

Тема: ВОДЯНОЙ ПАР И ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

1. Параметры состояния водяного пара
2. Процессы образования водяного пара
3. Процессы изменения состояния пара
4. Понятие о влажном воздухе и его характеристики

1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

Водяной пар широко применяется на электростанциях в качестве рабочего тела для паротурбинных установок. Кроме того, вода и водяной пар являются самыми распространенными теплоносителями в теплообменных аппаратах, в энергетических и технологических системах, а также в системах теплоснабжения и отопления.

Водяной пар для промышленных целей получают в парогенераторах (паровых котлах) различного типа, общим для которых является то, что процесс получения пара является изобарным. Температура кипения воды и образующегося из нее пара является при этом постоянной, она зависит только от давления парогенератора и называется температурой насыщения T_H .

Пар, температура которого равна температуре насыщения, называется насыщенным (пар находится в термодинамическом равновесии с кипящей жидкостью).

Насыщенный пар, не содержащий примеси жидкости, называют сухим насыщенным паром.

Смесь сухого насыщенного пара и кипящей жидкости называется влажным насыщенным паром.

Массовая доля сухого насыщенного пара в этой смеси называется степенью сухости и обозначается x . При этом имеет место:

- $x = 1$ - для сухого насыщенного пара;
- $x = 0$ - для кипящей жидкости;
- $0 < x < 1$ - для влажного насыщенного пара.

Параметры водяного пара обозначают следующим образом:

- 1) кипящей жидкости – v', h', s' ;
- 2) сухого насыщенного пара – v'', h'', s'' .
- 3) влажного насыщенного пара – v_x, h_x, s_x
- 4) перегретого пара – v, h, s .

Зависимость между параметрами определяется следующими формулами:

$$v_x = v'' \cdot x + v' \cdot (1 - x), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

$$h_x = h'' \cdot x + h' \cdot (1 - x), \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

$$s_x = s'' \cdot x + s' \cdot (1 - x), \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \quad (3)$$

Под теплотой парообразования r понимают количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей жидкости при постоянном давлении (следовательно, и при постоянной температуре) в сухой насыщенный пар.

Та как водяной пар получают в изобарном процессе, то количество теплоты, необходимой для образования пара, можно подсчитать как разность энтальпий в конце и начале процесса. Это очень удобно, т.к. позволяет обойтись без теплоемкости, которая в данном случае (реальный газ) зависит не только от температуры, но и от давления.

Таким образом, теплота парообразования равна:

$$r = h'' - h' \quad (4)$$

Внутренняя энергия пара находится через его энтальпию из выражения:

$$u = h - p \cdot v \quad (5)$$

2. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

Для анализа процессов изменения состояния воды и водяного пара обычно используют диаграммы $p-v$ (рис. 1) и $T-s$ (рис. 2), а для расчета процессов – диаграмму $h-s$ (рис. 3) и таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара.

