

ВОДЯНОЙ ПАР

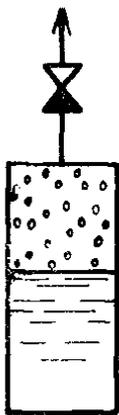
Основные понятия

Газообразные тела (с примесью одноименной жидкости в виде взвешенных мелкодисперсных частиц или без нее) принято называть *парами*.

Все пары являются реальными газами и подчиняются всем присущим этим газам закономерностям, в частности закономерностям фазовых переходов.

Образование пара из одноименной жидкости происходит посредством ее *испарения* или *кипения*. Между этими двумя процессами существует принципиальное различие.

Испарение жидкости может происходить лишь с открытой поверхностью.



С повышением температуры жидкости процесс испарения ускоряется, но принципиальный характер его остается прежним, – испарение происходит только с наружной поверхности.

Кипение жидкости может происходить и при отсутствии открытой поверхности. Сущность его состоит в том, что *генерация пара происходит в основном в объеме самой жидкости.*

Для выявления основных особенностей процесса парообразования рассмотрим испарение жидкости в ограниченное пространство при постоянном давлении.

В сосуде одновременно происходят противоположные процессы испарения жидкости и конденсации пара. Пока концентрация молекул пара в паровоздушной смеси мала, первый процесс превалирует над вторым и количество жидкости уменьшается, а количество пара увеличивается. Вместе с этим увеличивается и парциальное давление пара в паровоздушной смеси, парциальное же давление воздуха уменьшается, ибо избыток его удаляется в окружающую среду через обратный клапан и суммарное давление паровоздушной смеси остается неизменным.

С повышением парциального давления пара скорость испарения жидкости уменьшается, а скорость обратной конденсации пара возрастает и в конечном итоге наступает момент, когда скорости обоих процессов становятся одинаковыми.

Пар какого-либо вещества, находящийся в динамическом равновесии с одноименной жидкостью, называется *насыщенным*.

При подогреве жидкости равновесие между ней и насыщенным паром смещается. Происходит дополнительное парообразование и парциальное давление насыщенного пара в паровоздушной смеси возрастает, а парциальное давление воздуха соответственно уменьшается.

Отсюда следует, что *температура и давление насыщенного пара взаимосвязаны и каждой температуре соответствует вполне определенное давление насыщения.*

По мере роста температуры паровоздушной смеси содержание воздуха в ней уменьшается за счет вытеснения его паром через обратный клапан. Поэтому наступает момент, когда из сосуда удаляются последние остатки воздуха и в верхней его части остается один лишь насыщенный пар.

Этот момент отмечается тем, что давление насыщенного пара становится равным давлению окружающей среды, под которым все время находилась жидкость, а потому становится возможным кипение жидкости.

Температура, при которой давление насыщения становится равным внешнему давлению на жидкость, называется *температурой кипения*; она является функцией внешнего давления и с увеличением его возрастает.

После начала кипения в рассматриваемом сосуде продолжение подвода тепла сопровождается дальнейшим парообразованием, причем давление в нем сохраняется неизменным, т.к. излишки пара вытесняются через обратный клапан. Неизменной остается и температура, как пара, так и самой жидкости. Такой процесс продолжается до полного выкипания жидкости, и, наступает момент, когда весь сосуд оказывается заполненным лишь насыщенным паром температура которого еще равна температуре кипения.

Пар какого-либо вещества, не содержащий в себе одноименной жидкости и имеющий температуру кипения при данном давлении, называется *сухим насыщенным*.

Пар какого-либо вещества, температура которого превышает температуру кипения при данном давлении, называется *перегретым*.

Состояние перегретого пара определяется значениями двух независимых параметров, в качестве которых наиболее часто используются давление и температура.

С повышением перегрева пар по своим свойствам приближается к идеальному газу.

При изобарном отводе теплоты от сухого насыщенного пара, который можно представить себе происходящим в цилиндре с подвижным поршнем, температура его не изменяется, а вместо этого начинается конденсация пара и по всему его объему образуются мельчайшие капельки жидкости.

Насыщенный пар какого-либо вещества, содержащий в себе одноименную жидкость в виде взвешенных в нем мелкодисперсных частиц, называется *влажным паром*.

Представив себе влажный пар как механическую смесь сухого насыщенного пара и равномерно распределенной в нем жидкости, можно определить степень сухости x влажного пара как массовую долю содержащегося в нем сухого насыщенного пара.

Очевидно, величина x может изменяться от единицы (что соответствует сухому насыщенному пару) до нуля (что соответствует кипящей воде).

Таким образом, состояние влажного пара определяется значениями двух независимых параметров, – давления (или температуры) и степени сухости.

