

В.Н. Павлечко, доцент; В.Н. Гуляев, доцент

ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ В ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЯХ ПРИ ПРОТИВОТОКЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОСТИ

The effect of liquid mixing on the average logarithmic and arithmetic forces at concurrent in the existing models is studied. The extreme cases when the liquid on a plate is completely mixed and is moved in the ideal superseding mode are considered.

Перемешивание жидкости на ступени контакта при противотоке оказывает заметное влияние на эффективность массообмена. В работе [1] перемешивание жидкости учитывается количеством φ полностью перемешанной жидкости. Эффективность массообмена при противотоке в этом случае предложено определяется по формуле

$$E_g = \frac{(1-h) \frac{L}{mV} + \varphi - h_1}{\frac{x_n - y_{n-1}}{m} - h \frac{L}{mV} - h_1} \quad (1)$$

В работе [2] предложены варианты массообмена, отличающиеся условиями связи идеальной и реальной тарелок, свойственные моделям Мерффри [3, 4] и Хаузена [4, 5]. В указанных вариантах расстояния h и h_1 принимают предельные значения ноль или единицу. В первом варианте $h = 0$, $h_1 = 1$, во втором $h = 1$, $h_1 = 0$, в третьем $h = h_1 = 0$. С учетом этого эффективность по (1) равна

$$E_{g,\varphi 1} = \frac{\left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi\right)(x_n - x_{n-1})}{x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}}; \quad (2)$$

$$E_{g,\varphi 2} = \frac{\varphi(x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_n}{m}}; \quad (3)$$

$$E_{g,\varphi 3} = \frac{\left(\frac{L}{mV} + \varphi\right)(x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m}}. \quad (4)$$

При перемешивании жидкости ее составы равны (рис.):
при поступлении на тарелку

$$x_n = (1 - \varphi)x_n + \varphi x_{n-1}; \quad (5)$$

при уходе с тарелки

$$x_k = x_{n-1}. \quad (6)$$

$$\Delta x_{n1} = \left[\frac{L}{mV} - 1 + \varphi\right] \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{g,\varphi 1}}; \quad (7)$$

$$\Delta x_{k1} = \left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi \right) (1 - E_{g,\varphi 1}) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{g,\varphi 1}}; \quad (8)$$

Начальные и конечные разности концентраций по ходу движения паровой фазы

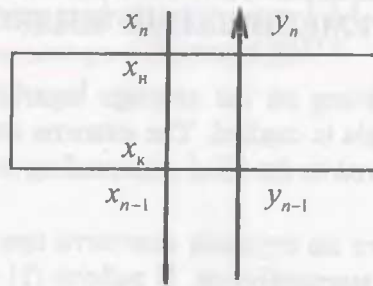


Рис. Схема изменения концентраций на тарелке при противотоке

$$\Delta x_{n2} = \left(\frac{L}{mV} E_{g,\varphi 2} + \varphi - E_{g,\varphi 2} \right) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{g,\varphi 2}}; \quad (9)$$

$$\Delta x_{k2} = \varphi (1 - E_{g,\varphi 2}) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{g,\varphi 2}}; \quad (10)$$

$$\Delta x_{n3} = \left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi \right) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{g,\varphi 3}}; \quad (11)$$

$$\Delta x_{k3} = \left(\frac{L}{mV} + \varphi \right) (1 - E_{g,\varphi 3}) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{g,\varphi 3}}. \quad (12)$$

Средние логарифмические движущие силы, выведенные из известной формулы $\Delta x_{cp} = (\Delta x_n - \Delta x_k) / \ln (\Delta x_n / \Delta x_k)$ и выраженные параметрами:

