

### ЧИСЛА ЕДИНИЦ ПЕРЕНОСА В ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЯХ ПРИ ПРОТИВОТОКЕ И ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОСТИ

The effect of liquid mixing on the average logarithmic and arithmetic the numbers of transfer units 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. 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  $\varphi$  полностью перемешанной жидкости [2, 3], оказывает одинаковое влияние на величины средних движущих сил, независимо от вариантов массообмена. Другая часть жидкости  $(1 - \varphi)$  движется по тарелке в режиме идеального вытеснения. Идеально перемешанная часть  $\varphi$  жидкости движется по тарелке равномерно распределенной в другой части  $(1 - \varphi)$  в любой точке тарелки. Эти две части движутся по тарелке с постоянной скоростью, обеспечивая одинаковую степень перемешивания жидкости во всем ее объеме. Такое представление о перемешивании жидкости существенно упрощает расчетные зависимости. В [1] рассмотрены только первый и третий варианты массообмена, так как в других вариантах [4] эффективность либо не определяется, либо имеет отрицательное значение.

Настоящая работа посвящена анализу чисел единиц переноса при перемешивании жидкости, включая также предельные случаи полного перемешивания жидкости ( $\varphi = 1$ ) на тарелке и ее идеального вытеснения ( $\varphi = 0$ ).

При использовании известных формул

$$N_x = \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta x_{\text{cp}}}; \quad (1)$$

$$N_y = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta y_{\text{cp}}}; \quad (2)$$

из выражений движущих сил при противотоке [1] получаем соответствующие средние логарифмические и арифметические значения чисел единиц переноса для первого и третьего вариантов массообмена в зависимости от степени  $\varphi$  перемешивания жидкости на тарелке:

$$N_{g,x,\varphi,l1} = \frac{\ln \frac{1}{1 - E_{g,\varphi 1}}}{\frac{L}{mV} - 1 + \varphi}; \quad (3)$$

$$N_{g,x,\varphi,a1} = \frac{1}{\left(\frac{L}{mV} - 1 + \varphi\right) \left(\frac{1}{E_{g,\varphi 1}} - \frac{1}{2}\right)}; \quad (4)$$

$$N_{g,x,\varphi,l3} = \frac{\ln \frac{\frac{L}{mV} + \varphi - E_{g,\varphi 3}}{\left(\frac{L}{mV} + \varphi\right) (1 - E_{g,\varphi 3})}}{\frac{L}{mV} - 1 + \varphi}; \quad (5)$$

$$N_{g,x,\varphi,a3} = \frac{1}{\left(\frac{L}{mV} + \varphi\right) \left(\frac{1}{E_{g,\varphi 3}} - \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2}}; \quad (6)$$

$$N_{g,y,\varphi,l1} = \frac{\ln \frac{1}{1 - E_{g,\varphi 1}}}{1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}}; \quad (7)$$

$$N_{g,y,\varphi,a1} = \frac{1}{\left[1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}\right] \left(\frac{1}{E_{g,\varphi 1}} - \frac{1}{2}\right)}; \quad (8)$$

$$N_{g,y,\varphi,l3} = \frac{\ln \frac{\frac{L}{mV} + \varphi - E_{g,\varphi 3}}{\left(\frac{L}{mV} + \varphi\right) (1 - E_{g,\varphi 3})}}{1 - \frac{mV}{L} (1 - \varphi)}; \quad (9)$$

$$N_{g,y,\varphi,a3} = \frac{1}{\left(1 + \varphi \frac{mV}{L}\right) \left(\frac{1}{E_{g,\varphi 3}} - \frac{1}{2}\right) - \frac{mV}{L}}; \quad (10)$$

Сравнительный анализ формул (3)–(10) с соответствующими выражениями при прямотоке [5] свидетельствует о значительном влиянии перемешивания жидкости на числа единиц переноса.

Крайние значения чисел единиц переноса, включающие идеальное вытеснение жидкости и ее полное перемешивание на тарелке, приведены в табл. 1.