Влажный пар и его параметры

Объем влажного пара можно представить как сумму объемов двух компонентов.

$$J = J'(1 - x) + J''x$$

где x – степень сухости пара.

Первое слагаемое представляет собой объем жидкости, содержащейся в 1 кг влажного пара, а второе – объем содержащегося в нем сухого насыщенного пара.

Для превращения 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар при постоянном давлении ему необходимо сообщить определенное количество теплоты, называемое *теплотой парообразования*:

$$r = i'' - i'$$

Часть теплоты парообразования расходуется на увеличение внутренней энергии, связанное с совершением работы против сил взаимного притяжения молекул (*внутренняя теплота парообразования*). Остальная часть теплоты парообразования расходуется на работу расширения, не связанную с наличием сил молекулярного взаимодействия (*внешняя теплота парообразования*).

С помощью теплоты парообразования r энтальпия влажного пара легко определяется следующим образом. В процессе парообразования при $p = \text{const}$

$$dq = di = r dx$$

где x – степень сухости влажного пара.

Интегрируя, получаем:

$$i_x - i' = \int_0^x r dx = r \int_0^x dx = rx$$

Энтропия влажного пара:

$$s_2 = \int_1^2 \frac{dq}{T} + s_1$$

а для данного случая

$$s_x = \int_0^x \frac{r dx}{T_n} + s' = \frac{r}{T_n} \int_0^x dx + s' = \frac{rx}{T_n} + s' \quad (*)$$

где T_n – температура кипения при заданном постоянном давлении.

Для сухого насыщенного пара $x=1$, поэтому

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

откуда получаем

$$r / T_H = s'' - s'$$

Формула (*) может быть записана так

$$s_x = s' + (s'' - s')x$$

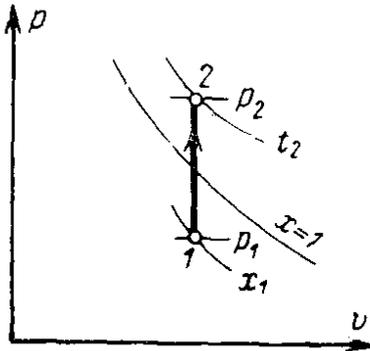
Расчет основных процессов водяного пара

В общем случае расчет процессов водяного пара состоит в определении параметров пара в начальном и конечном состояниях и вычислении подводимой теплоты, изменения внутренней энергии и работы изменения объема, связанных уравнением первого закона термодинамики

$$q = \Delta u + l$$

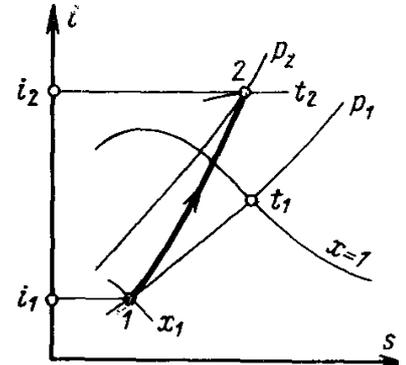
Для этого должны быть заданы значения двух каких-либо параметров в начальном состоянии пара и двух параметров в конечном состоянии.

Изохорный процесс в $p\vartheta$ -диаграмме изображается вертикальной прямой 1-2. В этом процессе $l=0$, поэтому для него



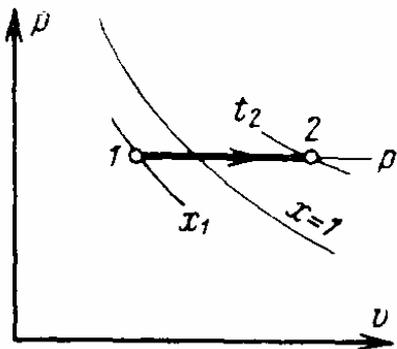
$$q = \Delta u = u_2 - u_1 \quad \text{или} \quad q = i_2 - i_1 - J(p_2 - p_1)$$

В is -диаграмме график этого процесса изображается линией 1-2. Начальная точка 1 находится на пересечении изобары p_1 и линии постоянной степени сухости x_1 , а конечная точка 2 – на пересечении изобары p_2 и изотермы t_2 .

