

ЧИСЛА ЕДИНИЦ ПЕРЕНОСА В ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЯХ ПРИ ПЕРЕКРЕСТНОМ ТОКЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОСТИ

The effect of liquid mixing on the average logarithmic and arithmetic the numbers of transfer units 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. The relations between the average arithmetic forces and the number of transfer units at total liquid mixing and without it are found.

В работе [1] установлено, что перемешивание жидкости на тарелке, оцениваемое долей ϕ полностью перемешанной ее части [2, 3], когда другая ее часть $(1 - \phi)$, равномерно распределенная в первой, движется по тарелке в режиме идеального вытеснения, оказывает заметное влияние на величины движущих сил. Причем рассмотрены три варианта массообмена, различающиеся условиями связи идеальной и реальной тарелок, которые характерны для моделей Мерфри и Хаузена.

При использовании известных формул

$$N_x = \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta x_{k,x}}; \quad (1)$$

$$N_y = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta y_{k,x}}; \quad (2)$$

из выражений движущих сил при перекрестном токе [1] получаем соответствующие значения чисел единиц переноса для всех трех вариантов массообмена в зависимости от степени ϕ перемешивания жидкости на тарелке:

- по параметрам жидкости:

$$N_{k,x,\phi,n1} = \frac{1 + \frac{E_{k,\phi1}(1-\phi)}{2L} - 1 + \phi}{\ln \frac{mV}{1 - E_{k,\phi1}}} \cdot \frac{L}{mV}; \quad (3)$$

$$N_{k,x,\phi,a1} = \frac{1}{\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,\phi1}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1-\phi}{2} \left(\frac{1}{E_{k,\phi1}} - 1 \right)}; \quad (4)$$

$$N_{k,x,\phi,n2} = \frac{\ln \frac{2L}{mV} \frac{E_{k,\phi2}}{1+\phi} + 1 - E_{k,\phi2}}{1 - E_{k,\phi2}} \cdot \frac{L}{mV}; \quad (5)$$

$$N_{k,x,\phi,a2} = \frac{1}{\frac{L}{2mV} + \frac{1+\phi}{2} \left(\frac{1}{E_{k,\phi2}} - 1 \right)}; \quad (6)$$

$$N_{k,x,\phi,n3} = \frac{1 - \frac{E_{k,\phi3}(1+\phi)}{2L} + 1 + \phi}{\ln \frac{mV}{1 - E_{k,\phi3}}} \cdot \frac{L}{mV}; \quad (7)$$

$$N_{k,x,\phi,a3} = \frac{1}{\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,\phi3}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1+\phi}{2} \left(\frac{1}{E_{k,\phi3}} - 1 \right)}; \quad (8)$$

- по параметрам паровой фазы:

$$N_{k,y,\phi,n1} = \ln \frac{1 + \frac{E_{k,\phi1}(1-\phi)}{2L} - 1 + \phi}{1 - E_{k,\phi1}}; \quad (9)$$

$$N_{k,y,\phi,a1} = \frac{1}{\frac{1}{E_{k,\phi1}} - \frac{1}{2} - \frac{1-\phi}{2} \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,\phi1}} - 1 \right)}; \quad (10)$$

$$N_{k,y,\phi,n2} = \ln \frac{\frac{2L}{mV} \frac{E_{k,\phi2}}{1+\phi} + 1 - E_{k,\phi2}}{1 - E_{k,\phi2}}; \quad (11)$$

$$N_{k,y,\phi,a2} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1+\phi}{2} \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,\phi2}} - 1 \right)}; \quad (12)$$

$$N_{k,y,\phi,n3} = \ln \frac{1 - \frac{E_{k,\phi3}(1+\phi)}{2L} + 1 + \phi}{1 - E_{k,\phi3}}; \quad (13)$$

$$N_{k,y,\phi,a3} = \frac{1}{\frac{1}{E_{k,\phi3}} - \frac{1}{2} + \frac{1+\phi}{2} \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,\phi3}} - 1 \right)}; \quad (14)$$

Предельные числа единиц переноса в зависимости от перемешивания жидкости приведены в табл. 1.

Сравнение выражений при полном перемешивании жидкости из табл. 1 с аналогичными величинами при прямотоке и противотоке показывает их идентичность. Следовательно, при $\varphi = 1$ числа единиц переноса не зависят от направления движения потоков.