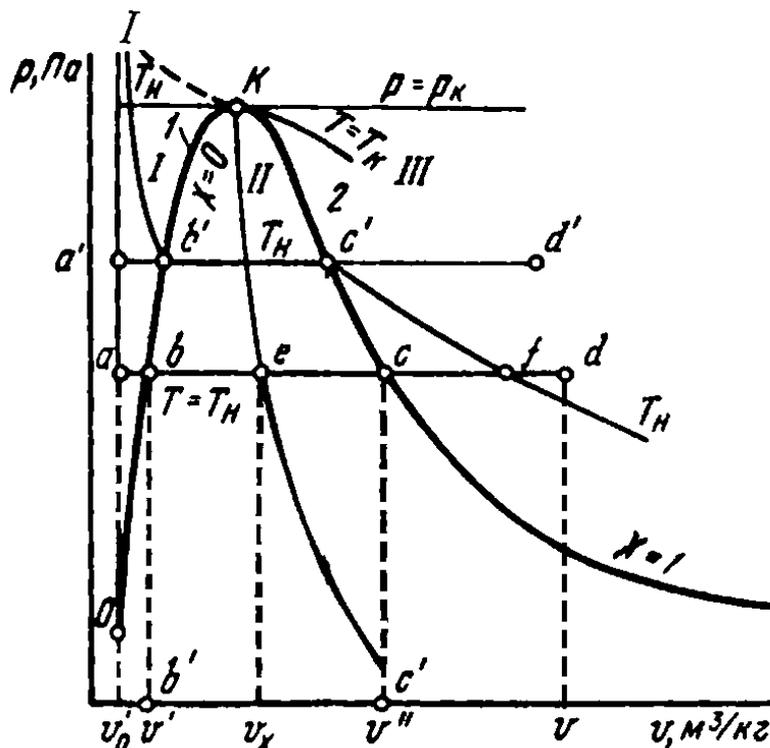


Рис. 1. $p-v$ -диаграмма водяного пара

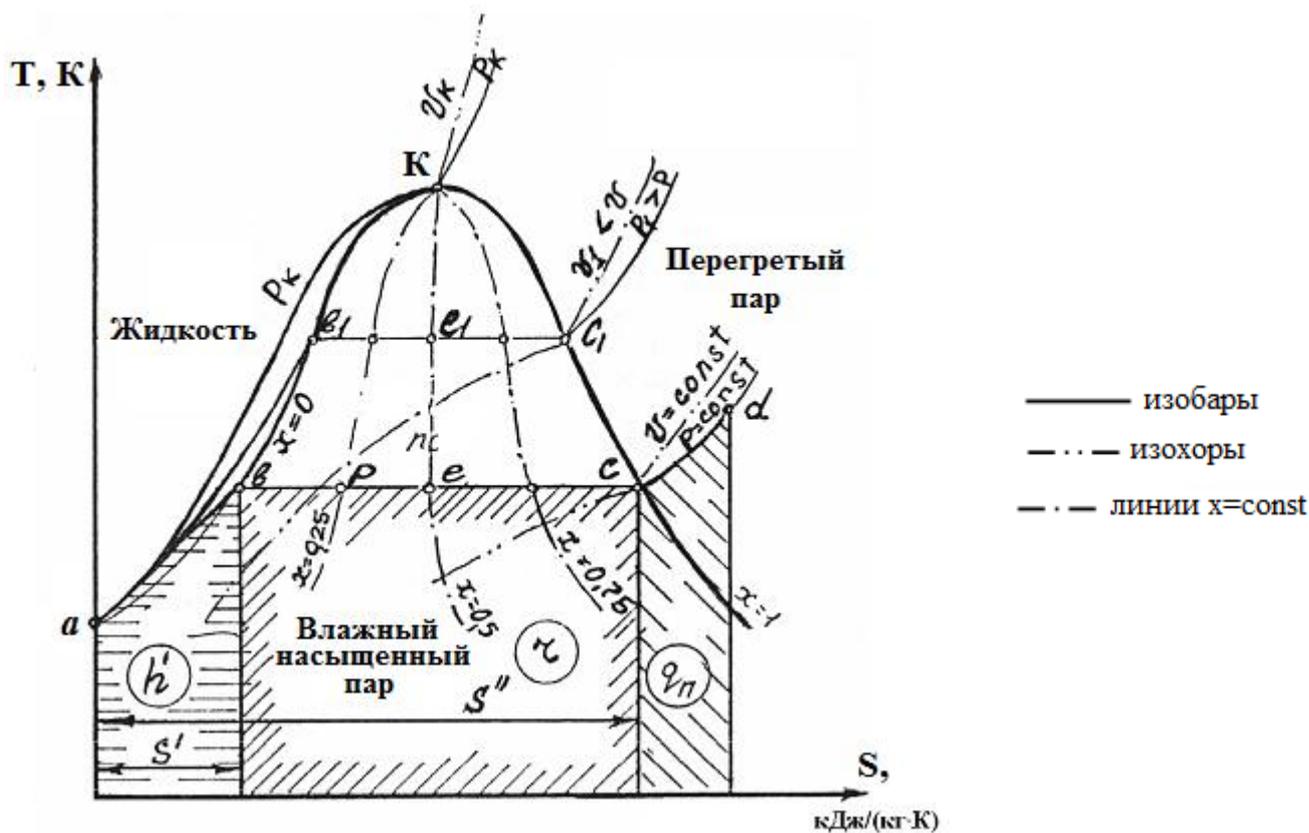


Рис. 2. $T-s$ -диаграмма водяного пара

На всех диаграммах процесс парообразования при $p = \text{const}$ изображен кривой $a-b-c-d$.

На диаграммах водяного пара $p-v$, $T-s$ и $h-s$ показаны нижняя пограничная кривая или линия кипящей жидкости ($x = 0$) и верхняя пограничная кривая или линия сухого насыщенного пара ($x = 1$). Пограничные кривые соединяются в критической точке «К», обозначающей критическое состояние воды.

Критическая точка – сочетание значений температуры и давления, при которых исчезает различие в свойствах кипящей жидкости и пара. В критической точке плотность жидкости и её насыщенного пара становятся равны, а поверхностное натяжение жидкости падает до нуля, поэтому исчезает граница раздела фаз жидкость-пар. Критическая точка для воды достигается с большим трудом при температуре 374 °С и давлении 205 атм.