Предельные значения чисел единиц переноса при противотоке

Величина	Полное перемешивание жидкости	Перемешивание отсутствует
Первый вариант		
$N_{g,x,л1}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{1}{1 - E_{g,nn1}}$	$\frac{\ln \frac{1}{1 - E_{g1}}}{\frac{L}{mV} - 1}$
$N_{g,y,л1}$	$\ln \frac{1}{1 - E_{g,nn1}}$	$\frac{\ln \frac{1}{1 - E_{g1}}}{1 - \frac{mV}{L}}$
$N_{g,x,л1}$	$\frac{1}{\frac{L}{mV} \left( \frac{1}{E_{g,nn1}} - \frac{1}{2} \right)}$	$\frac{1}{\left( \frac{L}{mV} - 1 \right) \left( \frac{1}{E_{g1}} - \frac{1}{2} \right)}$
$N_{g,y,л1}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_{g,nn1}} - \frac{1}{2}}$	$\frac{1}{\left( 1 - \frac{mV}{L} \right) \left( \frac{1}{E_{g1}} - \frac{1}{2} \right)}$
Третий вариант		
$N_{g,x,л3}$	$\frac{mV}{L} \ln \frac{\frac{L}{mV} + 1 - E_{g,nn3}}{\left( \frac{L}{mV} + 1 \right) (1 - E_{g,nn3})}$	$\frac{\ln \frac{1 - \frac{mV}{L} E_{g3}}{1 - E_{g3}}}{\frac{L}{mV} - 1}$
$N_{g,y,л3}$	$\ln \frac{\frac{L}{mV} + 1 - E_{g,nn3}}{\left( \frac{L}{mV} + 1 \right) (1 - E_{g,nn3})}$	$\frac{\ln \frac{1 - \frac{mV}{L} E_{g3}}{1 - E_{g3}}}{1 - \frac{mV}{L}}$
$N_{g,x,л3}$	$\frac{1}{\left( \frac{L}{mV} + 1 \right) \left( \frac{1}{E_{g,nn3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2}}$	$\frac{1}{\frac{L}{mV} \left( \frac{1}{E_{g3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2}}$
$N_{g,y,л3}$	$\frac{1}{\left( 1 + \frac{mV}{L} \right) \left( \frac{1}{E_{g,nn3}} - \frac{1}{2} \right) - \frac{mV}{2L}}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_{g3}} - \frac{1}{2} - \frac{mV}{2L}}$

Сравнение величин чисел единиц переноса при полном перемешивании жидкости на тарелке из табл. 1 с соответствующими величинами при прямотоке (табл. 1 [5]) показывает их идентичность. Таким образом, при полном перемешивании жидкости на тарелке структура потоков не оказывает влияния на значения чисел единиц переноса. Вместе с тем при отсутствии перемешивания жидкости наблюдается заметное отличие сравниваемых величин.

В табл. 1 средние логарифмические числа единиц переноса без перемешивания жидкости на тарелке аналогичны данным

при противотоке табл. 3 [6], что подтверждает справедливость приведенных вычислений.

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

$$N_{g,x,\varphi,л1} = \frac{N_{g,x,л1}}{1 - \frac{\varphi}{2} N_{g,x,л1}}; \quad (11)$$

$$N_{g,x,\varphi,a3} = \frac{N_{g,x,a3}}{1 - \frac{\varphi}{2} N_{g,x,a3}}; \quad (12)$$

$$N_{g,y,\varphi,a1} = \frac{N_{g,y,a1}}{1 - \frac{\varphi}{2} \frac{mV}{L} N_{g,y,a1}}; \quad (13)$$

$$N_{g,y,\varphi,a3} = \frac{N_{g,y,a3}}{1 - \frac{\varphi}{2} \frac{mV}{L} N_{g,y,a3}}; \quad (14)$$

которые в обобщенном виде можно представить как

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

$$N_{g,y,\varphi,a} = \frac{N_{g,y,a}}{1 - \varphi \frac{mV}{2L} N_{g,y,a}}; \quad (16)$$

При полном перемешивании жидкости формулы (15) и (16) принимают соответственно вид:

$$N_{g,x,пп,a} = \frac{N_{g,x,a}}{1 - \frac{1}{2} N_{g,x,a}}; \quad (17)$$

$$N_{g,y,пп,a} = \frac{N_{g,y,a}}{1 - \frac{mV}{2L} N_{g,y,a}}; \quad (18)$$

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

$$N_{g,x,\varphi,l} = N_{g,x,\varphi,l1} = N_{g,x,\varphi,l3} = \frac{\ln \frac{m x_{n-1} - y_{n-1}}{m x_n - y_n - \varphi m (x_n - x_{n-1})}}{\frac{L}{mV} - 1 + \varphi}; \quad (19)$$

$$N_{g,y,\varphi,l} = N_{g,y,\varphi,l1} = N_{g,y,\varphi,l3} = \frac{\ln \frac{m x_{n-1} - y_{n-1}}{m x_n - y_n - \varphi m (x_n - x_{n-1})}}{1 - (1 - \varphi) \frac{mV}{L}}; \quad (20)$$

$$N_{g,x,\varphi,a} = N_{g,x,\varphi,a1} = N_{g,x,\varphi,a3} = \frac{2(x_n - x_{n-1})}{x_n - \frac{y_{n-1}}{m} + x_{n-1} - \frac{y_n}{m} - \varphi(x_n - x_{n-1})}; \quad (21)$$

$$N_{g,y,\varphi,a} = N_{g,y,\varphi,a1} = N_{g,y,\varphi,a3} = \frac{2(y_n - y_{n-1})}{m x_n - y_{n-1} + m x_{n-1} - y_n - \varphi m (x_n - x_{n-1})}; \quad (22)$$

