

Лекция 6

Водяной пар Общие понятия и положения

В реальной практике существует множество силовых установок и теплопередающих устройств, где в качестве рабочего тела используются пары легко испаряемых, доступных и безопасных жидкостей: вода, углекислота, аммиак. Понятно, что с учетом перечисленных критериев, наиболее широко используется водяной пар: паротурбинные установки, паровые машины, в атомных установках.

Газообразное рабочее тело, по своему состоянию близко находящееся к кипящей жидкости, называется паром такой жидкости. Процесс перехода жидкости в парообразную фазу состояния называем процессом парообразования. Парообразование и переход может осуществляться путем поверхностного испарения, при низких положительных температурах.

Процесс активного перехода в пар по всему объему жидкости, за счет подвода теплоты и повышении энергетического состояния, при котором молекула жидкости, способна преодолеть силы межмолекулярного притяжения и силу внешнего давления, вылетает в пространство в газообразном состоянии, называется процессом **кипения**.

Если от пара отводить теплоту, то по мере снижения его определенного температурного и энергетического состояния, пар снова переходит в фазу жидкого состояния. Такой процесс обратного перехода называют процессом конденсации пара в жидкость. Жидкость, полученная при конденсации пара, называют конденсатом.

Физический процесс перехода вещества из твердого состояния в газообразное состояние называется сублимацией. Обратный прямой процесс перехода в твердое состояние называют десублимацией.

Если процесс перехода жидкости путем испарения или кипения происходит в открытое неограниченное пространство, то процесс перехода считается полным.

Если процесс перехода жидкости путем испарения или кипения происходит в закрытое ограниченное пространство, молекулы жидкости зависают над поверхностью жидкости. По мере их накопления и потери части энергетического состояния (снижения локальной температуры), часть молекул возвращается и переходит в жидкость. При определенном состоянии процесса кипения в закрытом сосуде устанавливается равновесный процесс перехода жидкости в пар и обратный процесс конденсации, такой пар достигает своей максимальной плотности в закрытом пространстве, при превышении которой, часть молекул воды, находящейся в парообразном состоянии, переходит в жидкость. При наступлении (установлении) такого состояния динамического перехода пар называем **насыщенным**, по плотности.

В насыщенном паре над поверхностью жидкости находятся мельчайшие капли воды. Механическая смесь мельчайших капель жидкости и сухого пара представляется как **влажный пар**. Массовая доля сухого пара в общей массе

влажного оценивается степенью сухости пара, как отношение массы сухого пара к общей массе влажного пара.

$$x = \frac{m_{с.п.}}{m_{вл.п.}}$$

Массовая доля кипящей жидкости во влажном паре оценивается степенью влажности, оценивается как $(1 - x)$.

Следовательно, для кипящей жидкости степень сухости равна нулю

$$x = \frac{m_{с.п.}}{m_{вл.п.}} = 0,$$

для сухого пара степень сухости равна единице

$$x = \frac{m_{с.п.}}{m_{вл.п.}} = 1.$$

С продолжением процесса подвода теплоты и повышения температуры, равновесие нарушается и сопровождается изменением давления и плотности. Процесс продолжается с увеличением доли воды перешедшей в состояние пара.

С момента испарения последней капли воды в пар при сохранении температуры и давления пар переходит в состояние сухого насыщенного пара.

При дальнейшем нагреве сухого насыщенного пара и сохранении давления, пар переходит в состояние перегретого пара. По своим свойствам перегретый пар приближается к газу и тем ближе, чем выше степень перегрева.

Изменение фазового состояния жидкости в процессе нагрева при определенном значении давления наглядно можно представить и проследить в координатах $P-V$ в виде горизонтальной линии постоянного давления. Характерные точки: M – двух фазное состояние воды при температуре $t_0 = 0,01^\circ C$; A' – состояние воды (жидкости) при наступлении момента объемного кипения; C – промежуточная точка влажного состояния пара;

B' – точка полного испарения жидкости и перехода в состояние сухого насыщенного пара; участок B' – переход сухого насыщенного пара в область перегретого состояния пара.