жидкости

$$\Delta x_{cp,\varphi,1} = \frac{\left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi \right) (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{1}{1 - E_{g,\varphi 1}}}; \quad (13)$$

$$\Delta x_{cp,\varphi,2} = \frac{\left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi \right) (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{g,\varphi 2} + \varphi - E_{g,\varphi 2}}{\varphi (1 - E_{g,\varphi 2})}}; \quad (14)$$

$$\Delta x_{cp,\varphi,3} = \frac{\left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi \right) (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} + \varphi - E_{g,\varphi 3}}{\left(\frac{L}{mV} + \varphi \right) (1 - E_{g,\varphi 3})}}; \quad (15)$$

паровой фазы

$$\Delta y_{\text{ср,}\varphi,\text{л1}} = \frac{\left[1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}\right] (y_n - y_{n-1})}{\ln \frac{1}{1 - E_{\text{г,}\varphi 1}}}; \quad (16)$$

$$\Delta y_{\text{ср,}\varphi,\text{л2}} = \frac{\left[1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}\right] (y_n - y_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{\text{г,}\varphi 2} + \varphi - E_{\text{г,}\varphi 2}}{1 - E_{\text{г,}\varphi 2}}}; \quad (17)$$

$$\Delta y_{\text{ср,}\varphi,\text{л3}} = \frac{\left[1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}\right] (y_n - y_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} + \varphi - E_{\text{г,}\varphi 3}}{\left(\frac{L}{mV} + \varphi\right) (1 - E_{\text{г,}\varphi 3})}}. \quad (18)$$

После уравнивания левых и правых частей (13) – (15) получаем соотношение эффективности при противотоке

$$\frac{\frac{L}{mV} - 1 + \varphi}{E_{\text{г,}\varphi 1}} = \frac{L}{mV} - 1 + \frac{1}{E_{\text{г,}\varphi 2}} = \frac{\frac{L}{mV} + \varphi}{E_{\text{г,}\varphi 3}} - 1, \quad (19)$$

которое совпадает с аналогичной формулой [6], что подтверждает справедливость проведенных вычислений.

Разность начальной и конечной движущих сил при противотоке значительно меньше, чем при прямотоке. Кроме того, при противотоке возможны частные случаи, когда равновесная и рабочая линии становятся параллельными на определенной ступени контакта ($L/V = m$) и некоторые величины становятся невычислимыми. В этом случае предпочтительнее использовать среднеарифметические движущие силы, выраженные параметрами:

жидкости

$$\Delta x_{\text{ср,}\varphi,\text{а1}} = \left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi\right) \left(\frac{1}{E_{\text{г,}\varphi 1}} - \frac{1}{2}\right) (x_n - x_{n-1}); \quad (20)$$

$$\Delta x_{\text{ср,}\varphi,\text{а2}} = \left(\frac{\varphi}{E_{\text{г,}\varphi 2}} - \frac{1 - \varphi}{2} + \frac{L}{2mV}\right) (x_n - x_{n-1}); \quad (21)$$

$$\Delta x_{\text{ср,}\varphi,\text{а3}} = \left[\left(\frac{L}{mV} + \varphi\right) \left(\frac{1}{E_{\text{г,}\varphi 3}} - \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2}\right] (x_n - x_{n-1}); \quad (22)$$

паровой фазы

$$\Delta y_{\text{ср,}\varphi,\text{а1}} = \left[1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}\right] \left(\frac{1}{E_{\text{г,}\varphi 1}} - \frac{1}{2}\right) (y_n - y_{n-1}); \quad (23)$$

$$(24) \quad \Delta y_{\text{ср},\varphi,2} = \left[\frac{mV}{L} \left(\frac{\varphi}{E_{g,\varphi 2}} - \frac{1+\varphi}{2} \right) + \frac{1}{2} \right] (y_n - y_{n-1}); \quad (24)$$

$$(25) \quad \Delta y_{\text{ср},\varphi,3} = \left[\left(1 + \varphi \frac{mV}{L} \right) \left(\frac{1}{E_{g,\varphi 3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{mV}{2L} \right] (y_n - y_{n-1}). \quad (25)$$

Крайние значения средних движущих сил при полном перемешивании жидкости ($\varphi = 1$) и при его отсутствии ($\varphi = 0$) приведены в табл.

