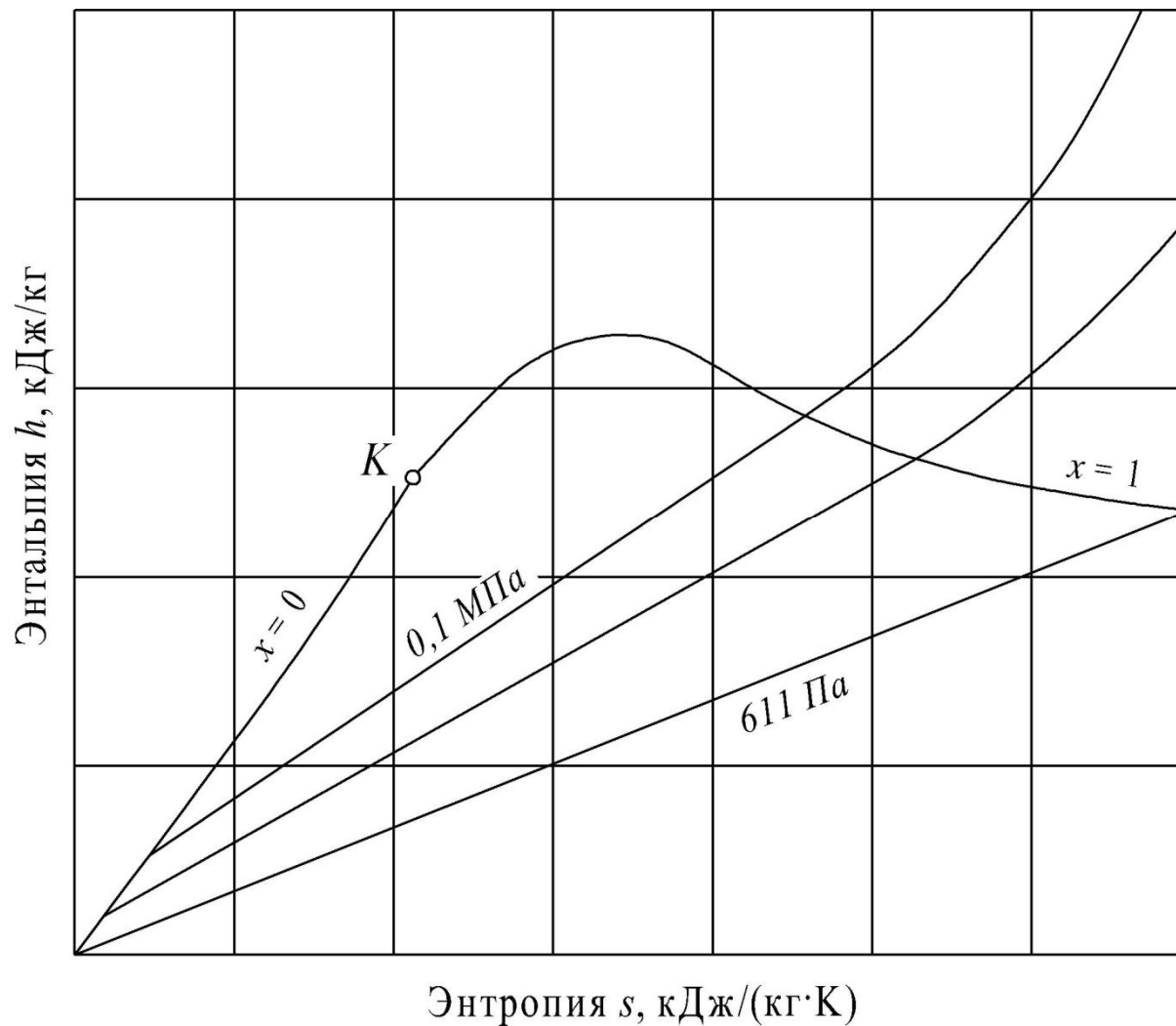
hs -диаграмма водяного пара



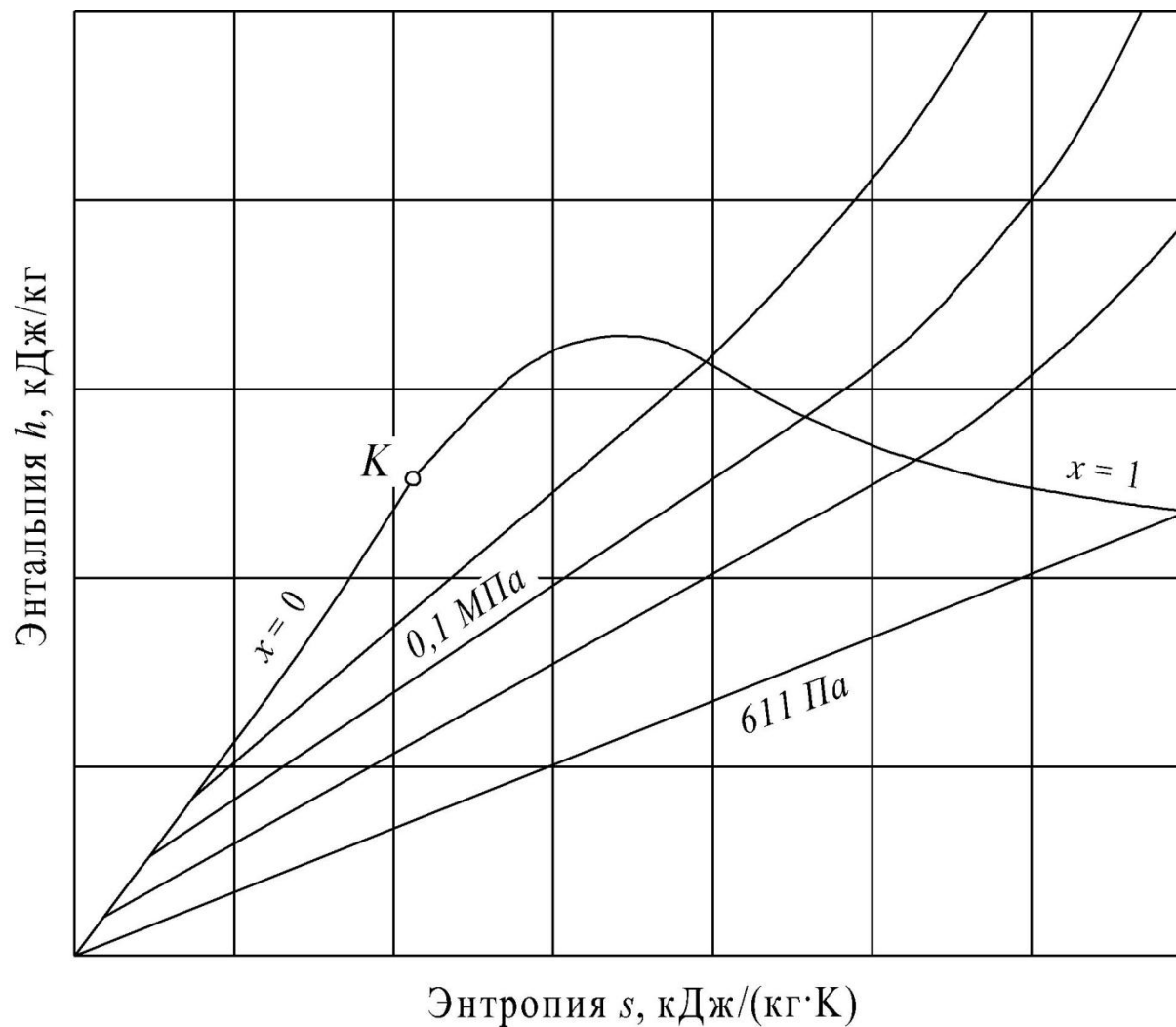
hs -диаграмма водяного пара



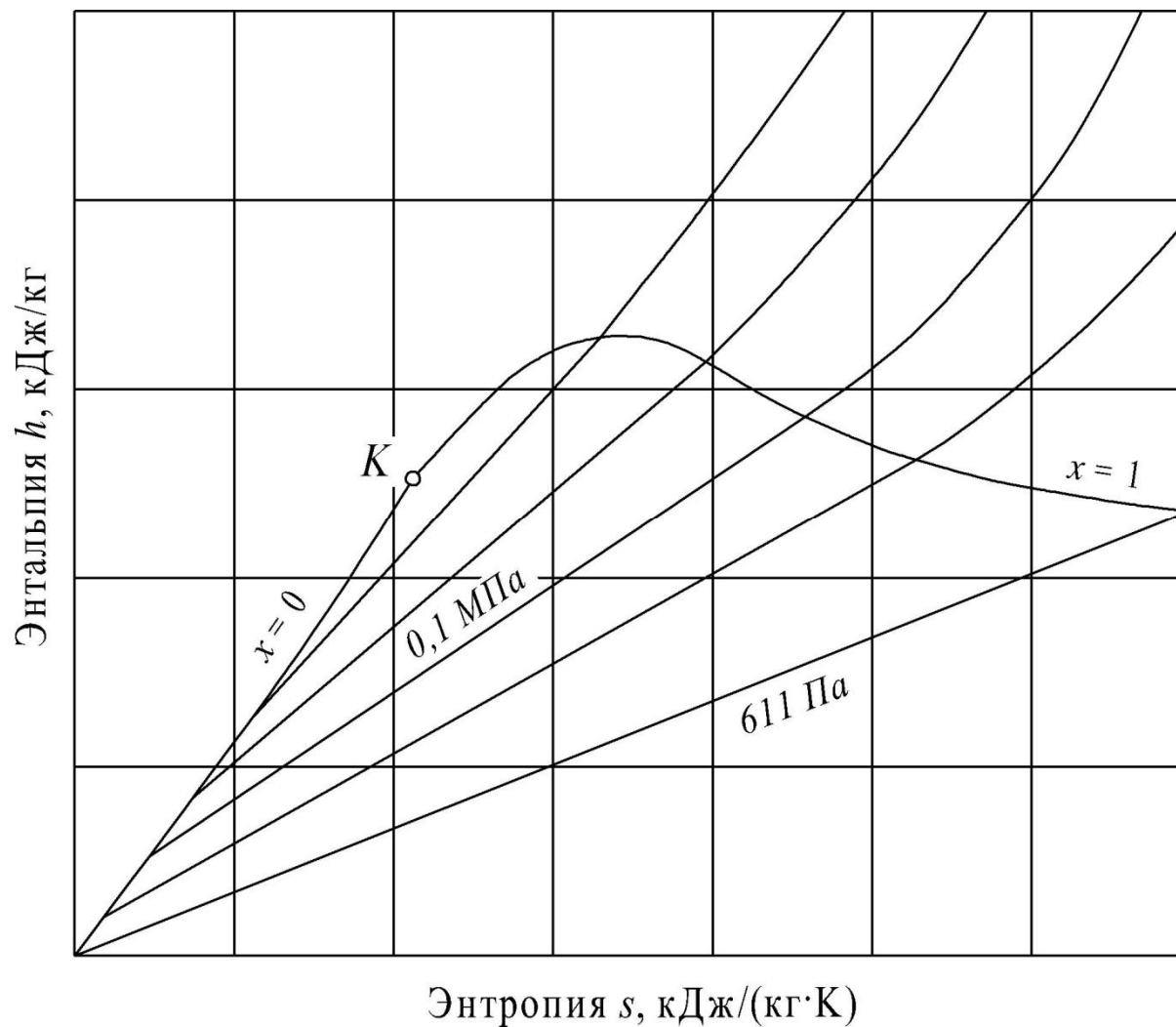
hs -диаграмма водяного пара



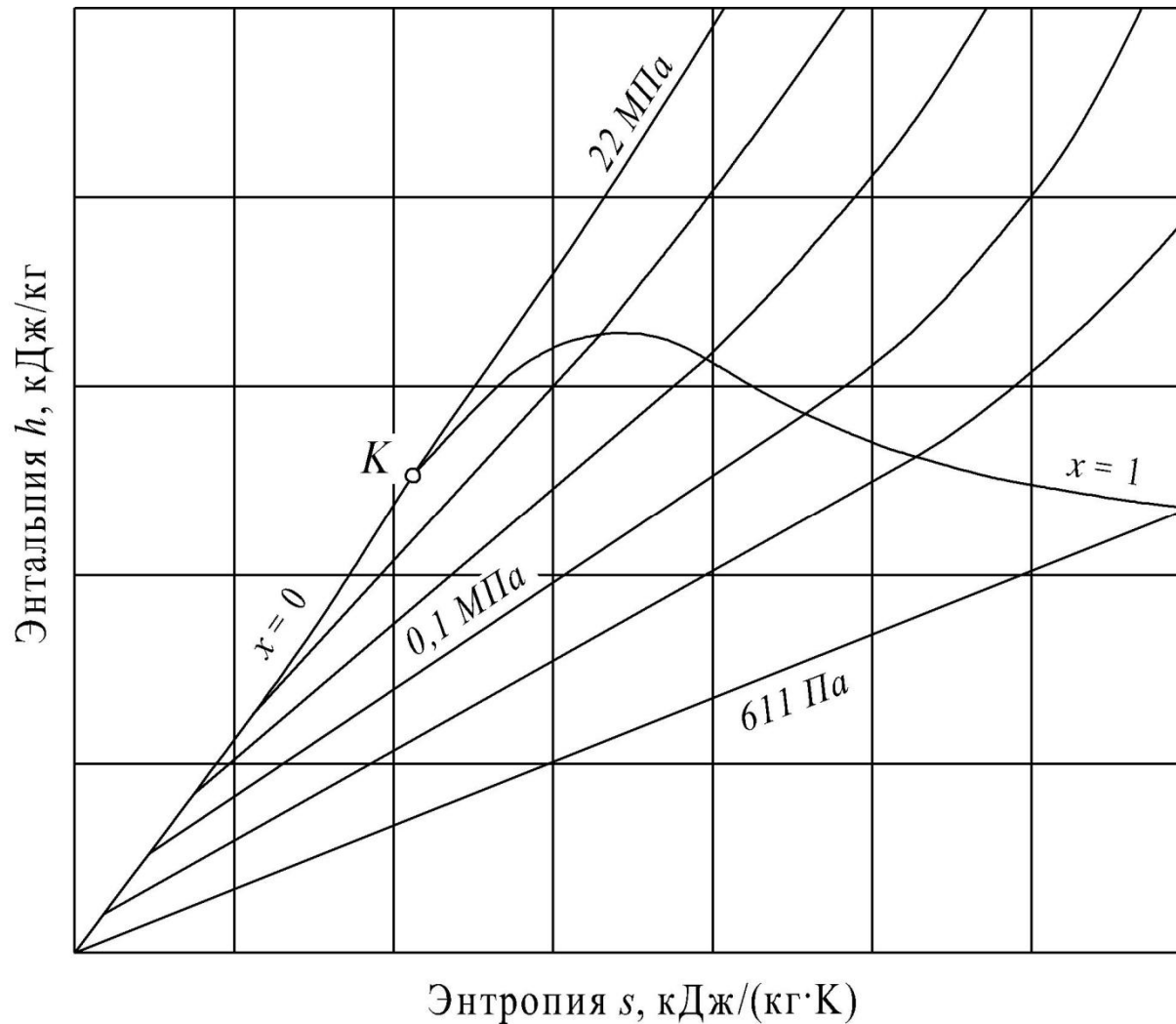
hs -диаграмма водяного пара



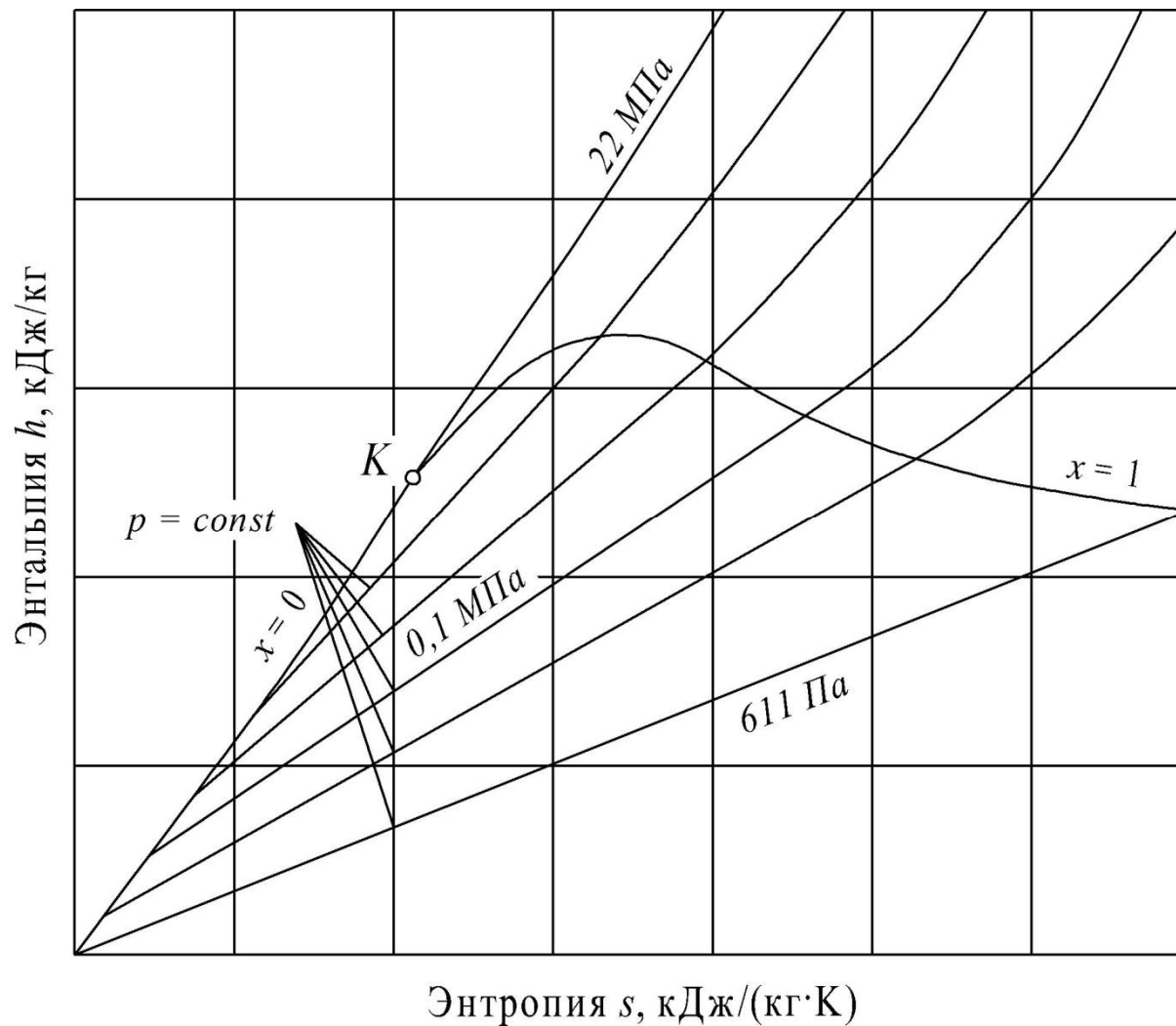
hs -диаграмма водяного пара



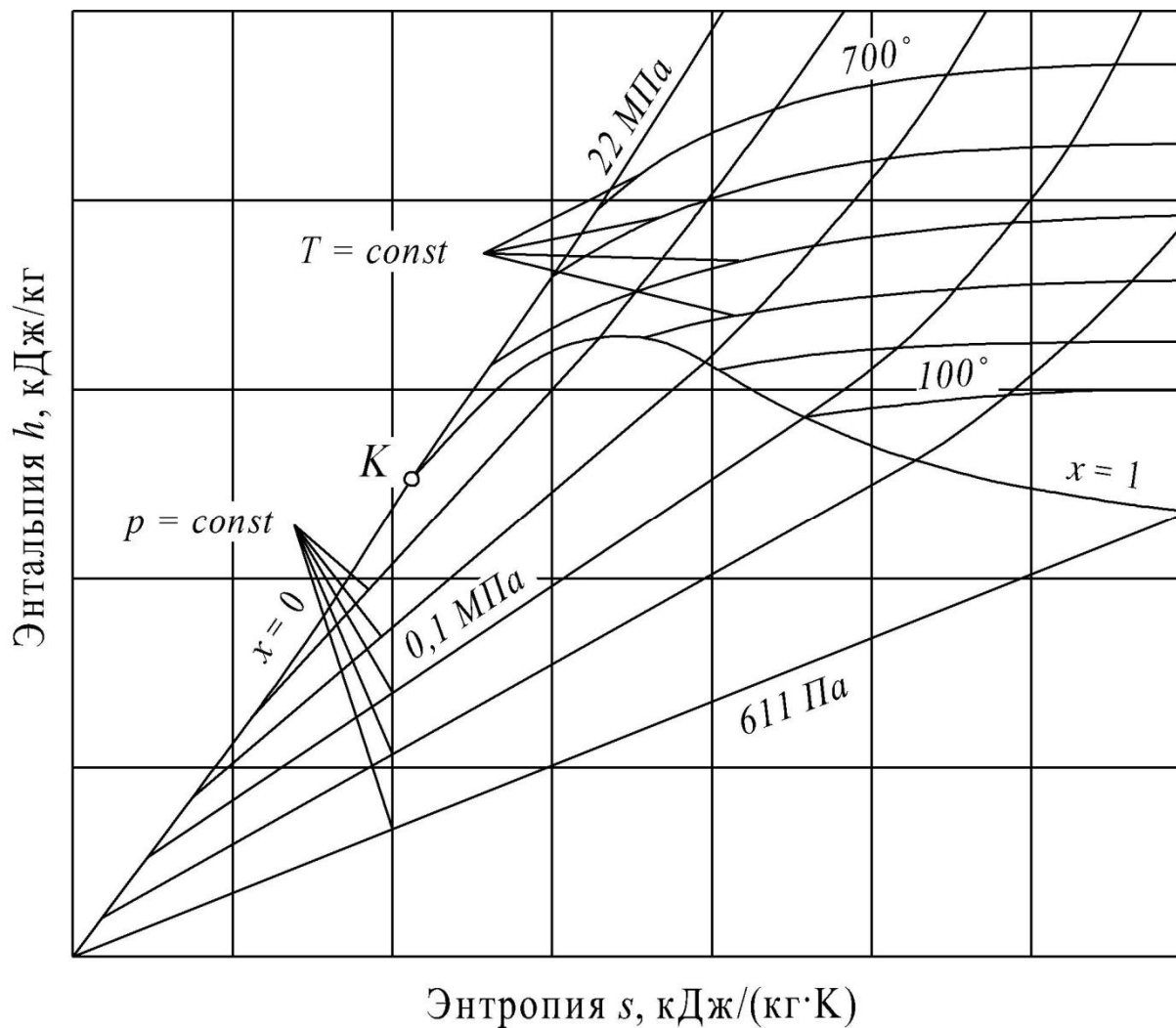
hs -диаграмма водяного пара



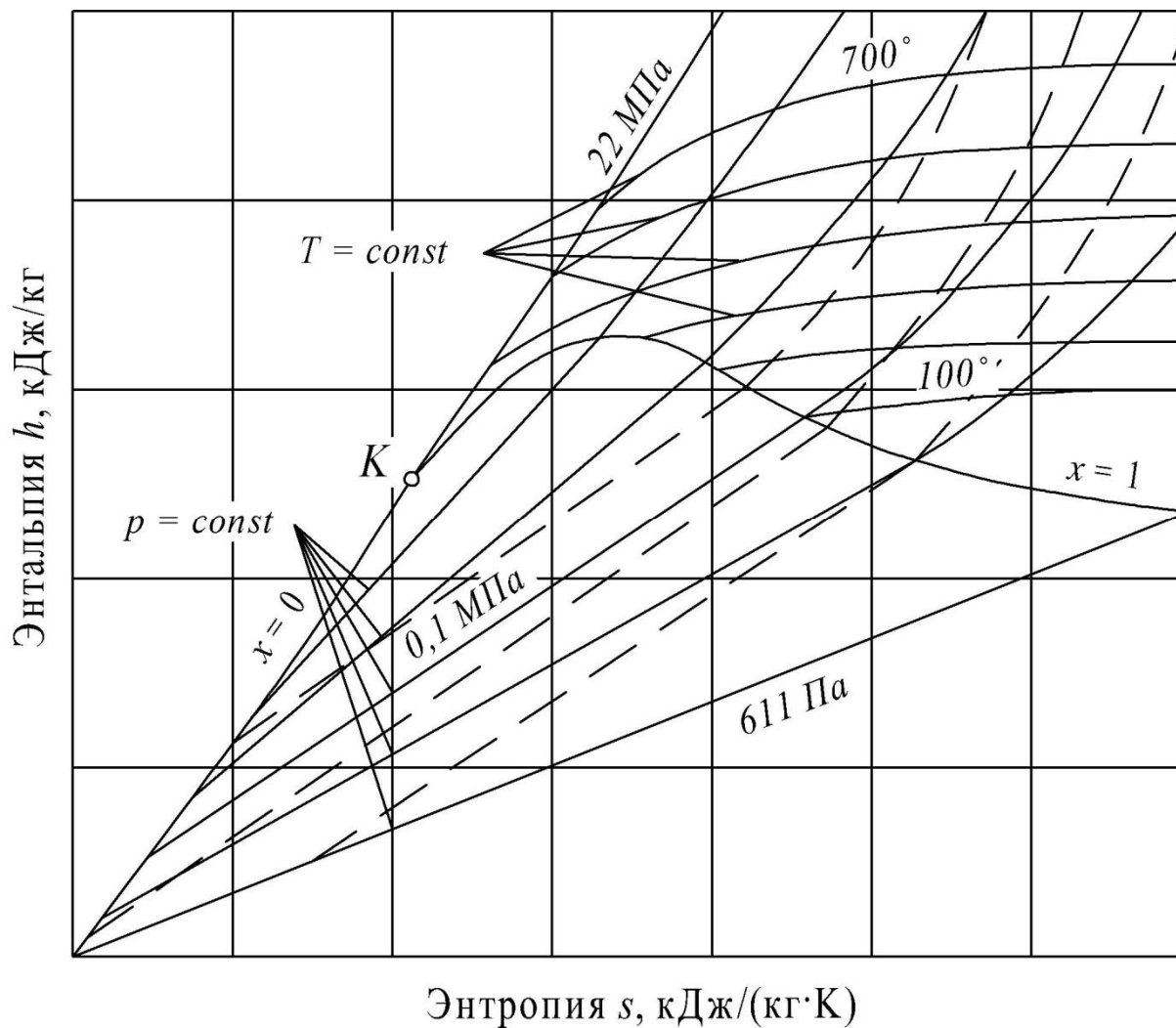
h s -диаграмма водяного пара



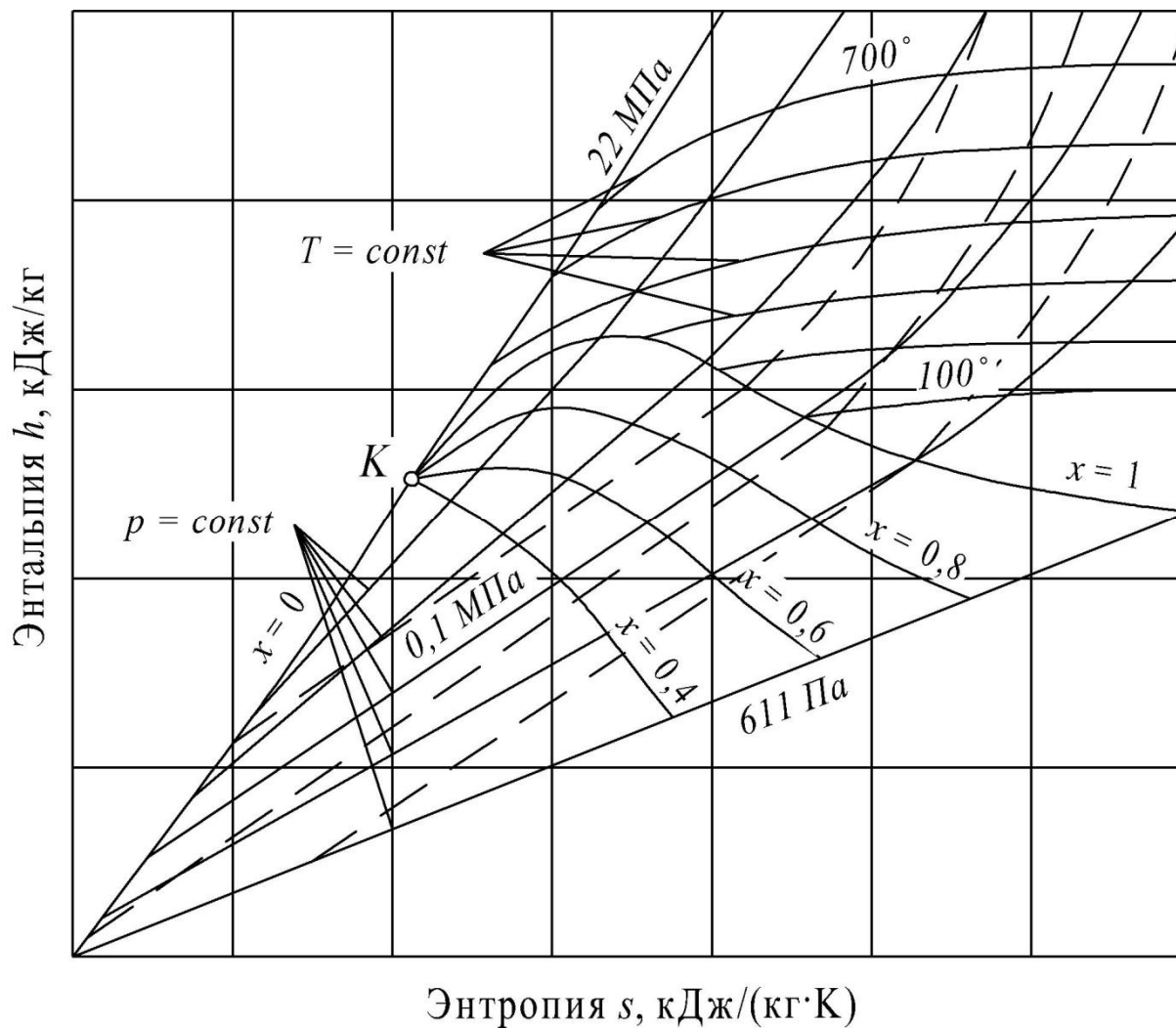
h s -диаграмма водяного пара



hs -диаграмма водяного пара



hs -диаграмма водяного пара





hs-диаграмма водяного пара

6.6. Определение параметров влажного насыщенного и перегретого пара