Рассмотрев изменение фазового состояния воды и удельного объема в широком диапазоне изменении давления, соединим плавной кривой характерные точки, получим фазовую диаграмму водяного пара в координатах $P-V$.

Диаграмма изменения фазового состояния воды и удельного объема в широком диапазоне изменения давления представлена на рисунке 12. Линия $A-E$ выражает зависимость удельного объема воды от давления, при $t_0 = 0,01^\circ C$.

Кривая $A-K$ выражает изменения удельного объема воды к моменту полного объемного кипения. Характеристикой кривой является график изменения удельного объема и график нулевого значения степени сухости,

$$x = \frac{m_{c.n.}}{m_{вл.п.}} = 0.$$

Кривая $A-K$ получила название нижней пограничной кривой.

Кривая $K-B$ представляет собой график изменения удельного объема сухого насыщенного пара в представленном диапазоне изменения давления. Кривая $K-B$ представляется в практике как верхняя пограничная кривая, ее характеристикой является степень сухости равной единице,

$$x = \frac{m_{c.n.}}{m_{вл.п.}} = 1.$$

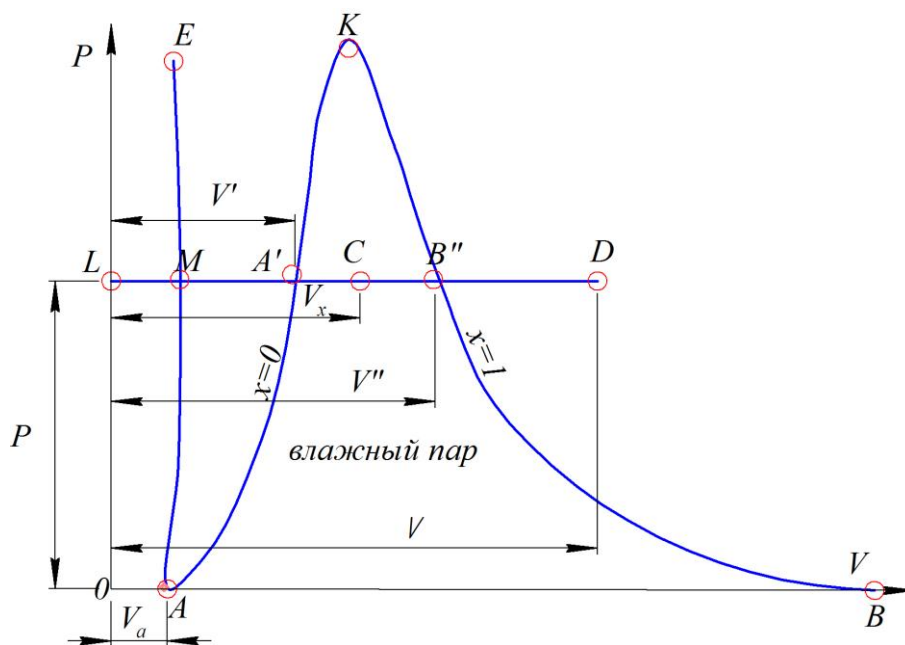


Рисунок 12 – Фазовая $P - v$ диаграмма изменения состояния воды

Точка A , отражает точку трех фазного состояния воды и на практике представляется как тройная точка воды при нулевом значении давления, изобара $A - B$.

При определенном давлении $P_k = 221,29$ бар и соответствующей температуре равной $t_k = 374,15^\circ C$, плотность и удельный объем жидкости и парообразного состояния вода-пар становятся равными и составляет $v_k = 0.00326 \text{ м}^3 / \text{кг}$. Эта точка в практике характеризуется как точка критического состояния, критическая точка K .

Область слева от кривой $A - K$ представляет жидкую фазу состояния воды в процессе нагрева до температуры кипения.

Область за линией $K - B$ представляет область перегретого пара.

Область между кривыми $A - K$ и $K - B$ представляет область влажного пара и перехода жидкой фазы воды в парообразное состояние.