Параметры критического состояния:

$$P_K = 205 \text{ атм}, \quad t_K = 374 \text{ }^\circ\text{C}, \quad v_K = 0,003147 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$s_K = 4,4237 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}, \quad h_K = 2095, 2 \text{ кДж/кг}$$

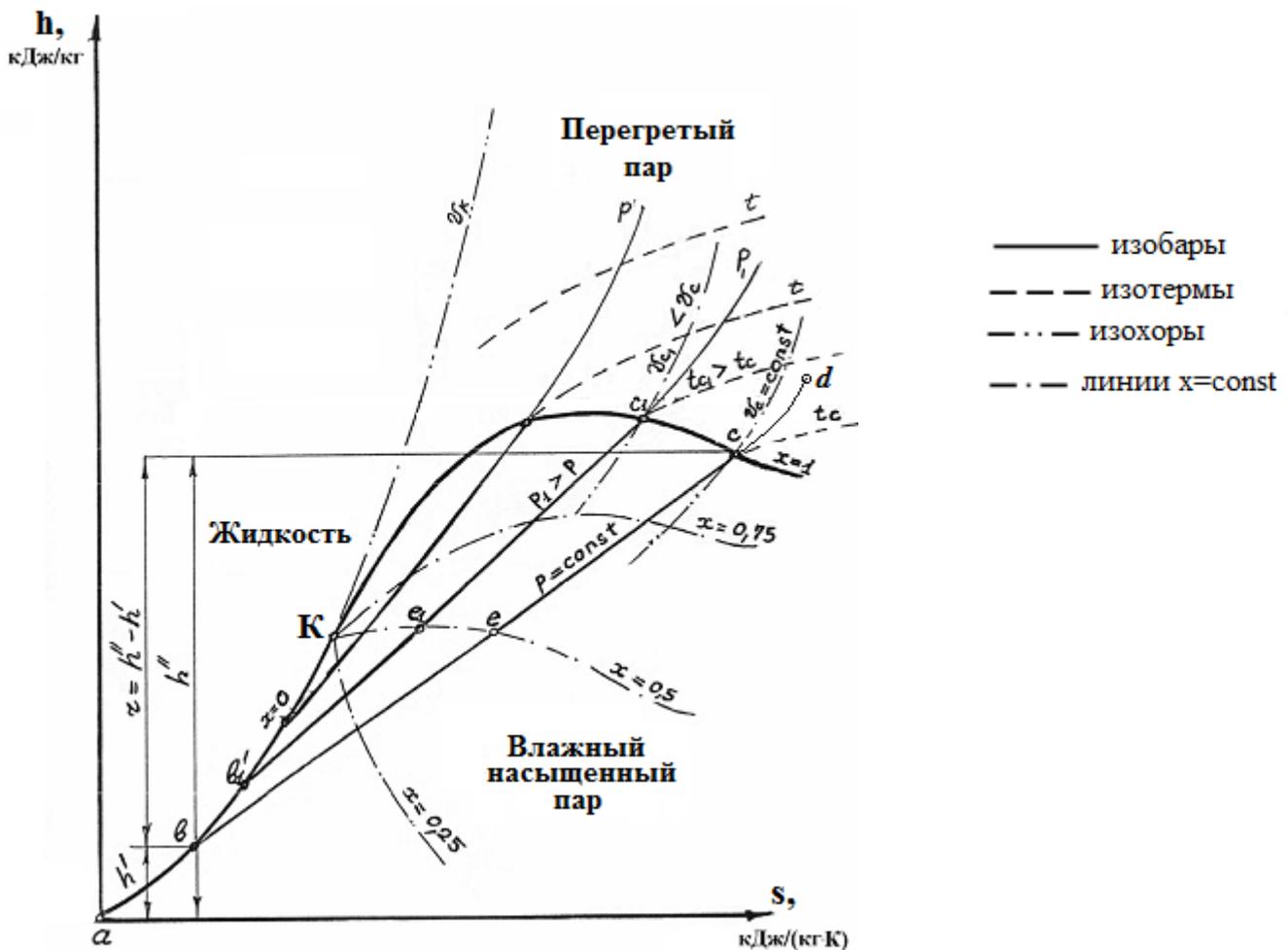


Рис. 3. $h-s$ -диаграмма водяного пара

Пограничные линии делят диаграммы на области капельной жидкости (воды), влажного насыщенного пара и перегретого пара.

