

Лекция 18. Конденсация пара. Общие сведения

Основные положения

Конденсация представляет собой процесс перехода пара (газа) в жидкое или твердое состояние (фазовый переход первого рода) [2, 9, 10, 12-17].

Конденсация пара часто встречается на практике. В конденсаторах паровых турбин пар конденсируется на охлаждаемых трубах; конденсация пара осуществляется в опреснительных установках и многочисленных теплообменных аппаратах.

Выделение при фазовом превращении теплоты неразрывно связывает процесс конденсации пара с теплообменом.

Процесс конденсации возможен только при *докритических* состояниях газа (пара) и может быть осуществлен путем его охлаждения или в результате такого сжатия, чтобы при достигнутых значениях температуры и давления конденсированная фаза была термодинамически более устойчивой, чем газообразная. Если при этом температура и давление больше их значений, соответствующих тройной точке для данного вещества, то образуется жидкая конденсированная фаза, если меньше – пар переходит в твердое состояние.

Виды конденсации. Конденсация может происходить как в объеме пара, так и на охлаждаемой поверхности теплообмена. В первом случае образование конденсированной фазы может происходить самопроизвольно при значительном переохлаждении пара относительно температуры насыщения и на холодных жидких или твердых частицах, вводимых в пар.

Во многих областях техники и промышленности часто приходится иметь дело с конденсацией пара в жидкое состояние на охлаждаемых поверхностях теплообмена. Эта задача прежде всего и будет рассмотрена ниже. При этом будем полагать, что конденсирующийся пар не содержит примесей других паров или газов, т. е. является чистым.

Конденсация насыщенного или перегретого пара на твердой поверхности теплообмена происходит, если температура поверхности меньше температуры насыщения при данном давлении ($T_w < T_{\text{нас}}$; поэтому при конденсации перепад температур равен $\Delta T = T_{\text{нас}} - T_w$). При этом на поверхности может образоваться пленка конденсата. В ряде случаев поверхность тела может быть покрыта отдельными каплями конденсата.

Первый вид конденсации, когда жидкая конденсированная фаза образуется на поверхности теплообмена в виде устойчивой пленки, называется пленочной конденсацией, а второй – когда происходит образование капель – капельной. Пленочная конденсация имеет место, если конденсат смачивает данную поверхность теплообмена. Если же конденсат не смачивает поверхность, то происходит капельная конденсация.

При установившейся работе конденсационных устройств вода, как правило, смачивает поверхности теплообмена, и происходит пленочная конденсация. Капельная конденсация наблюдается при пуске теплообменного аппарата, когда на поверхностях стенок имеются различные, в том числе и масляные, загрязнения, при конденсации ртутного пара и в некоторых других случаях.

Изменение агрегатного состояния вещества происходит при постоянной температуре и характеризуется выделением (при конденсации) или поглощением (при кипении) теплоты фазового перехода (скрытой теплоты парообразования для воды) – r , Дж/кг (см. рис. 3.1).

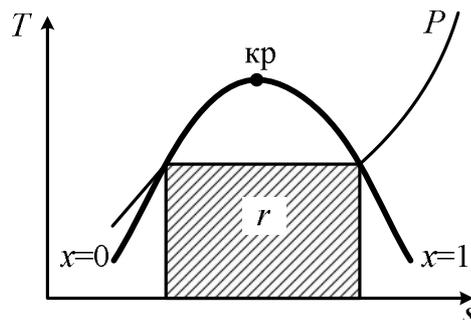


Рис. 3.1. Фазовая (T, s) – диаграмма водяного пара

При стационарном процессе конденсации или кипения тепловой поток фазового перехода равен:

$$Q = rG,$$

где Q – тепловой поток от пара к стенке при конденсации или от стенки к кипящей жидкости при кипении, Вт; G – расход конденсата или паровой фазы, кг/с.

Термическое сопротивление передаче теплоты

При капельной конденсации водяного пара теплоотдача может быть во много раз больше, чем при пленочной (порядка 5-10 раз). Это объясняется тем, что пленка конденсата является большим термическим сопротивлением передаче теплоты фазового перехода от поверхности конденсации к стенке. При капельной конденсации в силу разрыва пленки это сопротивление гораздо меньше.

В общем случае помимо термического сопротивления конденсата можно выделить дополнительное сопротивление.

Будем полагать, что поверхность конденсации плоская (или достаточно близкая к плоской) и толщина слоя конденсата, находящегося на стенке, намного больше радиуса действия межмолекулярных сил (рис. 3.2).

Термическое сопротивление передаче теплоты от пара к стенке можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$R \equiv \frac{t_{\text{пов}} - t_w}{q} \equiv \frac{1}{\alpha} = R_{\delta} + R_{\varphi}, \quad (3.1)$$

где $t_{\text{пов}}$ и t_w – соответственно температуры пара и поверхности стенки; q – плотность теплового потока; α – коэффициент теплоотдачи от пара к стенке. В уравнении (3.1) первое слагаемое R_{δ} представляет собой *термическое сопротивление пленки конденсата*. Второе слагаемое R_{φ} , которое называется

термическим сопротивлением на границе раздела фаз (*межфазным термическим сопротивлением*), не является термическим сопротивлением в его обычном понимании. Появление этого сопротивления обусловлено скачком температуры на границе раздела паровой и жидкой фаз.