Совместным решением соответствующих эффективности при перемешивании жидкости на тарелке и без него из [1], зависимостей (4), (6), (8), (10) (12), (14) и чисел единиц переноса без перемешивания жидкости из табл. 1 получены соотношения чисел единиц переноса:

- по параметрам жидкости:

$$N_{k,x,\varphi,a1} = \frac{N_{k,x,a1}}{1 - \frac{\varphi}{2} N_{k,x,a1}}; \quad (15)$$

$$N_{k,x,\varphi,a2} = \frac{N_{k,x,a2}}{1 - \frac{\varphi}{2} N_{k,x,a2}}; \quad (16)$$

$$N_{k,x,\varphi,a3} = \frac{N_{k,x,a3}}{1 - \frac{\varphi}{2} N_{k,x,a3}}; \quad (17)$$

- по параметрам паровой фазы:

$$N_{k,y,\varphi,a1} = \frac{N_{k,y,a1}}{1 - \frac{\varphi}{2} \frac{mV}{L} N_{k,y,a1}}; \quad (18)$$

$$N_{k,y,\varphi,a2} = \frac{N_{k,y,a2}}{1 - \frac{\varphi}{2} \frac{mV}{L} N_{k,y,a2}}; \quad (19)$$

Таблица 1

Предельные значения чисел единиц переноса при перекрестном токе

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
Первый вариант		
$N_{k,x,n1}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{1}{1 - E_{k,n,n1}}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{1 + \frac{E_{k1}}{2L} - 1}{1 - E_{k1}}$
$N_{k,y,n1}$	$\ln \frac{1}{1 - E_{k,n,n1}}$	$\ln \frac{1 + \frac{E_{k1}}{2L} - 1}{1 - E_{k1}}$
$N_{k,x,a1}$	$\frac{1}{\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,n,n1}} - \frac{1}{2} \right)}$	$\frac{1}{\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k1}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{k1}} - 1 \right)}$
$N_{k,y,a1}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_{k,n,n1}} - \frac{1}{2}}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_{k1}} - \frac{1}{2} - \frac{mV}{2L} \left(\frac{1}{E_{k1}} - 1 \right)}$
Второй вариант		
$N_{k,x,n2}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{\frac{L}{mV} E_{k,n,n2} + 1 - E_{k,n,n2}}{1 - E_{k,n,n2}}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{\frac{2L}{mV} E_{k2} + 1 - E_{k2}}{1 - E_{k2}}$
$N_{k,y,n2}$	$\ln \frac{\frac{L}{mV} E_{k,n,n2} + 1 - E_{k,n,n2}}{1 - E_{k,n,n2}}$	$\ln \frac{\frac{2L}{mV} E_{k2} + 1 - E_{k2}}{1 - E_{k2}}$
$N_{k,x,a2}$	$\frac{1}{\frac{L}{2mV} + \frac{1}{E_{k,n,n2}} - 1}$	$\frac{2}{\frac{L}{mV} + \frac{1}{E_{k2}} - 1}$

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
$N_{k,y,a2}$	$\frac{1}{2} + \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,n,2}} - 1 \right)$	$1 + \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k2}} - 1 \right)$
Третий вариант		
$N_{k,x,n3}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{1 - \frac{E_{k,n,3}}{L} + 1}{1 - E_{k,n,3}}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{1 - \frac{E_{k3}}{2L} + 1}{1 - E_{k3}}$
$N_{k,y,n3}$	$\ln \frac{1 - \frac{E_{k,n,3}}{L} + 1}{1 - E_{k,n,3}}$	$\ln \frac{1 - \frac{E_{k3}}{2L} + 1}{1 - E_{k3}}$
$N_{k,x,a3}$	$\frac{1}{\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k,n,3}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{E_{k,n,3}} - 1}$	$\frac{1}{\frac{L}{mV} \left(\frac{1}{E_{k3}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{k3}} - 1 \right)}$
$N_{k,y,a3}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_{k,n,3}} - \frac{1}{2} + \frac{mV}{L} \left(\frac{1}{E_{k,n,3}} - 1 \right)}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_{k3}} - \frac{1}{2} + \frac{mV}{2L} \left(\frac{1}{E_{k3}} - 1 \right)}$

$$N_{k,y,\varphi,a3} = \frac{N_{k,y,a3}}{1 - \frac{\varphi}{2} \frac{mV}{L} N_{k,y,a3}}, \quad (20)$$

которые в обобщенном виде можно представить как

$$N_{k,x,\varphi,a} = \frac{N_{k,x,a}}{1 - \frac{\varphi}{2} N_{k,x,a}}; \quad (21)$$

$$N_{k,y,\varphi,a} = \frac{N_{k,y,a}}{1 - \varphi \frac{mV}{2L} N_{k,y,a}}. \quad (22)$$