Количество теплоты, которое необходимо для превращения 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар при рассматриваемом значении давления и соответствующей температуре кипения называется полной теплотой парообразования. Обозначается буквой r .

Диаграмму водяного пара и перехода воды в парообразное состояние можно также представить в координатах $T - S$.

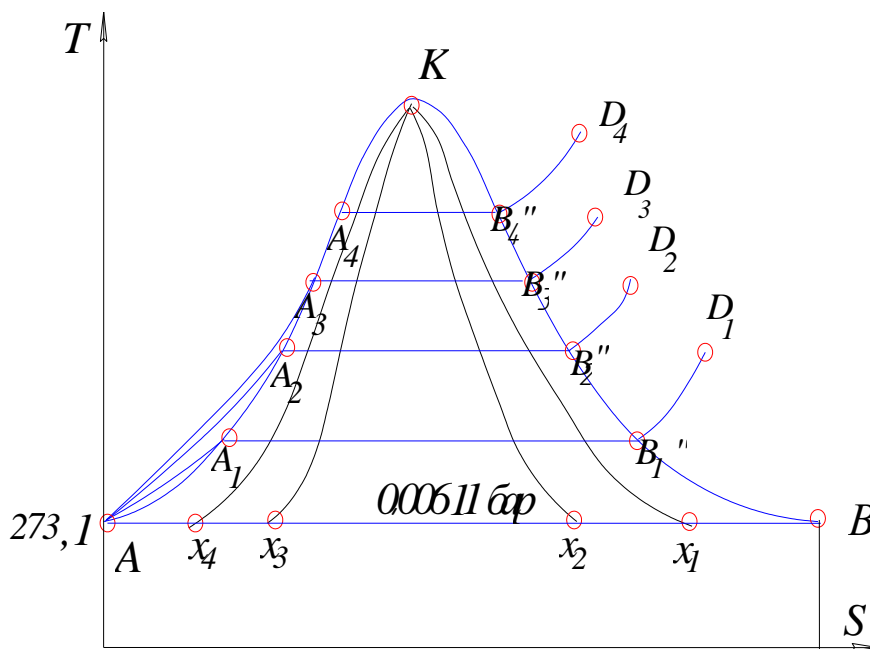


Рисунок 13 – $T - S$ – диаграмма водяного пара

Произведение значения температурного состояния влажного пара на значение изменения энтропии в процессе перехода кипящей жидкости в сухой насыщенный пар выражает теплоту парообразования.

$$q = r = T \cdot \Delta S \cdot$$

С повышением давления и температуры пара, в процессе перехода кипящей жидкости в сухой насыщенный пар, теплота парообразования – r уменьшается.

Смотреть по диаграмме водяного пара в Т-Скоординатах, рисунок 13.

В зависимости от условий состояния и физических свойств, многие из существующих веществ могут пребывать в твердом, жидком или газообразном состоянии, например вещество –ВОДА – , в зависимости от условий может находиться в твердом состоянии (лед) , в жидком состоянии (вода) и в газообразном состоянии (сухой пар) . При определенных условиях, давления и температуры, вода может находиться одновременно в двух и даже в трех фазовом состоянии.

Переход вещества (в том числе вода) из твердого состояния в газообразное называют сублимацией. Переход из твердого состояния в жидкое называем процессом плавления. Переход из жидкого состояния в газообразное называем испарением. Переход из газообразного в твердое называем десублимацией. Переход из газообразного в жидкое состояние называем конденсацией пара. Состояние вещества за пределами переходного процесса называем фазой состояния. Сам процесс перехода из одной фазы в другую называют фазовым переходом.

Количество теплоты, которое необходимо подвести для ее нагрева от температуры равной нулю градусов по шкале Цельсия до температуры кипения при определенном давлении определяется как разность энтальпий изобарного процесса подвода теплоты

$$g = i' - i'_0,$$

где i' –энтальпия кипящей жидкости;

i'_0 –энтальпия жидкости при 0^0 С, в обычной практике принимается равной нулю.