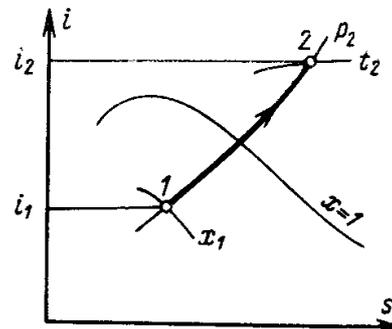


Изобарный процесс в $p\vartheta$ -диаграмме изображается горизонтальной прямой. Для этого процесса

$$\Delta u = q - l = i_2 - i_1 - p(J_2 - J)$$

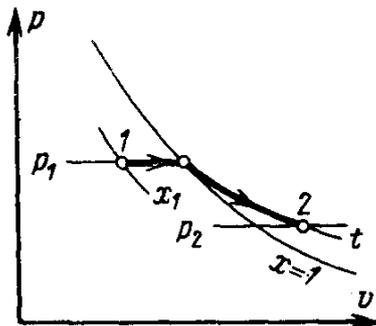


В is -диаграмме график этого процесса изображается линией 1-2, у которой начальная точка 1 находится на пересечении изобары процесса с линией постоянной степени



сухости x_1 , а конечная точка 2 – на пересечении той же изобары с изотермой t_2 .

Изотермический процесс в $p\upsilon$ -диаграмме изображается ломаной линией, которая в области влажного пара имеет вид горизонтальной прямой, а в области перегретого пара – кривой, постепенно переходящей (по мере удаления от линии $x=1$) в гиперболу.



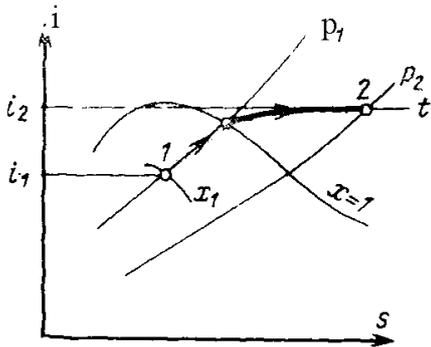
Теплоту этого процесса удобно определять по формуле

$$q = T(s_2 - s_1)$$

В отличие от идеальных газов у водяного пара изотермический процесс сопровождается изменением внутренней энергии.

В соответствии с этим работа изменения объема:

$$l = q - \Delta u = T(s_2 - s_1) - (i_2 - i_1) + (p_2 J_2 - p_1 J_1)$$



В i - s -диаграмме график этого процесса изображается ломаной линией 1-2, которая в области влажного пара имеет вид наклонной прямой, а в области перегретого пара – кривой, обращенной выпуклостью вверх и постепенно (по мере удаления от линии $x = 1$) приближающейся к горизонтальной прямой.

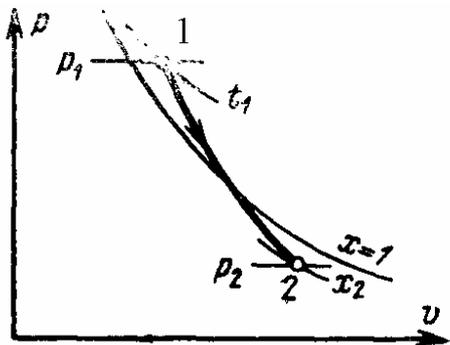
Начальная точка находится на пересечении изотермы процесса (совпадающей здесь с изобарой p_1) с линией постоянной степени

сухости x_1 , а конечная точка – на пересечении той же изотермы с изобарой p_2 .

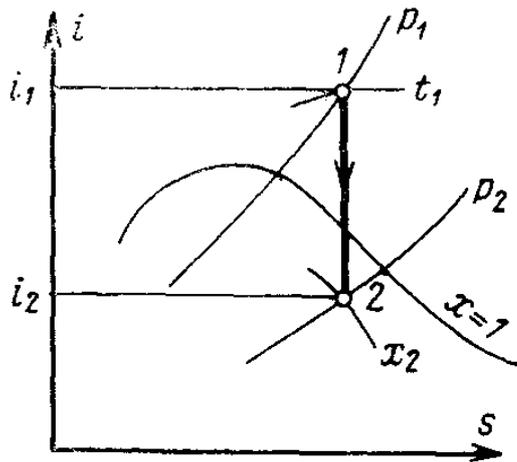
Адиабатный процесс в $p\upsilon$ -диаграмме изображается плавной кривой, более крутой, чем верхняя пограничная кривая.

В этом процессе $q=0$, поэтому

$$l = -\Delta u = (i_1 - p_1 J_1) - (i_2 - p_2 J_2) = i_1 - i_2 - (p_1 J_1 - p_2 J_2)$$



При адиабатном расширении перегретого пара он становится сначала сухим насыщенным, а затем влажным, причем с понижением давления степень сухости его уменьшается.



В i - s -диаграмме график этого процесса имеет вид вертикальной прямой 1-2. Начальная точка этого процесса 1 находится на пересечении изобары p_1 с изотермой t_1 , а конечная точка 2 – на пересечении изобары p_2 с линией постоянной степени сухости x_2 .