Параметры кипящей воды и сухого насыщенного пара приводятся в специальных таблицах, а параметры влажного насыщенного и перегретого пара могут быть определены при помощи hs -диаграммы или расчётным способом.


1 кг влажного насыщенного пара со степенью сухости x представляет собой смесь, состоящую из:

$(1 - x)$ кг – кипящей воды

x кг – сухого насыщенного пара.

Тогда удельный объём влажного насыщенного пара v_x

$$v_x = (1 - x)v' + xv''.$$



В современных паровых котлах и установках используется пар с $x \geq 0,9$, а v'' при нормальном давлении примерно в 1600 раз больше v' , поэтому можно считать

$$v_x \approx x v''.$$

Энтальпия влажного насыщенного пара h_x

$$h_x = h' + r x.$$

Внутренняя энергия влажного
насыщенного пара u_x

$$u_x = h_x - p v_x.$$



Энтропия влажного насыщенного пара s_x




Энтропия влажного насыщенного пара s_x

$$s_x = s' + \frac{r x}{T_H}$$

Энтропия влажного насыщенного пара s_x

$$s_x = s' + \frac{r x}{T_H} = 4,19 \ln \frac{T_H}{273} + \frac{r x}{T_H}.$$



Состояние перегретого пара, как и влажного насыщенного, определяется двумя любыми параметрами – p, t ; p, v ; v, t и др.

С увеличением степени перегрева пара его температура, удельный объём, энтальпия и энтропия увеличиваются, а плотность уменьшается.



Теплота перегрева пара $q_{\text{п}}$

Теплота перегрева пара q_{Π}

$$q_{\Pi} = \int_{T_{\text{H}}}^{T_{\Pi}} C_{p_{\Pi}} dT$$

Теплота перегрева пара q_{Π}

$$q_{\Pi} = \int_{T_{\text{H}}}^{T_{\Pi}} C_{p_{\Pi}} dT = C_{pm_{\Pi}} (t_{\Pi} - t_{\text{H}}),$$