Энтальпия кипящей жидкости определяется по давлению или температуре и принимается из таблиц насыщенного водяного пара. Внутренняя энергия кипящей жидкости определяется из общего выражения для определения энтальпии

$$i' = u' + pv', \text{ отсюда } u' = i' - pv'.$$

В продолжение процесса подвода теплоты к кипящей жидкости при данном давлении будет иметь место процесс превращения кипящей жидкости в пар. Температура кипящей жидкости и влажного пара будут оставаться постоянными до момента полного превращения воды в пар и перехода жидкости в состояние сухого насыщенного пара. Количество теплоты подведенной к единице массы жидкости от момента кипения до момента полного превращения последней капли воды в сухой пар

называется полной удельной теплотой парообразования – r . Ее значение зависит от давления, соответственно от температуры процесса превращения воды в пар и уменьшается при повышенных значениях давления в процессе.

Энтальпия влажного пара i_x при определенном состоянии и степени сухости x , определится из уравнения

$$i_x = i' + rx .$$

Энтальпия сухого насыщенного пара, состояния на линии верхней пограничной кривой, соответственно определится из зависимости

$$i'' = i' + r .$$

Внутренняя энергия сухого насыщенного пара определится как

$$u'' = i'' - pv'' .$$

При продолжении процесса подвода теплоты к сухому насыщенному пару при сохранении давления происходит повышения температуры пара и пар называется перегретым. Процесс перегрева совершается в специальном отдельно выполненном устройстве – пароперегревателе. Температура перегретого пара не является функцией состояния и может принимать самые различные значения с учетом количества подведенной в процессе перегрева теплоты. Это количество соответственно определяется из обычного выражения для определения количества теплоты для нагрева газа в изобарном процессе

$$q_n = \int_{t_n}^t c_p \cdot dt$$

или

$$q_n = c_{pm} \cdot (t - t_n) ,$$

где c_p – истинная теплоемкость перегретого пара при рассматриваемом варианте давления;

c_{pm} – средняя теплоемкость перегретого пара при рассматриваемом варианте давления, от температуры t_n до текущего значения t .

Так как процесс разогрева воды до температуры кипения, превращения воды в пар и его перегрева остается изобарным, то и энтальпия перегретого пара составит

$$i = i' + r + c_{pm} \cdot (t - t_n) .$$

Внутренняя энергия перегретого пара определится из ранее приведенного математического выражения

$$u = i - pv .$$

здесь v – удельный объем перегретого пара.

