

ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ В ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЯХ ПРИ ПЕРЕКРЕСТНОМ ТОКЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОСТИ

The effect of liquid mixing on the average logarithmic and arithmetic forces at cross-current 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.

В работах [1, 2] рассмотрено влияние перемешивания жидкости на движущие силы применительно к прямотоку и противотоку. В них перемешивание жидкости на тарелке оценивается количеством φ идеально перемешанной ее части [3, 4]. Остальное количество $(1 - \varphi)$ жидкости движется по тарелке в режиме идеального вытеснения. Причем обе части жидкости равномерно распределены одна в другой.

В работе [5] предложены варианты массообмена, которые различаются условиями связи идеальной и реальной тарелок, характерными для моделей Мерфри и Хаузена.

Эффективности в указанных вариантах равны:

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

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

$$E_{k,\varphi 3} = \frac{\left(\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2}\right)(x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m}}. \quad (3)$$

При перемешивании жидкости ее концентрации изменяются по ходу движения (рисунки):

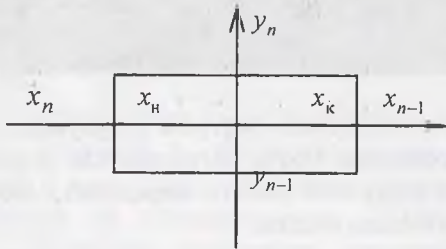


Рисунок. Изменение концентраций на тарелке при перекрестном токе

- в начале тарелки

$$x_n = (1 - \varphi)x_n + \varphi x_{n-1}; \quad (4)$$

- в конце тарелки

$$x_k = x_{n-1}. \quad (5)$$

Начальные и конечные по ходу движения жидкости разности концентраций, выраженные параметрами жидкой фазы:

- в первом варианте

$$\Delta x_{n1} = \left[\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 1}) \right] \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{k,\varphi 1}}; \quad (6)$$

$$\Delta x_{k1} = \left(\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2} \right) (1 - E_{k,\varphi 1}) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{k,\varphi 1}}; \quad (7)$$

- во втором варианте

$$\Delta x_{n2} = \left[\frac{L}{mV} E_{k,\varphi 2} + \frac{1+\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 2}) \right] \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{k,\varphi 2}}; \quad (8)$$

$$\Delta x_{k2} = \frac{1+\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 2}) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{k,\varphi 2}}; \quad (9)$$

- в третьем варианте

$$\Delta x_{n3} = \left[\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 3}) \right] \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{k,\varphi 3}}; \quad (10)$$

$$\Delta x_{k3} = \left(\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2} \right) (1 - E_{k,\varphi 3}) \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{k,\varphi 3}}. \quad (11)$$

Средние логарифмические движущие силы, выраженные параметрами:

- жидкости:

$$\Delta x_{k,\varphi n1} = \frac{\frac{L}{mV} (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 1})}{\left(\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2}\right) (1 - E_{k,\varphi 1})}}; \quad (12)$$

$$\Delta x_{k,\varphi n2} = \frac{\frac{L}{mV} (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{k,\varphi 2} + \frac{1+\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 2})}{\frac{1+\varphi}{2} (1 - E_{k,\varphi 2})}}; \quad (13)$$

$$\Delta x_{k,\varphi,n3} = \frac{\frac{L}{mV}(x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2}(1-E_{k,\varphi3})}{\left(\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2}\right)(1-E_{k,\varphi3})}}; \quad (14)$$

• паровой фазы:

$$\Delta y_{k,\varphi,n1} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\ln \frac{\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2}(1-E_{k,\varphi1})}{\left(\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2}\right)(1-E_{k,\varphi1})}}; \quad (15)$$

$$\Delta y_{k,\varphi,n2} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{k,\varphi2} + \frac{1+\varphi}{2}(1-E_{k,\varphi2})}{\frac{1+\varphi}{2}(1-E_{k,\varphi2})}}; \quad (16)$$

$$\Delta y_{k,\varphi,n3} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\ln \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2}(1-E_{k,\varphi3})}{\left(\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2}\right)(1-E_{k,\varphi3})}}. \quad (17)$$

В результате приравнивания соответствующих левых и правых частей формул (12)–(14) или (15)–(17) получено соотношение между эффективностями вариантов при перекрестном токе

$$\frac{\frac{L}{mV} - \frac{1-\varphi}{2}}{E_{k,\varphi1}} = \frac{L}{mV} - 1 + \frac{1+\varphi}{2E_{k,\varphi2}} = \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1+\varphi}{2}}{E_{k,\varphi3}} - 1, \quad (18)$$

которое идентично аналогичной зависимости (14) работы [5] и подтверждает справедливость приведенных выкладок.