Теплота перегрева пара q_{Π}

$$q_{\Pi} = \int_{T_{\text{H}}}^{T_{\Pi}} C_{p_{\Pi}} dT = C_{pm_{\Pi}} (t_{\Pi} - t_{\text{H}}),$$

где $C_{p_{\Pi}}$ – удельная изобарная теплоёмкость перегретого пара, кДж/(кг·К);

Теплота перегрева пара q_{Π}

$$q_{\Pi} = \int_{T_{\text{H}}}^{T_{\Pi}} C_{p_{\Pi}} dT = C_{pm_{\Pi}} (t_{\Pi} - t_{\text{H}}),$$

где $C_{p_{\Pi}}$ – удельная изобарная теплоёмкость перегретого пара, кДж/(кг·К);

$C_{pm_{\Pi}}$ – средняя удельная изобарная теплоёмкость перегретого пара в интервале от t_{H} до t_{Π} , кДж/(кг·К).

Теплоту перегрева q_{Π} можно также определить на основании первого закона термодинамики по формуле

$$q_{\Pi} = u_{\Pi} - u'' + p(v_{\Pi} - v''),$$

ИЛИ

$$q_{\Pi} = h_{\Pi} - h''.$$



Энтальпия перегретого пара



Энтальпия перегретого пара

$$h_{\text{п}} = h'' + q_{\text{п}}$$



Энтальпия перегретого пара

$$h_{\text{п}} = h'' + q_{\text{п}} = h' + r + q_{\text{п}},$$

Энтальпия перегретого пара

$$h_{\Pi} = h'' + q_{\Pi} = h' + r + q_{\Pi},$$

ИЛИ

$$h_{\Pi} = h' + r + C_{pm_{\Pi}}^{t_{\Pi}} (t_{\Pi} - t_{\text{H}}).$$



Внутреннюю энергию перегретого пара находят из выражения

$$u_{\text{п}} = h_{\text{п}} - p v_{\text{п}}.$$

Энтродия перегретого пара определяется как сумма

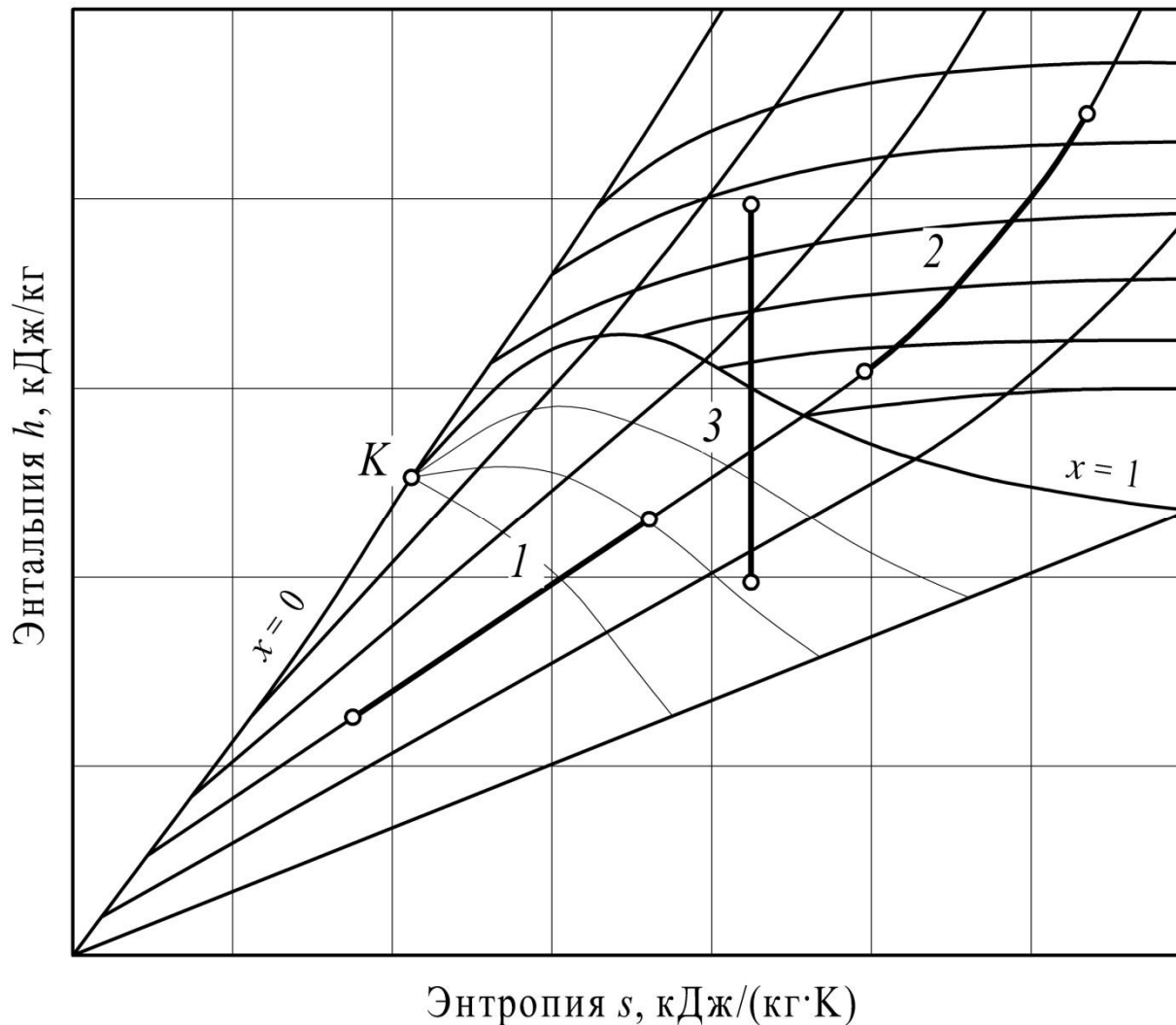
$$s_{\text{п}} = 4,19 \ln \frac{T_{\text{н}}}{273} + \frac{r}{T_{\text{н}}} + C_{\text{р}т_{\text{п}}} \ln \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{н}}}.$$