При полном перемешивании жидкости формулы (21) и (22) принимают соответственно вид:

$$N_{k,x,n,a} = \frac{N_{k,x,a}}{1 - \frac{N_{k,x,a}}{2}}; \quad (23)$$

$$N_{k,y,n,a} = \frac{N_{k,y,a}}{1 - \frac{mV}{2L} N_{k,y,a}}. \quad (24)$$

Подставим выражения эффективности при перемешивании жидкости из [1] в соответствующие зависимости (3)–(10):

$$N_{k,x,\varphi,n1} = N_{k,x,\varphi,n2} = N_{k,x,\varphi,n3} = \frac{\ln \frac{m(x_n + x_{n-1}) - 2y_{n-1} - \varphi(x_n - x_{n-1})}{m(x_n + x_{n-1}) - 2y_n - \varphi(x_n - x_{n-1})}}{\frac{L}{mV}}; \quad (25)$$

$$N_{k,y,\varphi,n1} = N_{k,y,\varphi,n2} = N_{k,y,\varphi,n3} = \ln \frac{m(x_n + x_{n-1}) - 2y_{n-1} - \varphi(x_n - x_{n-1})}{m(x_n + x_{n-1}) - 2y_n - \varphi(x_n - x_{n-1})}; \quad (26)$$

$$N_{k,x,\varphi,a1} = N_{k,x,\varphi,a2} = N_{k,x,\varphi,a3} = \frac{2(x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m} - \varphi(x_n - x_{n-1})}; \quad (27)$$

$$N_{k,y,\varphi,a1} = N_{k,y,\varphi,a2} = N_{k,y,\varphi,a3} = \frac{2(y_n - y_{n-1})}{mx_n - y_{n-1} + mx_{n-1} - y_n - \varphi m(x_n - x_{n-1})}. \quad (28)$$

Уравнения (25)–(28) свидетельствуют о независимости средних логарифмических и средних арифметических чисел единиц переноса от

модели массообмена. Кроме того, совпадение зависимостей (27) и (28) с аналогичными формулами прямого тока [4] и противотока [5] указывает на то, что среднеарифметические числа единиц переноса также не зависят от формы организации потоков и при перекрестном токе. Таким образом, числа N более универсальны по сравнению с эффективностями. Однако при перекрестном токе перемешивание жидкости на ступени контакта, так же как при прямоходе и противотоке, заметно сказывается и на средних логарифмических, и на средних арифметических числах единиц переноса.

Сравнение формул (3), (5), (7), (9), (11), (13), (25) и (26) с аналогичными выражениями прямого тока [4] и противотока [5] указывает на меньшую зависимость средних логарифмических движущих сил от перемешивания жидкости при перекрестном токе. Это связано с тем, что последняя форма организации потоков учитывает некоторое усредненное состояние жидкости на тарелке, что равнозначно частичному перемешиванию жидкости. При этом снижение этого влияния одинаково во всех рассмотренных вариантах.

Граничные значения N , не включающие эффективности, в зависимости от степени перемешивания жидкости приведены в табл. 2.

Сравнение данных табл. 2 при полном перемешивании жидкости с аналогичными величинами при прямоходе [4] и противотоке [5] показывает их идентичность.

Совпадают также средние арифметические числа единиц переноса, что также подтверждает отсутствие влияния направления движения потоков на величины N в этом режиме массообмена.

В связи с универсальностью чисел единиц переноса определенный интерес представляют

зависимости эффективности от N . Эти выражения выводятся из уравнений (3)–(14):

$$E_{k,\varphi 1} = \frac{\exp\left(\frac{L}{mV} N_{k,x,\varphi,n1}\right) - 1}{\exp\left(\frac{L}{mV} N_{k,x,\varphi,n1}\right) + \frac{1-\varphi}{\frac{2L}{mV} - 1 + \varphi}}; \quad (29)$$

$$E_{k,\varphi 1} = \frac{\exp N_{k,y,\varphi,n1} - 1}{\exp N_{k,y,\varphi,n1} + \frac{1-\varphi}{\frac{2L}{mV} - 1 + \varphi}}; \quad (30)$$

$$E_{k,\varphi 1} = \frac{\frac{2L}{mV} - 1 + \varphi}{\frac{2}{N_{k,x,\varphi,a1}} + \frac{L}{mV} - 1 + \varphi}; \quad (31)$$

$$E_{k,\varphi 1} = \frac{\frac{2L}{mV} - 1 + \varphi}{\frac{L}{mV} \left(\frac{2}{N_{k,y,\varphi,a1}} + 1 \right) - 1 + \varphi}; \quad (32)$$

$$E_{k,\varphi 2} = \frac{\exp\left(\frac{L}{mV} N_{k,x,\varphi,n2}\right) - 1}{\exp\left(\frac{L}{mV} N_{k,x,\varphi,n2}\right) + \frac{2L}{mV(1+\varphi)} - 1}; \quad (33)$$

$$E_{k,\varphi 2} = \frac{\exp N_{k,y,\varphi,n2} - 1}{\exp N_{k,y,\varphi,n2} + \frac{2L}{mV(1+\varphi)} - 1}; \quad (34)$$

$$E_{k,\varphi 2} = \frac{1+\varphi}{\frac{2}{N_{k,x,\varphi,a2}} - \frac{L}{mV} + 1 + \varphi}; \quad (35)$$