На всех диаграммах в области влажного пара линии изобары и изотермы совпадают.

На практике широко пользуются $h-s$ -диаграммой водяного пара (рис. 3), за начало координат которой принято состояние воды в тройной точке.

Тройная точка сочетание значений температуры и давления, при котором вещество может одновременно и равновесно находится в трех агрегатных состояниях — твердом, жидком и газообразном. Т.о. вода одновременно находится в равновесном состоянии в виде пара, жидкости и льда.

Для воды температура тройной точки равна 273,16 К (0, 01 °С) при давлении 611 Па.

Параметры тройной точки воды:

$$p_0 = 611 \text{ Па}; \quad T_0 = 273,16 \text{ К}; \quad v_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$s_0 = 0, \quad h_0 = 0.$$

Пограничные кривые строятся по точкам h' и s' для кривой $x = 0$ и по точкам h'' и s'' — для кривой $x = 1$. Термодинамические параметры воды, доведенной до кипения ($x = 0$), и сухого насыщенного пара берут из таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара.

В области влажного пара изобары и изотермы совпадают и изображаются расходящимися линиями. От пограничной кривой $x = 1$ изотермы идут плавными кривыми вправо, а при больших степенях перегрева они практически параллельны оси θ - s .

Для практических расчетов обычно выделяют рабочую область диаграммы h - s выше и правее точки «К» и выполняют ее в большем масштабе. Для любой точки в диаграмме h - s можно определить параметры p , v , t , h и s .

3. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПАРА

3.1. Изохорный процесс водяного пара

Изохорный процесс 1-2 на p - v -диаграмме водяного пара изображается прямым отрезком, параллельным оси Y (рис. 4,а). На T - s -диаграмме процесс изображается кривой линией (рис. 4,б). В области влажного пара изохора направлена выпуклостью вверх, а в области перегретого пара — выпуклостью вправо. На h - s диаграмме изохора изображается кривой линией, направленной выпуклостью вниз (рис. 4,в).