7. Основные термодинамические процессы водяного пара

7.1. Методика исследования термодинамических процессов водяного пара


Термодинамические процессы водяного пара





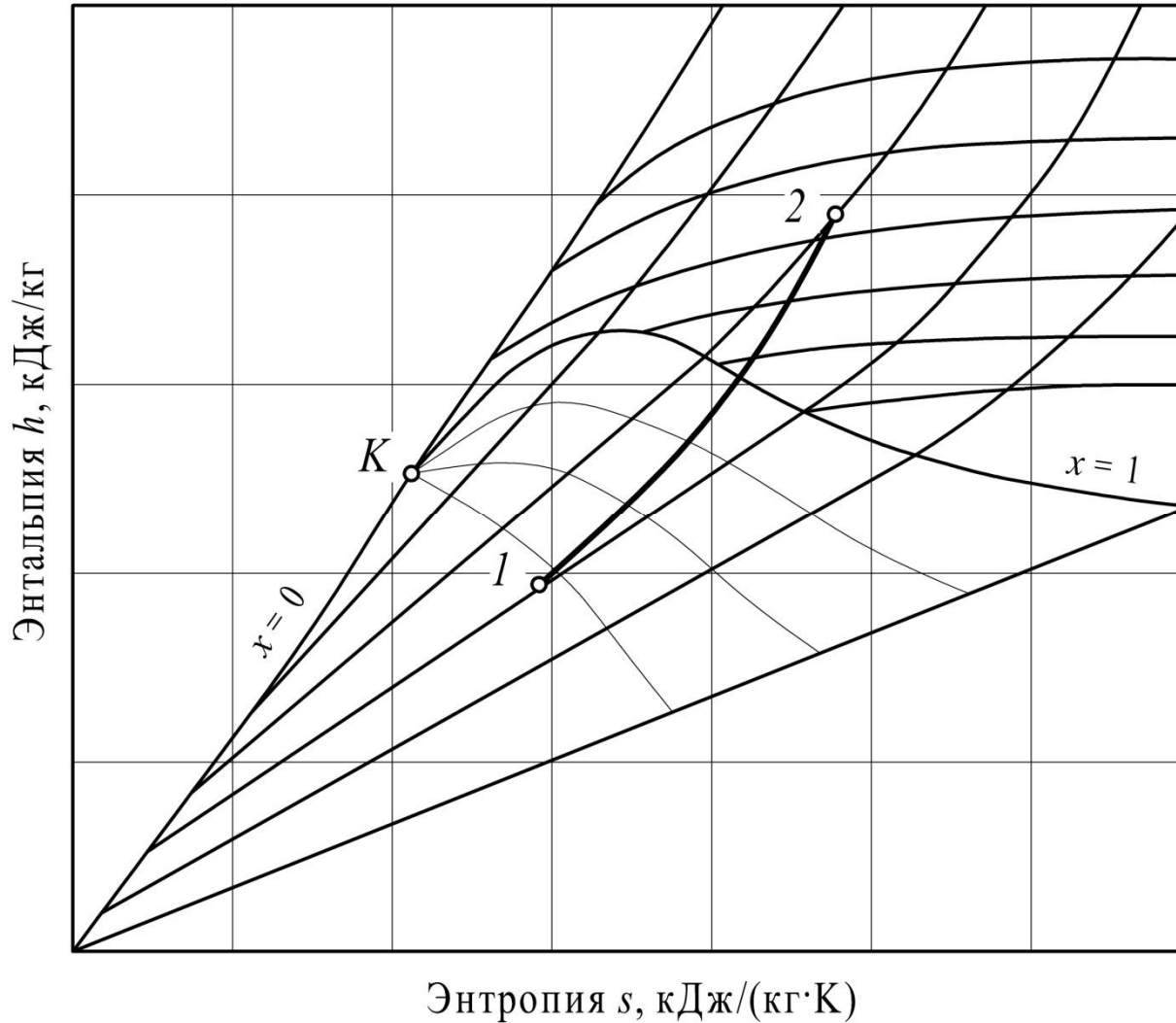
Термодинамические процессы водяного пара могут происходить:


- 1) в области влажного насыщенного пара (процесс 1);
- 2) в области перегретого пара (процесс 2);
- 3) частично в области влажного насыщенного и частично в области перегретого пара (процесс 3).



При анализе работы различных паросиловых установок большое значение имеют изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы изменения состояния пара.

7.2. Изохорный процесс






В изохорном процессе работа расширения
равна нулю

$$l = 0,$$

т.к. объём пара не изменяется.