Из сравнения формул (12)–(17) с аналогичными выражениями прямотока и противотока следует меньшая зависимость движущих сил при перекрестном токе от перемешивания жидкости. Это обусловлено тем, что при перекрестном токе рассматривается некоторое усредненное состояние жидкости на тарелке, т. е. частичное ее перемешивание.

В тех случаях, когда отношение начальных и конечных движущих сил больше 0,5 и не превышает 2, средние логарифмические силы могут быть заменены средними арифметическими величинами, что несколько упрощает соответствующие зависимости и вычисления с их использованием. Для рассматриваемых вариантов указанные условия конкретизируются следующими выражениями:

$$-\frac{\frac{2L}{mV} - 1 + \varphi}{\frac{2L}{mV} + 1 - \varphi} \leq E_{k,\varphi1} \leq \frac{\frac{2L}{mV} - 1 + \varphi}{\frac{4L}{mV} - 1 + \varphi}; \quad (19)$$

$$-\frac{1 + \varphi}{\frac{4L}{mV} - 1 - \varphi} \leq E_{k,\varphi2} \leq \frac{1 + \varphi}{\frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}; \quad (20)$$

$$-\frac{\frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}{\frac{2L}{mV} - 1 - \varphi} \leq E_{k,\varphi3} \leq \frac{\frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}{\frac{4L}{mV} + 1 + \varphi}. \quad (21)$$

При соблюдении условий (19)–(21) средние арифметические движущие силы равны:

• по параметрам жидкости:

$$\frac{\Delta x_{k,\varphi,a1}}{x_n - x_{n-1}} = \frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi1}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1-\varphi}{2} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi1}} - 1 \right); \quad (22)$$

$$\frac{\Delta x_{k,\varphi,a2}}{x_n - x_{n-1}} = \frac{L}{2mV} + \frac{1+\varphi}{2} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi2}} - 1 \right); \quad (23)$$

$$\frac{\Delta x_{k,\varphi,a3}}{x_n - x_{n-1}} = \frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi3}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1+\varphi}{2} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi3}} - 1 \right); \quad (24)$$

• по параметрам паровой фазы:

$$\frac{\Delta y_{k,\varphi,a1}}{y_n - y_{n-1}} = \frac{1}{E_{k,\varphi1}} - \frac{1}{2} - \frac{1-\varphi}{2} \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi1}} - 1 \right); \quad (25)$$

$$\frac{\Delta y_{k,\varphi,a2}}{y_n - y_{n-1}} = \frac{1}{2} + \frac{1+\varphi}{2} \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi2}} - 1 \right); \quad (26)$$

$$\frac{\Delta y_{k,\varphi,a3}}{y_n - y_{n-1}} = \frac{1}{E_{k,\varphi3}} - \frac{1}{2} - \frac{1+\varphi}{2} \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,\varphi3}} - \frac{1}{2} \right). \quad (27)$$

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

Средние движущие силы при отсутствии перемешивания жидкости в таблице аналогичны результатам работы [6], что также подтверждает справедливость проведенных вычислений, а при полном перемешивании – соответствующим выражениям при прямотоке [1] и противотоке [2], что указывает на независимость средних движущих сил от форм организации потоков в этом случае.

Подставим значения эффективности из уравнений (1)–(3) в соответствующие формулы (12)–(17):