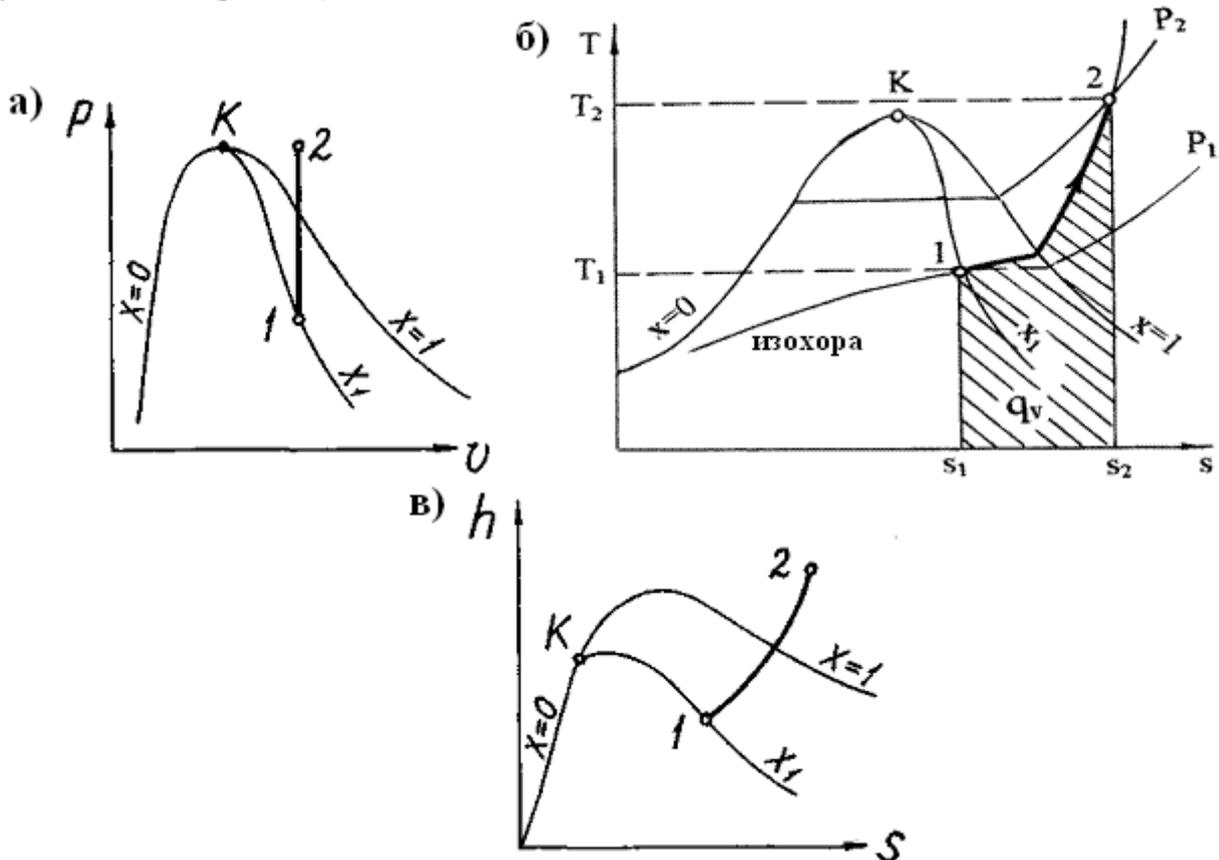


Рис. 4. Изохорный процесс пара (линия 1-2)

В изохорном процессе внешняя работа равна нулю $l = 0$. Подведенная теплота расходуется на изменение внутренней энергии рабочего тела:

$$q = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1) \quad (6)$$

3.2. Изобарный процесс водяного пара

На $p-v$ -диаграмме изобарный процесс водяного пара изображается отрезком горизонтальной прямой, который в области влажного пара одновременно является изотермой (рис. 5,а).

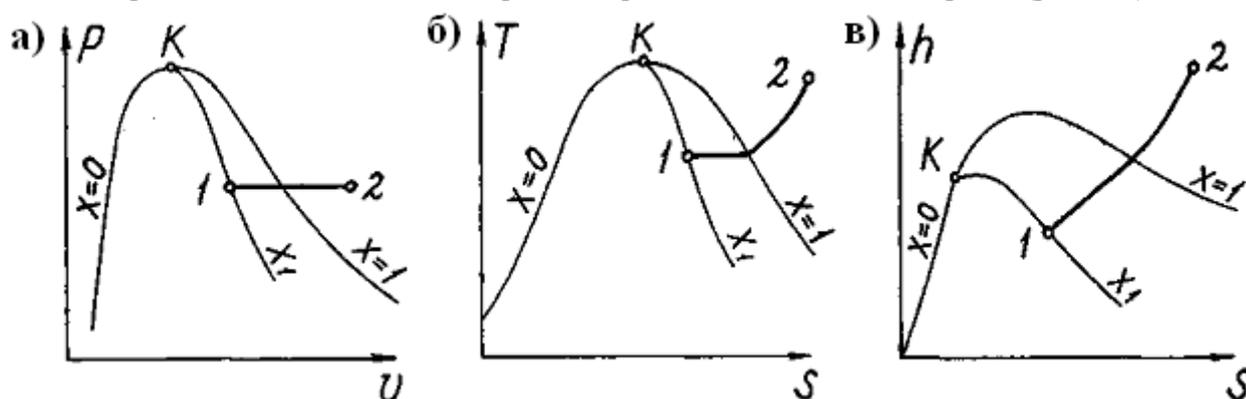


Рис. 5. Изобарный процесс водяного пара (линия 1-2)

На $T-s$ -диаграмме в области влажного пара изобара изображается прямой горизонтальной линией, а в области перегретого пара – кривой, обращенной выпуклостью вправо (рис. 5,б).

На $h-s$ -диаграмме изобара в области насыщенного пара изображается прямой наклонной линией, а в области перегретого пара изобара представляет собой кривую, направленную выпуклостью вправо (рис. 5,в).

Изменение внутренней энергии пара в изобарном процессе:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1) \quad (7)$$

Внешняя работа:

$$l = p(v_2 - v_1) = q - \Delta u \quad (8)$$

Количество подведенной теплоты:

$$q = h_2 - h_1 \quad (9)$$

3.3. Изотермический процесс водяного пара

На $p-v$ -диаграмме в области влажного пара изотермический процесс изображается горизонтальной прямой, совпадающей с соответствующей изобарой. В области перегретого пара этот процесс изображается кривой, обращенной выпуклостью вниз (рис. 6,а).