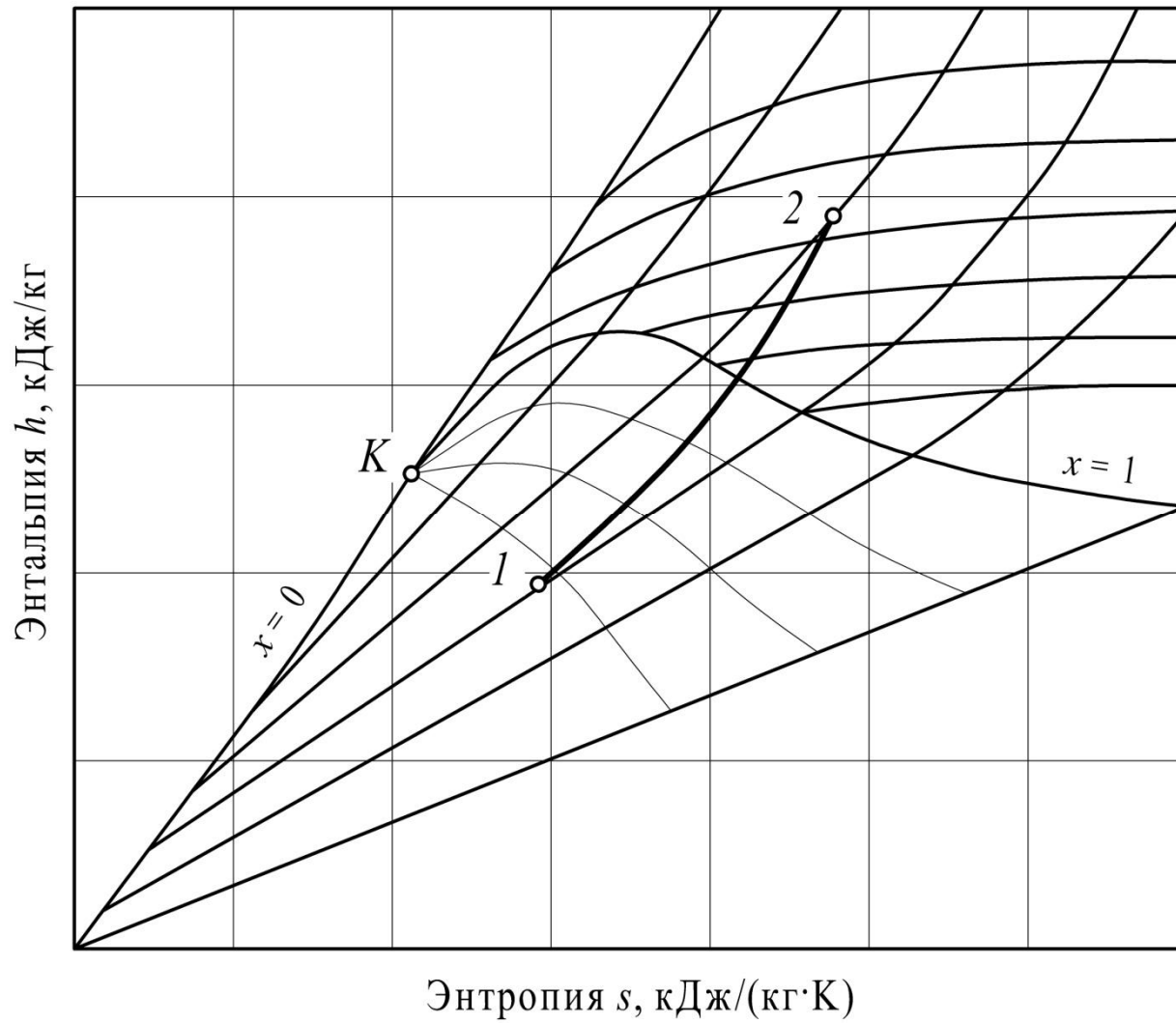


Следовательно, теплота расходуется только на изменение внутренней энергии пара

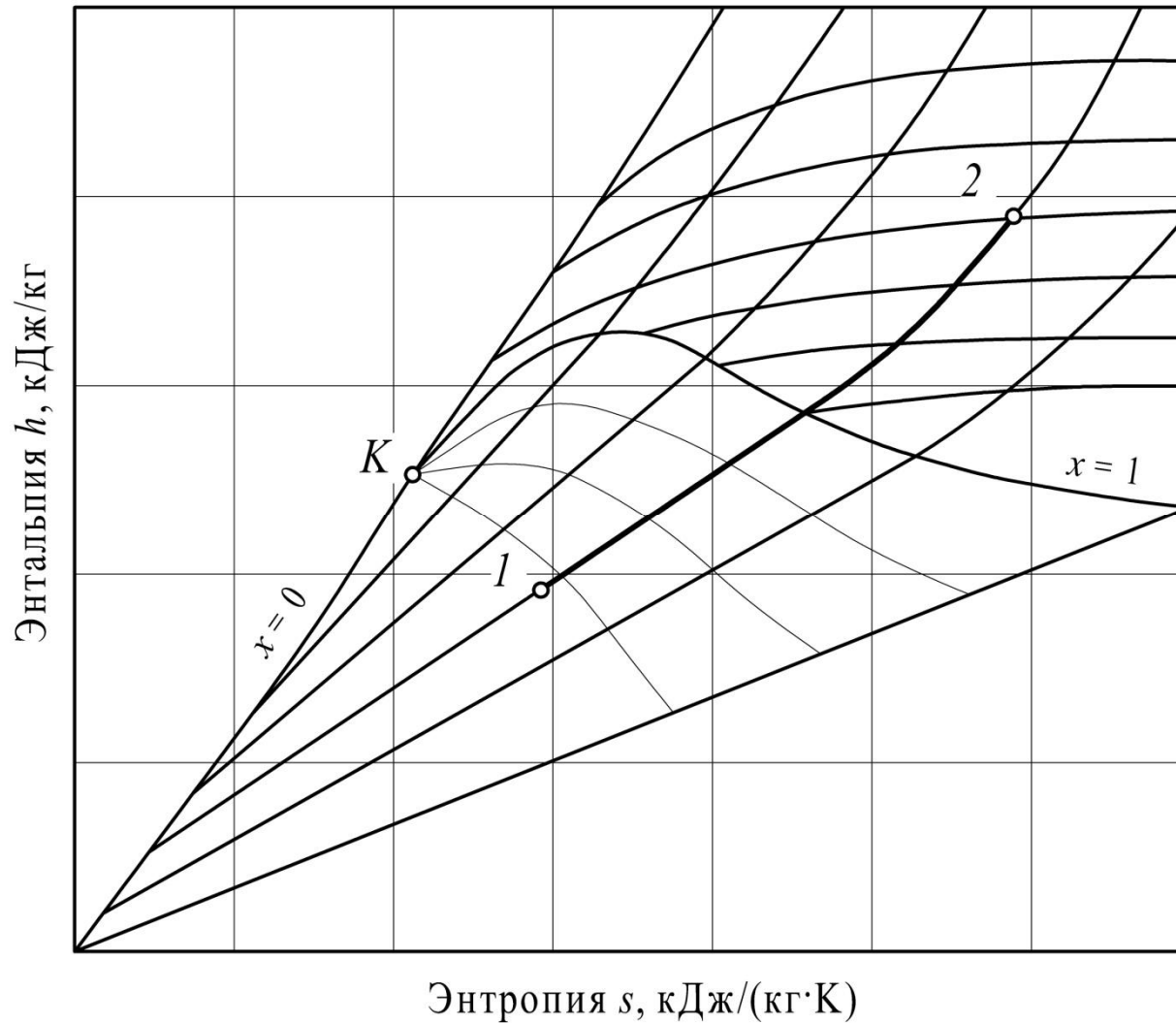
$$q_v = \Delta u,$$

где

$$\Delta u_{1-2} = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1).$$



7.3. Изобарный процесс





Изменение внутренней энергии пара в изобарном процессе

$$\Delta u_{1-2} = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1).$$

Работа расширения пара

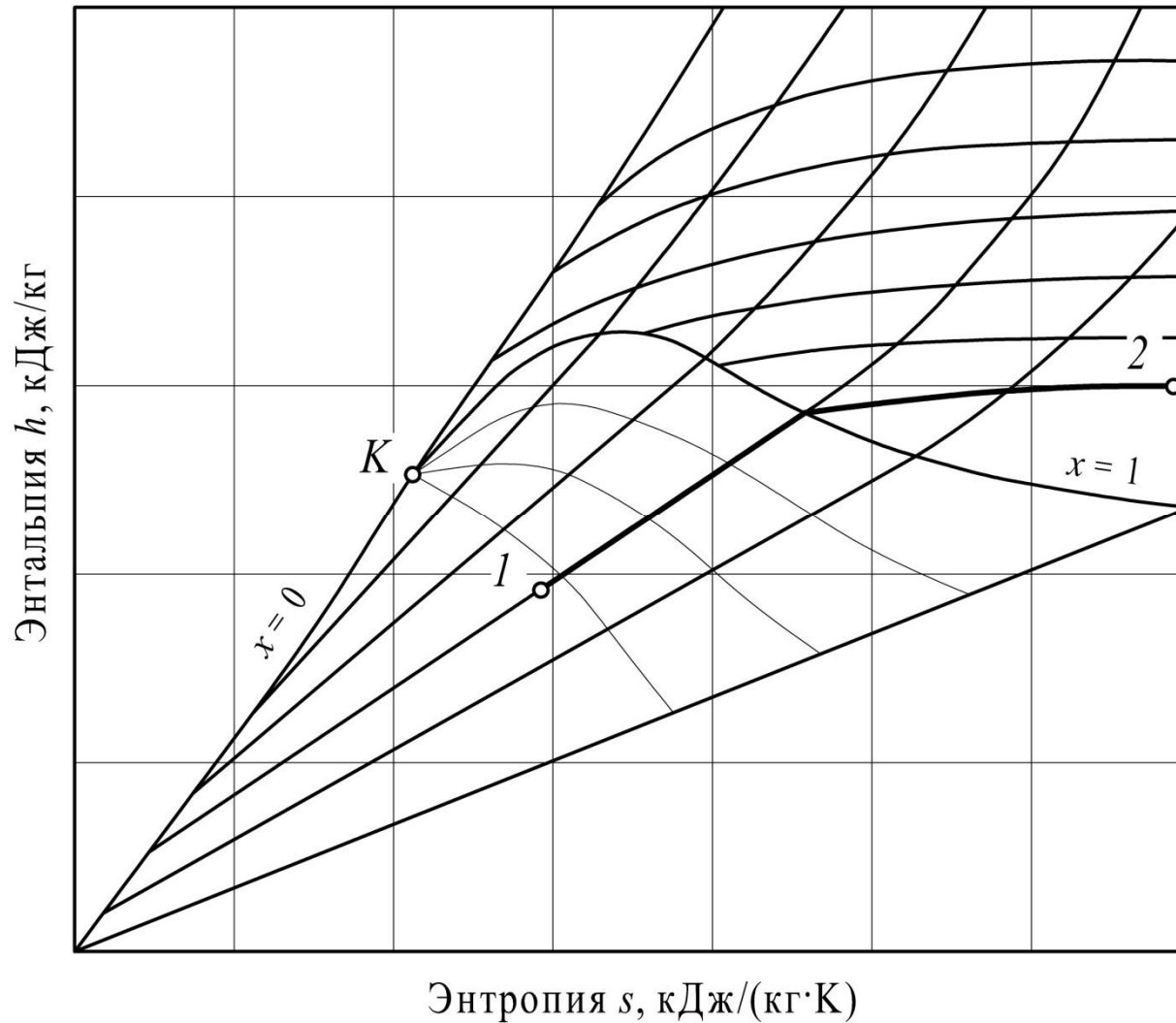
$$l_{1-2} = p(v_2 - v_1).$$




Количество подведенной (отведенной)
теплоты

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 .$$