Предельные значения средних движущих сил при перекрестном токе

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
Первый вариант		
$\frac{\Delta x_{k,n1}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{\ln \frac{1}{1 - E_{k,n,1}}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{1 + \frac{E_{k1}}{\frac{2L}{mV} - 1} \ln \frac{1}{1 - E_{k1}}}$
$\frac{\Delta y_{k,n1}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{\ln \frac{1}{1 - E_{k,n,1}}}$	$\frac{1}{1 + \frac{E_{k1}}{\frac{2L}{mV} - 1} \ln \frac{1}{1 - E_{k1}}}$
$\frac{\Delta x_{k,n1}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,n,1}} - \frac{1}{2} \right)$	$\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k1}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{k1}} - 1 \right)$
$\frac{\Delta y_{k,n1}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{E_{k,n,1}} - \frac{1}{2}$	$\frac{1}{E_{k1}} - \frac{1}{2} - \frac{mV}{2L} \left(\frac{1}{E_{k1}} - 1 \right)$
Второй вариант		
$\frac{\Delta x_{k,n2}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{k,n,2} + 1 - E_{k,n,2}}{1 - E_{k,n,2}}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{\ln \frac{\frac{2L}{mV} E_{k2} + 1 - E_{k2}}{1 - E_{k2}}}$
$\frac{\Delta y_{k,n2}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{k,n,2} + 1 - E_{k,n,2}}{1 - E_{k,n,2}}}$	$\frac{1}{\ln \frac{\frac{2L}{mV} E_{k2} + 1 - E_{k2}}{1 - E_{k2}}}$
$\frac{\Delta x_{k,n2}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{L}{2mV} + \frac{1}{E_{k,n,2}} - 1$	$\frac{L}{2mV} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{k2}} - 1 \right)$
$\frac{\Delta y_{k,n2}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{2} + \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,n,2}} - 1 \right)$	$\frac{1}{2} + \frac{mV}{2L} \left(\frac{1}{E_{k2}} - 1 \right)$
Третий вариант		
$\frac{\Delta x_{k,n3}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{1 - \frac{E_{k,n,3}}{\frac{L}{mV} + 1} \ln \frac{1}{1 - E_{k,n,3}}}$	$\frac{\frac{L}{mV}}{1 - \frac{E_{k3}}{\frac{2L}{mV} + 1} \ln \frac{1}{1 - E_{k3}}}$
$\frac{\Delta y_{k,n3}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{1 - \frac{E_{k,n,3}}{\frac{L}{mV} + 1} \ln \frac{1}{1 - E_{k,n,3}}}$	$\frac{1}{1 - \frac{E_{k3}}{\frac{2L}{mV} + 1} \ln \frac{1}{1 - E_{k3}}}$

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
$\frac{\Delta x_{k,a3}}{x_n - x_{n-1}}$	$\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,n,n3}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{E_{k,n,n3}} - 1$	$\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k3}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{k3}} - 1 \right)$
$\frac{\Delta y_{k,a3}}{y_n - y_{n-1}}$	$\frac{1}{E_{k,n,n3}} - \frac{1}{2} + \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,n,n3}} - 1 \right)$	$\frac{1}{E_{k3}} - \frac{1}{2} + \frac{mV}{2L} \left(\frac{1}{E_{k3}} - 1 \right)$

$$\Delta x_{k,\varphi,n1} = \Delta x_{k,\varphi,n2} = \Delta x_{k,\varphi,n3} =$$

$$= \frac{\frac{L}{mV} (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_{n-1}}{m} - \varphi (x_n - x_{n-1})}{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_n}{m} - \varphi (x_n - x_{n-1})}}; \quad (28)$$

$$\Delta y_{k,\varphi,n1} = \Delta y_{k,\varphi,n2} = \Delta y_{k,\varphi,n3} =$$

$$= \frac{y_n - y_{n-1}}{\ln \frac{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_{n-1}}{m} - \varphi (x_n - x_{n-1})}{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_n}{m} - \varphi (x_n - x_{n-1})}}. \quad (29)$$

Из формул (28) и (29) следует, что средние логарифмические движущие силы при перекрестном токе одни и те же в рассмотренных вариантах массообмена, если в их зависимостях отсутствует эффективность. Перемешивание жидкости в этих вариантах одинаково влияет на движущие силы.