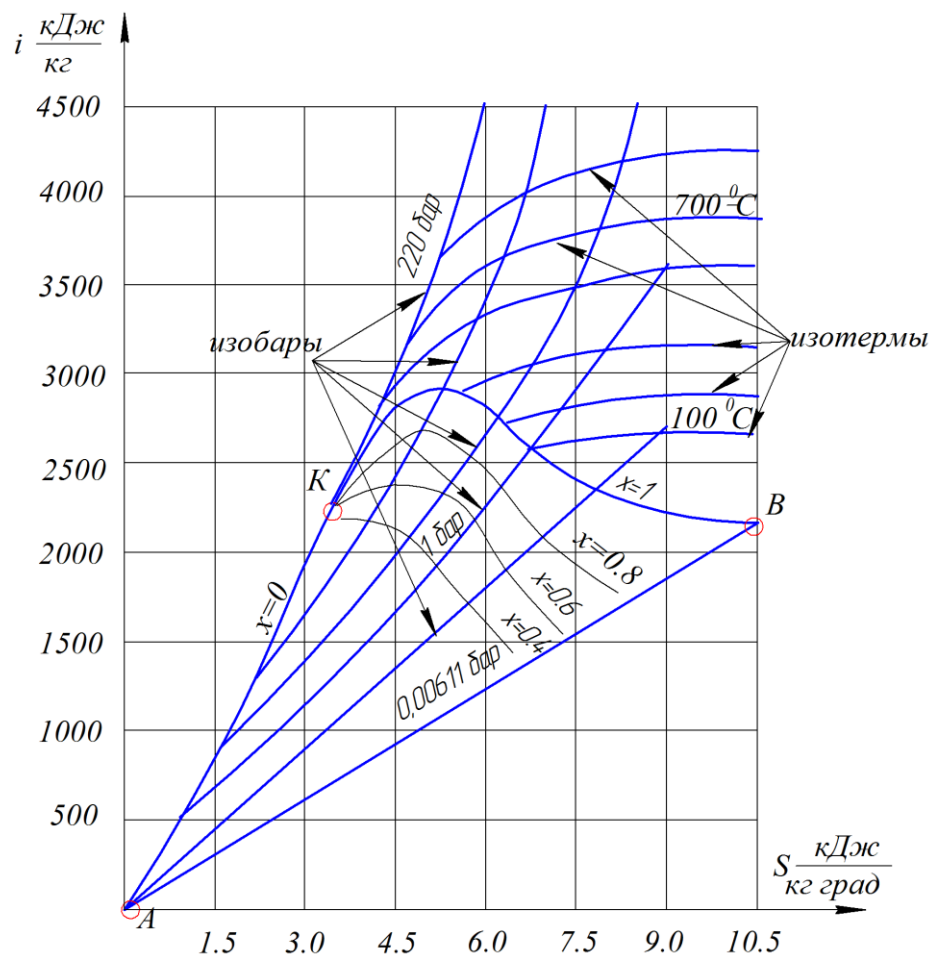


Рисунок 14 – $i - S$ диаграмма водяного пара

Все необходимые значения удельного объема, энтальпии и энтропии для выполнения расчетов при рассматриваемом давлении p , принимаются из сводных таблиц водяного пара, составленных Московским государственным энергетическим университетом под руководством проф. Вукаловича. Большое количество параметров состояния водяного пара можно также получить с использованием $i - S$ – диаграммы водяного пара, составленной г. Молье. $i - S$ – диаграммы водяного пара позволяет существенно упростит выполнение необходимых расчетов при анализе термодинамических процессов с использованием водяного пара в виде рабочего тела.

При анализе термодинамических процессов с использованием $i - S$ – диаграммы по оси абсцисс откладывается энтропия, по оси ординат энтальпия исходного и конечного состояния пара, с учетом параметров и характера процесса. Порядок выполнения расчетов с использованием $i - S$ – диаграммы включает следующие действия. По известным параметрам начального состояния наносится исходная точка 1. По ординате и абсциссе положения точки исходного состояния определяются: удельный объем – v_1 , давление – p_1 , и температура – T_1 , энтальпия и энтропия положения точки и состояния пара. С учетом характера процесса проводится линия термодинамического процесса: для изобарного процесса по линии изобары

исходного процесса, для изотермического процесса по линии изотермы, для адиабатного процесса по вертикальной линии вверх или вниз до пересечения с ранее указанным параметром конечного состояния в точке 2. Далее определяем все недостающие параметры конечного состояния пара в точке 2. Удельного объема – v_2 , давление – p_2 , и температура – T_2 , энтальпии – i_2 и энтропии – S_2 .

По полученным параметрам определяются необходимые изменения энергетического порядка.

Изменения внутреннего энергетического состояния определяются из общего уравнения для всех процессов

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1).$$

Количество теплоты участвующей в процессе:

для изохорного процесса, работа равна нулю и

$$g_v = \Delta u = u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - v(p_2 - p_1);$$

для изобарного процесса

$$g_p = i_2 - i_1;$$

для изотермического процесса

$$g_T = T(S_2 - S_1).$$

В адиабатном процессе $q=0$

Внешняя техническая работа определяется из общего для всех процессов уравнения

$$l = g - \Delta u.$$

Для адиабатного процесса, соответственно,

$$l = -\Delta u.$$

Выполнение расчетов графическим методом с использованием $i - S$ диаграммы является более простым и наглядным, однако менее точным. Вместе с тем, графический метод позволяет бегло следить за изменением агрегатного состояния пара в любом процессе не используя математический аппарат.