Уравнения (19)–(22) свидетельствуют о независимости  $N$  от модели массообмена. Это подтверждается результатами работ [7, 8], в которых также выводится равенство чисел единиц переноса без перемешивания жидкости для различных вариантов массообмена и их независимость от направления движения паровой и жидкой фаз, а также итогами работы [5] настоящего сборника, в которой рассматривается прямоточное движение фаз. Кроме того, совпадение (21) и (22) с аналогичными формулами прямотока [5] указывает на то, что среднеарифметические числа единиц переноса не зависят также от формы организации потоков. Таким образом,  $N$  более универсальны по сравнению с эффективностями массообмена. Однако при противотоке перемешивание жидкости на ступени контакта, так же как и при прямотоке, заметно сказывается и на средних логарифмических, и на средних арифметических числах единиц переноса.

Предельные значения  $N$  в зависимости от перемешивания жидкости приведены в табл. 2.

Из сравнения чисел единиц переноса при полном перемешивании жидкости (табл. 2) с соответствующими данными работы [5] следует независимость  $N$  от взаимного направления взаимодействующих потоков пара и жидкости.

Проведенный анализ показывает значительное влияние перемешивания на движущие силы и числа единиц переноса при противотоке. Разнообразие рассмотренных моделей при противотоке, так же как и при прямотоке, не оказывает влияния на величины средних движущих сил и чисел единиц переноса в них, что доказывает универсальность последних. При полном перемешивании жидкости направление движения потоков не сказывается на величинах чисел единиц переноса. Это подтверждается также совпадением выражений средних арифметических движущих сил при прямотоке и противотоке.

Граничные числа единиц переноса

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

#### Обозначения

$\Delta$  – разность концентраций;  $E$  – эффективность массообмена;  $L$  – молярный поток жидкости;  $m$  – коэффициент фазового равновесия;  $V$  – молярный поток пара;  $x, y$  – концентрация легколетучего компонента в жидкости и паровой фазе соответственно;  $\varphi$  – количество полностью перемешанной жидкости; степень перемешивания жидкости. Индексы: а – среднеарифметическое значение;  $\varphi$  – учет перемешивания жидкости;  $g$  – противоток;  $l$  – среднее логарифмическое значение;  $n$  – номер рассматриваемой тарелки;  $n-1$  – номер предыдущей тарелки по ходу движения пара;  $пп$  – полное перемешивание жидкости;  $ср$  – среднее значение;  $x$  – жидкая фаза;  $y$  – паровая фаза; 1–3 – варианты массообмена.

#### Литература

1. Павлечко В. Н., Гуляев В. Н. Движущие силы в известных моделях при противотоке и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. в-в. – 2004. – Вып. XII. – С. 131–136.
2. Павлечко В. Н. Сравнение эффективности ректификационных тарелок при противоточном движении фаз с учетом перемешивания жидкости // ИФЖ. – 2000. – Т. 73, № 3. С. 514–519.

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 МНТК, Минск, 9–10 нояб. 2000 г. С. 70–71.

4. Павлечко В. Н. Разработка моделей эффективности ректификационных тарелок при противоточном движении фаз // Труды БГТУ. Сер. химии и хим. технологии. – 1998. – Вып. VI. – С. 138–144.

5. Павлечко В. Н., Плехов И. М. Числа единиц переноса в известных моделях при прямотоке и перемешивании жидкости // Труды БГТУ. – Сер. химии и технологии неорганич. в-в. – 2005. – Вып. XIII. – С. 138–141.

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.

7. Павлечко В. Н. Числа единиц переноса в некоторых моделях массообмена // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: Материалы МНТК, Минск, 26–28 нояб. 2003 г. – Мн., 2003. – С. 459–461.

8. Павлечко В. Н. Взаимосвязь движущих сил в некоторых моделях и формах организации потоков // ИФЖ. – 2004. – Т. 77, № 6. – С. 90–96.