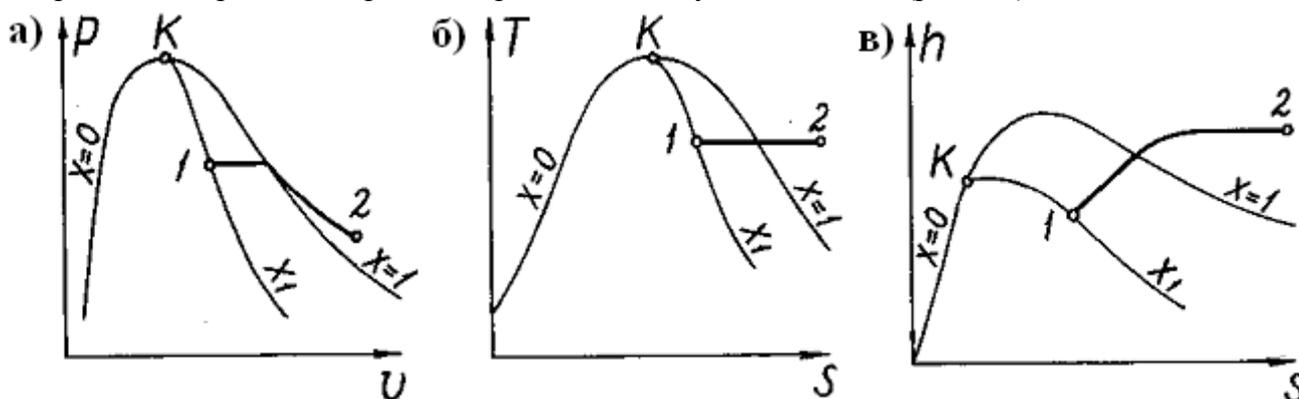


Рис. 6. Изотермический процесс водяного пара (линия 1-2)

На $T-s$ -диаграмме изотермический процесс изображается отрезком горизонтали (рис. 6,б).

Изотерма на $h-s$ -диаграмме в области влажного пара совпадает с изобарой и является прямой наклонной линией. В области перегретого пара изотерма изображается кривой, обращенной выпуклостью вверх и переходящей в горизонтальную прямую с увеличением степени перегрева пара (рис. 6,в).

В отличие от идеальных газов у водяного пара изотермический процесс сопровождается изменением внутренней энергии, которое равно:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1) \quad (10)$$

Количество подведенной теплоты в процессе равно:

$$q = T \cdot (s_2 - s_1) \quad (11)$$

Работа изменения объема может быть определена по формуле:

$$l = q - \Delta u = T \cdot (s_2 - s_1) - h_2 - h_1 + (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1) \quad (12)$$

3.4. Адиабатный процесс водяного пара

Адиабатный процесс в p - v -диаграмме изображается плавной кривой линией выпуклостью влево (рис. 7,а). Адиабатный процесс совершается без подвода и отвода теплоты, и энтропия рабочего тела при обратимом процессе остается постоянной $s = const$. Поэтому на h - s - и T - s -диаграммах адиабаты изображаются вертикальными прямыми отрезками (рис. 7,б,в).

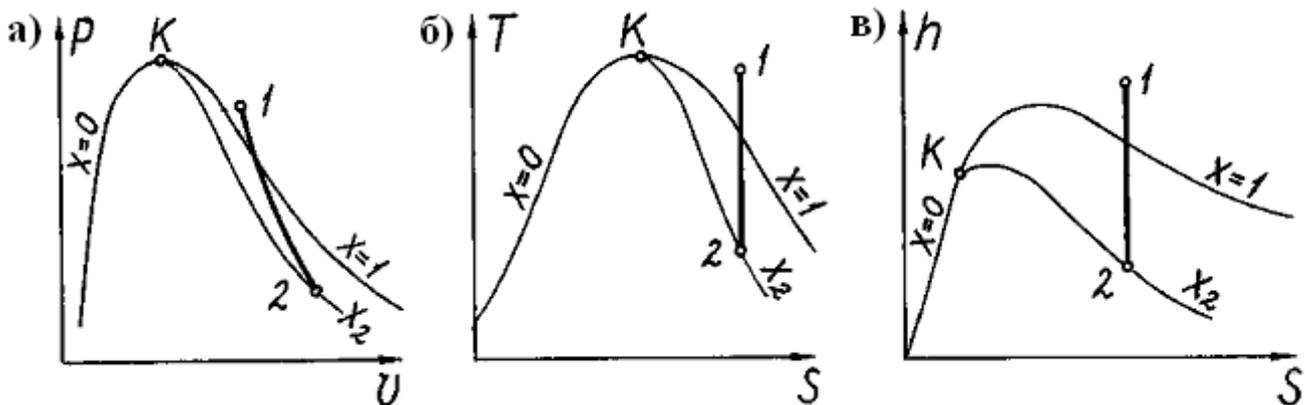


Рис. 7. Адиабатный процесс водяного пара (линия 1-2)

В этом процессе количество подведенной или отведенной теплоты равно нулю $q = 0$.