В частных случаях, когда перемешивание отсутствует или на тарелке жидкость полностью перемешана, движущие силы соответственно равны:

$$\Delta x_{k,n} = \frac{\frac{L}{mV} (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_{n-1}}{m}}{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_n}{m}}}; \quad (30)$$

$$\Delta y_{k,n} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\ln \frac{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_{n-1}}{m}}{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_n}{m}}}; \quad (31)$$

$$\Delta x_{k,n,n} = \frac{\frac{L}{mV} (x_n - x_{n-1})}{\ln \frac{mx_{n-1} - y_{n-1}}{mx_{n-1} - y_n}}; \quad (32)$$

$$\Delta y_{k,n,n} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\ln \frac{mx_{n-1} - y_{n-1}}{mx_{n-1} - y_n}}. \quad (33)$$

Эффективности массообмена без перемешивания жидкости на ступени контакта ($\varphi = 0$) из выражений (1)–(3) принимают вид:

$$E_{k1} = \frac{\left(\frac{L}{mV} - \frac{1}{2} \right) (x_n - x_{n-1})}{x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}}; \quad (34)$$

$$E_{k2} = \frac{x_n - x_{n-1}}{2 \left(x_n - \frac{y_n}{m} \right)}; \quad (35)$$

$$E_{k3} = \frac{\left(\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} \right) (x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m}}. \quad (36)$$

При решении уравнений (1)–(3), (22)–(24), (34)–(36) и подстановке соответствующих значений среднеарифметических движущих сил без перемешивания жидкости (см. таблицу) находим соотношения:

$$\Delta x_{k,\varphi,a1} = \Delta x_{k,\varphi,a2} = \Delta x_{k,\varphi,a3} = \frac{1}{2} \left[x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m} - \varphi (x_n - x_{n-1}) \right]; \quad (37)$$

$$\Delta x_{k,a1} = \Delta x_{k,a2} = \Delta x_{k,a3} = \frac{1}{2} \left(x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m} \right), \quad (38)$$

или в обобщенном виде

$$\Delta x_{k,\varphi,a} = \Delta x_{k,a} - \frac{\varphi}{2} (x_n - x_{n-1}). \quad (39)$$

Аналогичное соотношение получено для параметров паровой фазы:

$$\Delta y_{k,\varphi,a} = \Delta y_{k,a} - \varphi \frac{mV}{2L} (y_n - y_{n-1}). \quad (40)$$

Из выражений (37) и (38) видно, что перемешивание жидкости на тарелке снижает движущую силу массообмена. При полном перемешивании жидкости формулы (39) и (40) имеют вид

$$\Delta x_{k,n,n,a} = \Delta x_{k,a} - 0,5 (x_n - x_{n-1}); \quad (41)$$

$$\Delta y_{k,p,n,a} = \Delta y_{k,a} - \frac{mV}{2L}(y_n - y_{n-1}). \quad (42)$$

Проведенный анализ показал, что перемешивание жидкости заметно влияет на движущие силы при перекрестном движении фаз. Это влияние менее значимое по сравнению с прямотоком и противотоком, поскольку в модели перекрестного тока состав жидкости на тарелке частично усредняется и принимается равным средней величине между входной и выходной концентрациями.

Средние логарифмические и арифметические движущие силы не зависят от варианта массообмена, а при идеальном перемешивании жидкости указанные движущие силы не зависят также от формы организации потоков.

Обозначения

Δ – разность концентраций; E – эффективность массообмена; 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: a – среднее арифметическое значение; ϕ – учет перемешивания жидкости; k – конечное значение; k – перекрестный ток; l – среднее логарифмическое значение; n – начальное значение; n – номер рассматриваемой тарелки; $n - 1$ – номер предыдущей тарелки по ходу движения пара; p, p – полное пе-

ремешивание жидкости; x – жидкая фаза; y – паровая фаза; 1–3 – варианты массообмена.

Литература

1. Павлечко В. Н., Плехов И. М. Движущие силы в известных моделях при прямотоке и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в. – 2004. – Вып. XII. – С. 137–142.
2. Павлечко В. Н., Гуляев В. Н. Движущие силы в известных моделях при противотоке и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в. – 2004. – Вып. XII. – С. 131–137.
3. Павлечко В. Н., Плехов И. М. Способ учета влияния перемешивания жидкости в процессах ректификации // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–10 нояб. 2000 г. – Мн., 2000. – С. 70–71.
4. Павлечко В. Н. Комплексная модель эффективности ректификационных тарелок // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 3. – С. 177–180.
5. Павлечко В. Н., Гуляев В. Н. Исследование эффективности ректификационных тарелок при перекрестном движении фаз с учетом перемешивания жидкости // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в. – 2001. – Вып. IX. – С. 74–80.
6. Павлечко В. Н., Плехов И. М., Гуляев В. Н. О взаимосвязи кинетических показателей процесса ректификации и движущих сил // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 5. – С. 171–176.