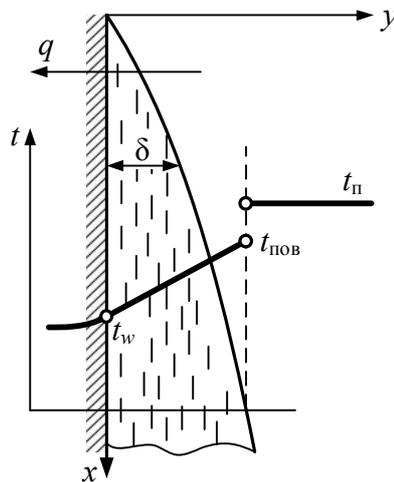


Рис. 3.2. Распределение температуры при пленочной конденсации

Согласно кинетической теории материи на поверхности раздела фаз должен иметь место скачок температуры, потому что количество молекул пара, ударяющихся о поверхность жидкости и захватываемых ею (конденсирующихся), превосходит количество молекул, отрывающихся (испаряющихся) за то же время от поверхности жидкости вследствие теплового движения. Превышение количества захватываемых молекул над количеством испускаемых и приводит к видимому процессу конденсации. Кроме того, не все молекулы, достигшие поверхности, захватываются жидкостью, часть из них отражается. Для чистого водяного пара с достаточным приближением можно считать, что температурный скачок на границе раздела фаз отсутствует, т. е. все молекулы, подошедшие к поверхности, захватываются жидкостью, поэтому термическое сопротивление фазового перехода равно нулю. Для других веществ данных о процессе конденсации недостаточно, поэтому для них допускается это же предположение.

Термическое сопротивление пленки конденсата R_δ зависит от режима течения. Поперек ламинарно текущей пленки теплота переносится теплопроводностью, через турбулентную – дополнительно и конвекцией. Переход от ламинарного течения пленки к турбулентному определяют по значению числа Рейнольдса пленки. Для пленки

$$Re = \frac{\bar{w}\delta}{\nu_{пл}},$$

где \bar{w} – средняя скорость течения пленки в рассматриваемом поперечном сечении; δ – толщина пленки конденсата в этом же сечении; $\nu_{пл}$ – коэффициент кинематический вязкости конденсата (пленки).

Вычисленное таким образом число Рейнольдса является местной величиной. Опытные данные различных авторов показывают, что критическое число Рейнольдса может изменяться в пределах примерно от 60 до 500. Наиболее вероятным значением $Re_{кр}$ для случая конденсации практически неподвижного пара на вертикальной поверхности полагают значение [10]

$$Re_{кр} = 400.$$

В процессе конденсации расход конденсата тесно связан с тепловым потоком. При конденсации сухого насыщенного пара им отдается теплота фазового перехода r . Кроме того, поскольку температура поверхности стенки t_w меньше температуры поверхности конденсата $t_{пов}$, соприкасающейся с паром, стенке отдается и часть теплоты конденсата. Происходит переохлаждение конденсата в среднем до температуры, которая лежит между t_w и $t_{пов}$. Во многих практически важных случаях теплота переохлаждения пренебрежимо мала по сравнению с теплом фазового перехода, тогда $Q = rG$.

Расход конденсата в каком-либо произвольно выбранном сечении движущейся пленки

$$G = \rho_{пл} \bar{w} f = \rho_{пл} \bar{w} \delta l_z,$$

где l_z – размер стенки в направлении, нормальном к плоскости чертежа (см. рис. 3.2).

Следовательно,

$$\bar{w}\delta = \frac{G}{\rho_{\text{пл}} l_z}.$$

На участке от $x = 0$ до x образовалось G , кг/с, конденсата и в единицу времени была передана теплота

$$Q = \bar{q}F = \bar{\alpha}\Delta tF = rG.$$

Отсюда

$$\bar{w}\delta = \frac{G}{\rho_{\text{пл}} l_z} = \frac{\bar{q}x}{r\rho_{\text{пл}}}$$

и

$$\text{Re} = \frac{\bar{w}\delta}{\nu_{\text{пл}}} = \frac{G}{\rho_{\text{пл}} \nu_{\text{пл}} l_z} = \frac{\bar{q}x}{r\rho_{\text{пл}} \nu_{\text{пл}}} = \frac{\bar{\alpha}\Delta t x}{r\mu_{\text{пл}}}.$$

Таким образом, при названных условиях число Рейнольдса характеризует не только гидродинамику, но еще и интенсивность теплообмена.

Так как $Q = \bar{q}F = \bar{q}x l_z = rG = r\rho_{\text{пл}} \bar{w}\delta l_z$, то, учитывая, что

$$\bar{q} = \frac{1}{x} \int_0^x q dx \quad \text{и} \quad \bar{w} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_x dy,$$

можно записать:

$$\frac{Q}{l_z} = \int_0^x q dx \quad \text{и} \quad \frac{rG}{l_z} = r\rho_{\text{пл}} \int_0^{\delta} w_x dy$$

(при этом r и $\rho_{\text{пл}}$ считаем постоянными).

Приравняв правые части последних соотношений и продифференцировав левую и правую части полученного уравнения, по x , окончательно получим следующее уравнение для местной плотности теплового потока:

$$q = r\rho_{\text{пл}} \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} w_x dy. \quad (3.2)$$

Уравнение (3.2) позволяет вычислить плотность теплового потока, если известно распределение скоростей в пленке.

В дальнейшем при рассмотрении конкретных задач теплообмена будем различать случаи конденсации движущегося и неподвижного пара. При движении пара силы трения, возникающие на границе раздела фаз, могут, как подтормаживать, так и ускорять пленку конденсата в зависимости от взаимного направления движения конденсата и пара. В результате может изменяться толщина пленки и, как следствие, термическое сопротивление и теплоотдача.