Работа в адиабатном процессе определяется из уравнения:

$$l = u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 \cdot v_1) - (h_2 - p_2 \cdot v_2) \quad (13)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1) \quad (14)$$

4. ПОНЯТИЕ О ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Влажным называется воздух, содержащий водяной пар. Влажный воздух можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяного пара.

Влажный воздух обычно рассматривают при атмосферном давлении (работа сушильных установок, вентиляционных систем, установок кондиционирования воздуха и т. д.), поэтому газы, содержащиеся в нем, можно с достаточной точностью считать идеальными. В этом случае к влажному воздуху можно применить закон Дальтона, т. е. давление влажного воздуха (смеси) равно:

$$p = p_{св} + p_{п}, \quad (15)$$

где $p_{св}$ – парциальное давление сухого воздуха, Па;

$p_{п}$ – парциальное давление водяного пара, Па.

Влажный воздух при данном давлении и температуре может содержать разное количество

водяного пара.

Насыщенным называют влажный воздух, состоящий из сухого воздуха и насыщенного водяного пара. В этом случае во влажном воздухе находится максимально возможное для данной температуры количество водяного пара. При охлаждении этого воздуха, будет происходить конденсация водяного пара. Парциальное давление водяного пара в этой смеси равно давлению насыщения p_H при данной температуре t_H .

Ненасыщенным называется влажный воздух, содержащий при данной температуре водяной пар в перегретом состоянии. Так как в нем находится не максимально возможное для данной температуры количество водяного пара, то он способен к дальнейшему увлажнению. Поэтому такой воздух используют в качестве сушильного агента в различных сушильных установках.

Абсолютной влажностью воздуха называется масса водяных паров, находящихся в 1 м^3 влажного воздуха. Абсолютная влажность равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре воздуха – t_H .

Относительной влажностью воздуха φ называется отношение действительного содержания водяного пара m_{II} в 1 м^3 влажного воздуха к максимально возможному его содержанию m_{MAX} в том же объеме влажного воздуха при данной температуре:

$$\varphi = \frac{m_{II}}{m_{MAX}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Влагосодержание d является одной из основных характеристик влажного воздуха, это количество влаги (пара) m_{II} , приходящееся на 1 кг сухого воздуха:

$$d = \frac{m_{II}}{m_{CB}} = \frac{\rho_{II}}{\rho_{CB}} \quad (17)$$

где m_{CB} – масса сухого воздуха, кг;

m_{II} – масса водяного пара, г

ρ_{II} – плотность пара, содержащегося во влажном воздухе, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_{CB} – плотность сухого воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Энтальпия влажного воздуха определяется по формуле:

$$h_{BV} = h_{CB} + h_{II} \cdot d \cdot 10^{-3}, \text{ Дж/кг} \quad (18)$$

где h_{CB} – энтальпия сухого воздуха, Дж/кг;

h_{II} – энтальпия пара, Дж/кг;

d – влагосодержание во влажном воздухе, г/кг.

Энтальпию влажного воздуха h_{BV} , так же как и влагосодержание, принято относить к 1 кг сухого воздуха или к $(1 + d)$ кг влажного воздуха.

Параметры влажного воздуха, легко определяются графическим путем при помощи $h-d$ -диаграммы влажного воздуха, предложенной в 1918 г. Л.К. Рамзиным (рис. 8). В ней по оси абсцисс откладывается влагосодержание влажного воздуха d в г/кг, а по оси ординат – энтальпия h в кДж/кг. И то, и другое отнесено к 1 кг сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе.

Для удобства расположения линий на диаграмме координатные оси проведены под углом 135° и значения d снесены на горизонталь. На диаграмме $h-d$ нанесены линии $t = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$ и представлена в графической форме зависимость $p_{II} = f(d)$, причем значения парциального давления p_{II} (мм рт. ст.) отложены справа на оси ординат. Кривая $\varphi = 100\%$ на диаграмме $h-d$ является своего рода пограничной линией, кривой насыщения. Вся область диаграммы над этой кривой соответствует влажному ненасыщенному воздуху (для различных значений φ). Область, лежащая под кривой $\varphi = 100\%$, характеризует состояние воздуха, насыщенного водяным паром.