Таблица

Предельные значения средних движущих сил при противотоке

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
Первый вариант		
$\frac{\Delta x_{\text{ср},1}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{\ln \frac{1}{1 - E_{g,nn1}}}$	$\frac{\frac{L}{mV} - 1}{\ln \frac{1}{1 - E_{g1}}}$
$\frac{\Delta y_{\text{ср},1}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{\ln \frac{1}{1 - E_{g,nn1}}}$	$\frac{1 - \frac{mV}{L}}{\ln \frac{1}{1 - E_{g1}}}$
$\frac{\Delta x_{\text{ср},1}}{(x_n - x_{n-1})}$	$\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{g,nn1}} - \frac{1}{2} \right)$	$\left(\frac{L}{mV} - 1 \right) \left(\frac{1}{E_{g1}} - \frac{1}{2} \right)$
$\frac{\Delta y_{\text{ср},1}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{E_{g,nn1}} - \frac{1}{2}$	$\left(1 - \frac{mV}{L} \right) \left(\frac{1}{E_{g1}} - \frac{1}{2} \right)$
Второй вариант		
$\frac{\Delta x_{\text{ср},2}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{g,nn2} + 1 - E_{g,nn2}}{1 - E_{g,nn2}}}$	0
$\frac{\Delta y_{\text{ср},2}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{g,nn2} + 1 - E_{g,nn2}}{1 - E_{g,nn2}}}$	0
$\frac{\Delta x_{\text{ср},2}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{1}{E_{g,nn2}} - 1 + \frac{L}{2mV}$	$\frac{L}{2mV} - \frac{1}{2}$
$\frac{\Delta y_{\text{ср},2}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{g,nn2}} - 1 \right) + \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} - \frac{L}{2mV}$

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
Третий вариант		
$\frac{\Delta x_{cp,л3}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{\ln \left(\frac{\frac{L}{mV} + 1 - E_{g,nn3}}{\left(\frac{L}{mV} + 1 \right) (1 - E_{g,nn3})} \right)}$	$\frac{\frac{L}{mV} - 1}{\ln \frac{1 - \frac{mV}{L} E_{g3}}{1 - E_{g3}}}$
$\frac{\Delta y_{cp,л3}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{\ln \left(\frac{\frac{L}{mV} + 1 - E_{g,nn3}}{\left(\frac{L}{mV} + 1 \right) (1 - E_{g,nn3})} \right)}$	$\frac{1 - \frac{mV}{L}}{\ln \frac{1 - \frac{mV}{L} E_{g3}}{1 - E_{g3}}}$
$\frac{\Delta x_{cp,a3}}{x_n - x_{n-1}}$	$\left(\frac{L}{mV} + 1 \right) \left(\frac{1}{E_{g,nn3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2}$	$\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{g3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2}$
$\frac{\Delta y_{cp,a3}}{y_n - y_{n-1}}$	$\left(1 + \frac{mV}{L} \right) \left(\frac{1}{E_{g,nn3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{mV}{2L}$	$\frac{1}{E_{g3}} - \frac{1}{2} - \frac{mV}{2L}$

Средние логарифмические движущие силы без перемешивания жидкости в табл. аналогичны результатам работ [7, 8], что подтверждает справедливость приведенных выкладок. Равенство нулю средних логарифмических движущих сил и независимость их среднеарифметических значений от эффективности во втором варианте при идеальном вытеснении жидкости указывают на его ограниченность. Вследствие этого второй вариант из дальнейшего рассмотрения исключаем.

Совпадение выражений Δx_{cp} и Δy_{cp} при полном перемешивании с аналогичными формулами при прямотоке [9] указывает на то, что при $\varphi = 1$ форма организации потоков не сказывается на величинах движущих сил.

