

Лекция 32. Тепло- и массоотдача в двухкомпонентных средах

Тепло- и массоотдача. Стефанов поток

В движущейся однокомпонентной среде теплота переносится теплопроводностью и конвекцией. Этот процесс называется конвективным теплообменом. По аналогии перенос вещества в многокомпонентной среде совместно происходящими процессами молекулярной диффузии и конвекции называют конвективным массообменом [16-21].

Практический интерес представляют процессы теплообмена и массообмена при испарении, сублимации (возгонке), конденсации, сорбции, десорбции и т. п. В этом случае система является *гетерогенной*. Поверхность жидкой (или твердой) фазы играет роль, аналогичную роли твердой стенки в процессах теплоотдачи без сопутствующей диффузии.

Аналогично теплоотдаче конвективный массообмен между жидкой или твердой поверхностью и окружающей средой называют *массоотдачей*.

В рассматриваемых случаях тепло- и массоотдача идут одновременно. Для расчетов теплоотдачи используют закон Ньютона – Рихмана

$$q = \alpha(t_w - t_0),$$

где q измеряется в Вт/м².

Для расчетов массоотдачи используют уравнение

$$j_i = \beta(\rho_{i,w} - \rho_{i,0}) \quad (6.13)$$

или

$$j_i = \rho\beta(m_{i,w} - m_{i,0}) \quad (6.14)$$

где j_i – плотность потока массы, кг/(м²·с); β – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций диффундирующего вещества, м/с; индексы «и» и «0» показывают, что концентрация диффузионного вещества берется соответственно на поверхности раздела фаз и вдали от нее. Используя

уравнение состояния идеальных газов, выражение (6.13) или (6.14) можно записать в следующем виде:

$$j_i = \beta_P (P_{i,w} - P_{i,0})$$

здесь β_P – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений $\Delta P = P_{i,w} - P_{i,0}$.

Коэффициенты массоотдачи β и β_P связаны соотношением

$$\beta = \beta_P R T.$$

Рассмотрим испарение жидкости в парогазовую среду. Будем полагать, что полное давление по всему объему парогазовой смеси неизменно, а температурные разности пренебрежимо малы. В этом случае можно не учитывать термо- и бародиффузию. Отсутствуют возбудители движения, посторонние для рассматриваемого процесса испарения.

Концентрация пара изменяется от значения $m_{п,w}$ на поверхности испаряющейся жидкости до значения $m_{п,0}$ вдали от поверхности раздела (рис. 6.3). Так как $m_{п} + m_{г} = 1$, то

$$\frac{\partial m_{п}}{\partial y} = -\frac{\partial m_{г}}{\partial y}. \quad (a)$$

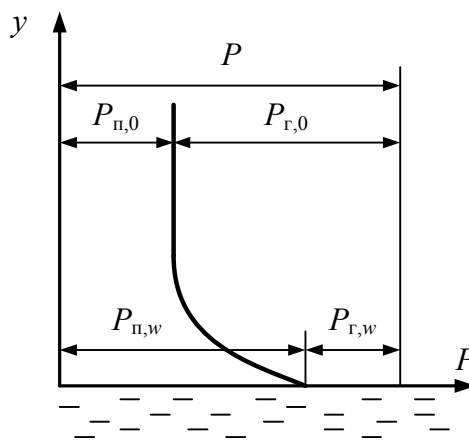


Рис. 6.3. Распределение концентрация пара и газа у поверхности испарения

Следовательно, газ должен диффундировать в направлении, обратном направлению диффузии пара. Пар может свободно диффундировать в паро-

газовую среду. Для газа же поверхность жидкости является непроницаемой преградой. Вследствие этого количество газа у поверхности жидкости должно непрерывно увеличиваться. Но в случае стационарного режима распределение концентрации не изменяется во времени. Поэтому перемещение газа к поверхности испарения должно компенсироваться конвективным потоком парогазовой смеси, направленным от жидкости. Этот поток называют *стефановым потоком*. Его скорость обозначим через $w_{с.п.}$.

Суммарный поток пара будет равен сумме молекулярного и конвективного потоков

$$j_{п, w} = -\rho D \left(\frac{\partial m_{п}}{\partial y} \right) + \rho m_{п, w} w_{с.п., w} \quad (6.15)$$

Суммарный поток газа у поверхности жидкости равен нулю:

$$j_{г, w} = -\rho D \left(\frac{\partial m_{г}}{\partial y} \right) + \rho m_{г, w} w_{с.п., w} = 0.$$

Из последнего уравнения с учетом уравнения (а) получаем:

$$w_{с.п., w} = -\frac{D}{m_{г, w}} \left(\frac{\partial m_{п}}{\partial y} \right)_w.$$

Подставив полученное значение $w_{с.п., w}$ в уравнение (6.15), получим:

$$j_{п, w} = -\rho D \left(\frac{m_{п} + m_{г}}{m_{г}} \right)_w \left(\frac{\partial m_{п}}{\partial y} \right)_w = -\rho D \frac{1}{m_{г, w}} \left(\frac{\partial m_{п}}{\partial y} \right)_w \quad (6.16)$$

Уравнение (6.16) впервые было получено Стефаном. Это уравнение отличается от закона диффузии (6.2), относящегося к условиям беспрепятственного распространения обоих компонентов смеси, дополнительным множителем $1/m_{г, w}$. Этот множитель учитывает конвективный (стефанов) поток, вызванный непроницаемостью поверхности испарения для газа. Как следует из изложенного, стефанов конвективный поток появляется и при отсутствии вынужденной или свободной тепловой конвекции.