7.4. Изотермический процесс





Изотермический процесс водяного пара сопровождается изменением его внутренней энергии

$$\Delta u_{1-2} = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1).$$



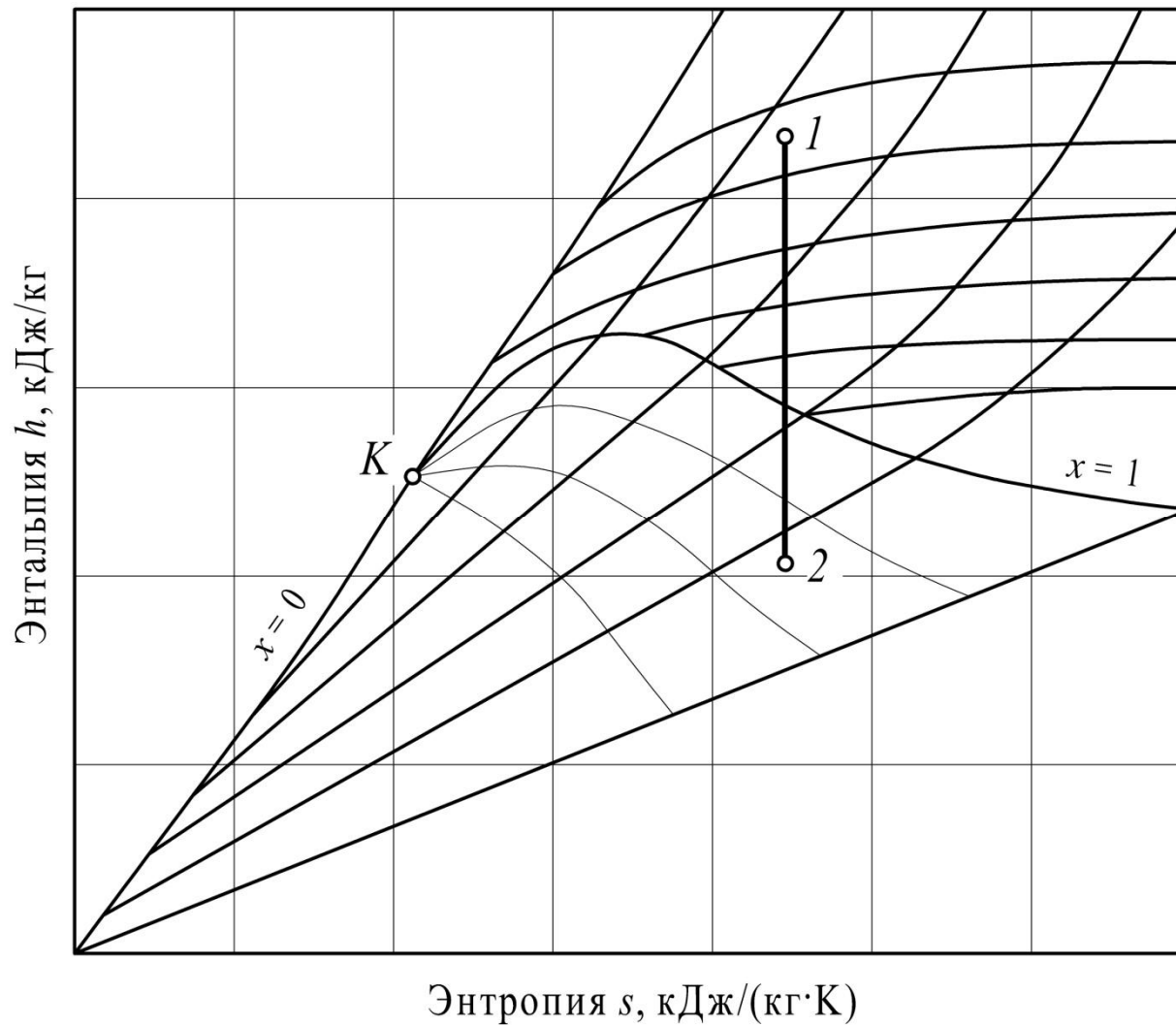
Количество подведенной теплоты

$$q_{1-2} = T (s_2 - s_1).$$

Работа расширения пара

$$l_{1-2} = q - \Delta u.$$

7.5. Адиабатный процесс





В адиабатном процессе

$$q = 0.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u_{1-2} = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1).$$



Работа в адиабатном процессе

$$l_{1-2} = -\Delta u.$$