Эффективности массообмена при отсутствии перемешивания ($\varphi = 0$) из (2) и (4) равны

$$E_{g1} = \frac{\left(\frac{L}{mV} - 1 \right) (x_n - x_{n-1})}{x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}}; \quad (26)$$

$$E_{g1} = \frac{\frac{L}{mV} (x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m}}. \quad (27)$$

Совместным решением (2), (4), (20), (22), (26), (27) и соответствующих среднеарифметических движущих сил без перемешивания жидкости из табл. находим соотношения:

$$\Delta x_{cp,\varphi,a1} = \Delta x_{cp,\varphi,a3} = \frac{1}{2} \left[x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m} - \varphi (x_n - x_{n-1}) \right]; \quad (28)$$

$$\Delta x_{cp,a1} = \Delta x_{cp,a3} = \frac{1}{2} \left(x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m} \right) \quad (29)$$

или в обобщенном виде

$$\Delta x_{\text{ср,ф,а}} = \Delta x_{\text{ср,а}} - \frac{\Phi}{2}(x_n - x_{n-1}). \quad (30)$$

Аналогичное соотношение получено для параметров паровой фазы

$$\Delta y_{\text{ср,ф,а}} = \Delta y_{\text{ср,а}} - \Phi \frac{mV}{2L}(y_n - y_{n-1}). \quad (31)$$

При полном перемешивании жидкости формулы (30) и (31) имеют вид

$$\Delta x_{\text{ср,пп,а}} = \Delta x_{\text{ср,а}} - 0,5(x_n - x_{n-1}); \quad (32)$$

$$\Delta y_{\text{ср,пп,а}} = \Delta y_{\text{ср,а}} - \frac{mV}{2L}(y_n - y_{n-1}). \quad (33)$$

Проведенный анализ показывает значительное влияние перемешивания на движущие силы при противотоке. Это влияние одинаково во всех рассмотренных моделях при полном перемешивании жидкости.

Обозначения

Δ – разность концентраций; E – эффективность массообмена; h, h_1 – безразмерные расстояния, на которых выравниваются составы соответственно пара и жидкости на идеальной и реальной тарелках; L – молярный поток жидкости; m – коэффициент фазового равновесия; V – молярный поток пара; x, y – соответственно концентрация легколетучего компонента в жидкости и паровой фазе; Φ – количество полностью перемешанной жидкости; степень перемешивания жидкости. Индексы: а – среднеарифметическое значение; ф – учет перемешивания жидкости; г – противоток; к – конечное значение; л – среднее логарифмическое значение; н – начальное значение; n – номер рассматриваемой тарелки; $n-1$ – номер предыдущей тарелки по ходу движения пара; пп – полное перемешивание жидкости; ср – среднее значение; ж – жидкая фаза; у – паровая фаза; 1–3 – варианты массообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлечко В.Н. // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 2. – С. 38–42.
2. Павлечко В.Н. // Труды БГТУ. Сер. химии и хим. технологии. – 1998. – Вып. VI. – С. 138–144.
3. Murphree E. V. // Ind. Eng. Chem. – 1925. – Vol. 17, № 7. – P. 747–750.
4. Medina A. G., Ashton N., McDermott C. // Chem. Eng. Sci. – 1979. – Vol. 34, № 9. – P. 1105–1112.
5. Hausen H. // Chem. Ing. Tech. – 1953. – Bd. 25, № 10. – S. 595–597.
6. Павлечко В.Н. // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов: Материалы МНТК. Минск, 9–10 ноября 2000 г. – Мн.: БГТУ, 2000 – С. 74–76.
7. Павлечко В.Н., Плехов И.М. // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. в-в. – 2000. – Вып. VIII. – С. 131–138.
8. Павлечко В.Н., Плехов И.М., Гуляев В.Н. // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 5. – С. 171–176.
9. Павлечко В.Н., Плехов И.М. // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. в-в. – 2004. – Вып. XII.