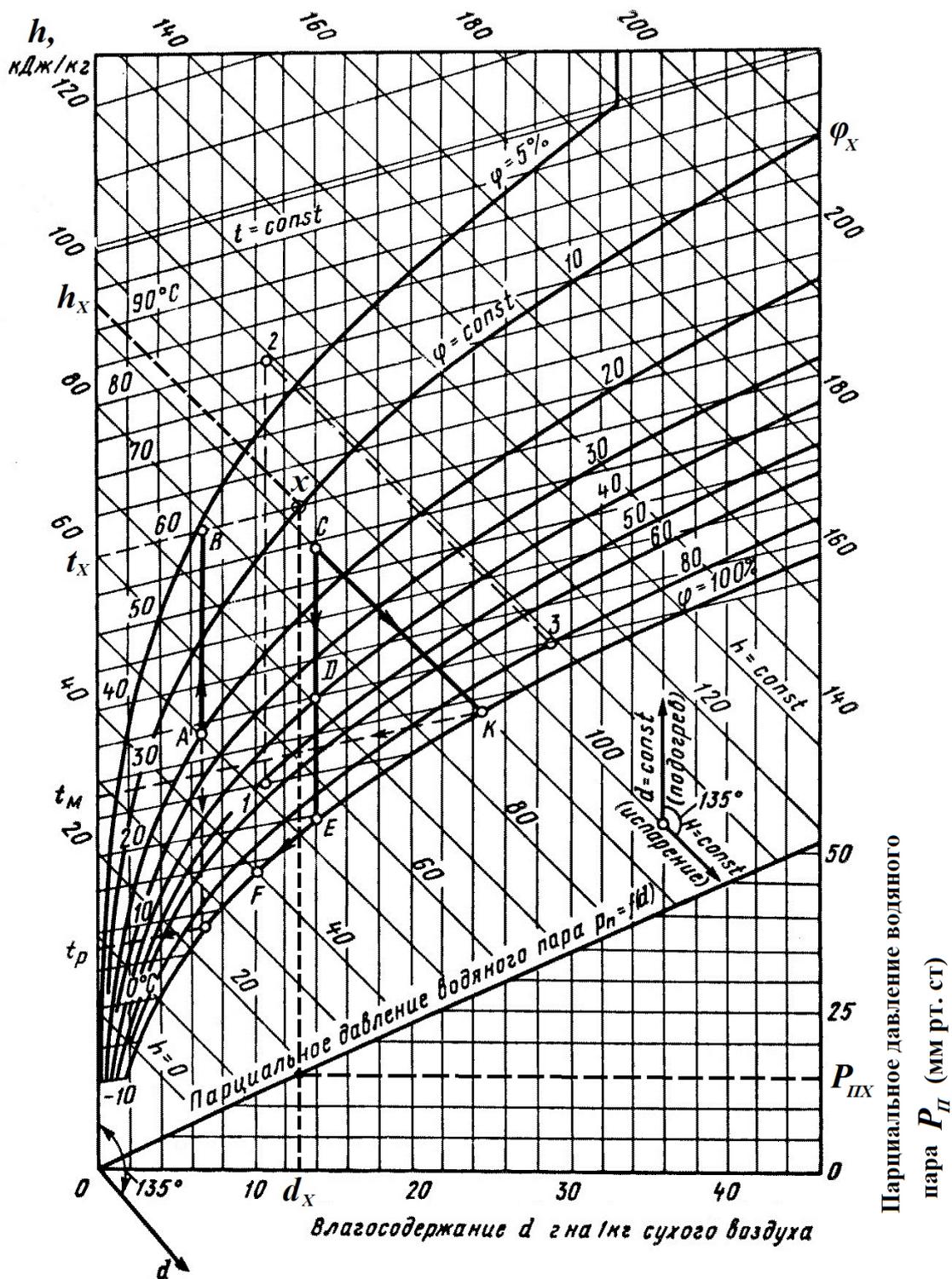


Рис. 8. h - d -диаграмма влажного воздуха

Для работы с диаграммой должны быть известны минимум два параметра, например температура воздуха t и относительная влажность φ или энтальпия h и влагосодержание d . Допустим нам известно, что температура воздуха равна $t_X = 60$ °C и относительная влажность равна $\varphi_X = 10$ %. Находим точку пересечения линии соответствующей температуре 60 °C и линии относительной влажности 10 % (точка x на h - d -диаграмме). Из полученной точки опускаем вертикальную штриховую линию вниз до пересечения с осью абсцисс и получим искомое влагосодержание $d_X = 13$ г/кг. Далее находим точку пересечения вертикальной штриховой линии с линией $p_{\pi} = f(d)$ и от полученной точки ведем горизонтальную линию вправо до оси ординат и получим искомое парциальное давление водяного пара $p_{\pi X} = 15$ мм рт. ст.

Затем снова из точки 1 проводим наклонную линию параллельно линиям энтальпий до пересечения с осью ординат и получим искомую энтальпию $h_X = 94$ кДж/кг.