Приравняв правые части уравнений (6.13) и (6.16), получим:

$$\beta(m_{п,w} - m_{п,0}) = -D \frac{1}{m_{г,w}} \left(\frac{\partial m_{п}}{\partial y} \right)_w$$

или

$$\beta = -D \frac{1}{m_{г,w}} \frac{\left(\frac{\partial m_{п}}{\partial y} \right)_w}{m_{п,w} - m_{п,0}}.$$

Рассмотренный процесс испарения жидкости в парогазовую смесь соответствует условиям полупроницаемой поверхности, т. е. поверхности, проницаемой для одного (активного) компонента смеси (пара) и непроницаемой для другого (инертного) компонента (газа). Полупроницаемая поверхность наблюдается и при конденсации пара из парогазовой смеси.

В случае полностью проницаемой поверхности через нее проходят оба компонента. Поверхность является полностью проницаемой, например, при конденсации обоих компонентов бинарной паровой смеси. Такой же эффект может иметь место и при испарении некоторых растворов.

Будем исходить из того, что и в случае тепло- и массообмена

$$\alpha = \frac{\lambda}{t_w - t_0} (\nabla t)_w.$$

Такое определение коэффициента теплоотдачи не отличается от ранее использованного.

Общее количество теплоты q , отдаваемой или воспринимаемой жидкостью и парогазовой смесью, равно сумме теплоты, переданной конвективным теплообменом, и теплоты, переданной диффундирующей массой в виде энтальпии.

Диффузионный пограничный слой

Аналогично понятиям гидродинамического и теплового пограничных слоев можно ввести понятие *диффузионного пограничного слоя*. В его пределах концентрация активного компонента смеси изменяется от $m_{i,w}$ на поверхности раздела фаз до $m_{i,0}$ на внешней границе слоя (рис. 6.4). Внутри пограничного слоя справедливо условие $\partial m_i / \partial y \neq 0$; вне диффузионного пограничного слоя и на его внешней границе выполняются условия

$$m_i = m_{i,0}; \partial m_i / \partial y = 0.$$

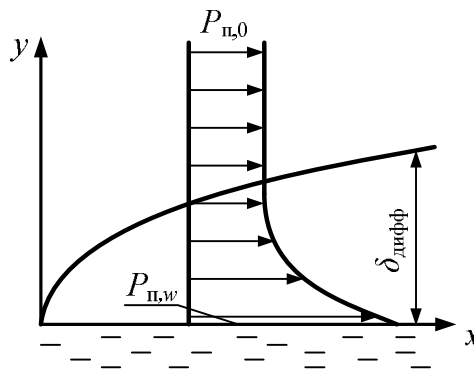


Рис. 6.4. Диффузионный пограничный слой

Диффузионный пограничный слой может образовываться в процессах испарения, сублимации, вдува вещества через пористую стенку, при конденсации пара из парогазовой смеси и т. д.

Для диффузионного пограничного слоя дифференциальное уравнение массообмена может быть упрощено. В случае продольного омывания плоской неограниченной пластины поле концентрации в диффузионном пограничном слое можно описать следующим уравнением:

$$\rho \left(w_x \frac{\partial m_i}{\partial x} + w_y \frac{\partial m_i}{\partial y} \right) = - \frac{\partial j_{y,i}}{\partial y}, \quad (6.17)$$

где $j_{y,i}$ – поперечная составляющая плотности потока массы i -го компонента смеси. Для турбулентного течения

$$j_{y,i} = -\rho D \frac{\partial m_i}{\partial y} - \rho \varepsilon_j \frac{\partial m_i}{\partial y} = -\rho (D + \varepsilon_j) \frac{\partial m_i}{\partial y}; \quad (6.18)$$

здесь ε_j – коэффициент турбулентного переноса вещества, м²/с.

Для турбулентного течения величины m_i , w_x , w_y , $j_{y,i}$ входящие в уравнения (6.17) и (6.18), являются осредненными во времени величинами.

Дифференциальное уравнение диффузионного пограничного слоя (6.17) аналогично уравнениям теплового и гидродинамического пограничных слоев и справедливо при идентичных условиях.

Дополнительным условием справедливости уравнения (6.17) является выполнение неравенства $w_{y,w} \ll w_0$, согласно которому поперечная составляющая скорости, обусловленная процессами испарения, вдува и т. п., должна быть намного меньше скорости вынужденного продольного течения. Если, например, $w_{y,w} \gg w_0$, то по сути дела будет преобладать движение по нормали к поверхности раздела фаз. Продольное движение при этом будет несущественно.