Таблица 2

Граничные числа единиц переноса

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
$N_{g,x,l}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{mx_{n-1} - y_{n-1}}{mx_{n-1} - y_n}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{m(x_n - x_{n-1}) - 2y_{n-1}}{m(x_n - x_{n-1}) - 2y_n}$
$N_{g,y,l}$	$\ln \frac{mx_{n-1} - y_{n-1}}{mx_{n-1} - y_n}$	$\ln \frac{m(x_n - x_{n-1}) - 2y_{n-1}}{m(x_n - x_{n-1}) - 2y_n}$
$N_{g,x,a}$	$\frac{2(x_n - x_{n-1})}{2x_{n-1} - \frac{y_n}{m} - \frac{y_{n-1}}{m}}$	$\frac{2(x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m}}$
$N_{g,y,a}$	$\frac{2(y_n - y_{n-1})}{2mx_{n-1} - y_n - y_{n-1}}$	$\frac{2(y_n - y_{n-1})}{mx_n - y_{n-1} + mx_{n-1} - y_n}$

$$E_{k,\varphi 2} = \frac{1 + \varphi}{\frac{L}{mV} \left(\frac{2}{N_{k,y,\varphi,a2}} - 1 \right) + 1 + \varphi}; \quad (36)$$

$$E_{k,\varphi 3} = \frac{\exp\left(\frac{L}{mV} N_{k,x,\varphi,l3}\right) - 1}{\exp\left(\frac{L}{mV} N_{k,x,\varphi,l3}\right) - \frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}; \quad (37)$$

$$E_{k,\varphi 3} = \frac{\exp N_{k,y,\varphi,l3} - 1}{\exp N_{k,y,\varphi,l3} - \frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}; \quad (38)$$

$$E_{k,\varphi 2} = \frac{\frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}{\frac{2}{N_{k,x,\varphi,a3}} + \frac{L}{mV} + 1 + \varphi}; \quad (39)$$

$$E_{k,\varphi 2} = \frac{\frac{2L}{mV} + 1 + \varphi}{\frac{L}{mV} \left(\frac{2}{N_{k,x,\varphi,a3}} + 1 \right) + 1 + \varphi}. \quad (40)$$

Проведенный анализ показывает, что влияние перемешивания на движущие силы и числа единиц переноса при перекрестном токе уменьшается. Однако разнообразие рассмотренных моделей при перекрестном токе, так же как и при противотоке и прямотоке, не оказывает влияния на величины средних движущих сил и чисел единиц переноса в них, что доказывает универсальность N . Это подтверждается также совпадением выражений средних арифметических чисел единиц переноса при прямотоке, противотоке и перекрестном токе.

Обозначения

Δ – разность концентраций компонента; E – эффективность массообмена; L – молярный поток жидкости; m – коэффициент фазового равнове-

сия; 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 – противоток; l – среднее логарифмическое значение; n – номер рассматриваемой тарелки; $n - 1$ – номер предыдущей тарелки по ходу движения пара; п.п – полное перемешивание жидкости; x – жидкая фаза; y – паровая фаза; 1–3 – варианты массообмена.

Литература

1. Павлечко В. Н., Гуляев В. Н. Движущие силы в известных моделях при перекрестном токе и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в. – 2006. – Вып. XIV. – С. 116–120.
2. Павлечко В. Н., Плехов И. М. Способ учета влияния перемешивания жидкости в процессах ректификации // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве стройматериалов: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–10 нояб. 2000 г. – Мн., 2000. – С. 70–71.
3. Павлечко В. Н. Комплексная модель эффективности ректификационных тарелок // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, – № 3. – С. 177–180.
4. Павлечко В. Н., Плехов И. М. Числа единиц переноса в известных моделях при прямотоке и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в. – 2005. – Вып. XIII. – С. 138–141.
5. Павлечко В. Н., Гуляев В. Н. Числа единиц переноса в известных моделях при противотоке и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорган. в-в. – 2005. – Вып. XIII. – С. 142–145.