

УДК 66.048.375

В. Н. Павлечко

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ ТАРЕЛОК. 5. ПЕРЕКРЕСТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ФАЗ ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОСТИ

Рассмотрено частичное перемешивание жидкости при перекрестном движении фаз. Часть жидкости (φ) на тарелке полностью перемешана, другая ($1-\varphi$) – движется в режиме идеального вытеснения и степень перемешивания определяется соотношением этих частей. Состав пара после тарелки принят равным среднему значению составов пара, выходящих из начального и конечного ее участков по ходу движения жидкости. После идеальной тарелки эти составы равновесны с поступающей и уходящей жидкостью соответственно. Получены аналитические зависимости эффективности от параметров реальной тарелки. Доказано равенство эффективностей в паровой и жидкой фазах. Рассмотрены некоторые частные и предельные случаи применимости комплексной модели.

В работе [1] отмечается, что при противоточном движении фаз перемешивание жидкости оказывает заметное влияние на эффективность массопереноса, снижая ее по сравнению с идеальным вытеснением. Особенностью перемешивания при противотоке является его более существенное влияние в направлении потока жидкости и менее заметное – в перпендикулярном направлении. Степень перемешивания жидкости оценивается соотношением полностью перемешанной и движущейся в режиме идеального вытеснения ее частей.

При перекрестном токе перемешивание также снижает эффективность массообмена. Причем в отличие от противотока оно существенно в направлениях обоих потоков. Однако эта особенность перемешивания при перекрестном токе также может быть оценена количеством φ полностью перемешанной и количеством $1-\varphi$ идеально вытесняемой жидкости.

При полном смешении всей жидкости на тарелке пар, покидающий идеальную тарелку, находится в равновесии со стекающей жидкостью

$$(y_n^*)_c = mx_{n-1}^*.$$

При идеальном вытеснении пар, покидающий начальный участок идеальной тарелки, находится в равновесии с поступающей жидкостью (рис. 1)

$$(y_{n,\text{нач}}^*)_в = mx_n^*,$$

а покидающий конечный участок – с уходящей жидкостью

$$(y_{n,\text{кон}}^*)_в = mx_{n-1}^*.$$

Средний состав пара после тарелки идеального вытеснения при условии равномерного истощения жидкости

$$(y_n^*)_в = \frac{(y_{n,\text{нач}}^*)_в + (y_{n,\text{кон}}^*)_в}{2} = m \frac{x_n^* - x_{n-1}^*}{2}.$$

С учетом принятой оценки перемешивания состав пара после идеальной тарелки

$$y_n^* = \varphi (y_n^*)_c + (1 - \varphi) (y_n^*)_в = \varphi mx_{n-1}^* + (1 - \varphi) m \frac{x_n^* - x_{n-1}^*}{2}. \quad (1)$$

По аналогии с перекрестным движением фаз без перемешивания [2] при его наличии может быть использована следующая модель массообмена. Поступающие и выходящие потоки пара и жидкости на идеальной и реальной тарелках отличаются по составу и уравниваются на некотором расстоянии h для пара и h_1 для жидкости от места ввода потоков. Уравнения равенства концентраций легколетучего компонента в паровой фазе и жидкости аналогичны соответствующим уравнениям перекрестного тока без перемешивания [2]

$$hy_n^* + (1 - h) y_{n-1}^* = hy_n + (1 - h) y_{n-1}, \quad (2)$$

$$(1 - h_1) x_n^* + h_1 x_{n-1}^* = (1 - h_1) x_n + h_1 x_{n-1}. \quad (3)$$

Белорусский государственный технологический университет. Поступила 26.01.2000, в окончательной редакции – 14.09.2000.

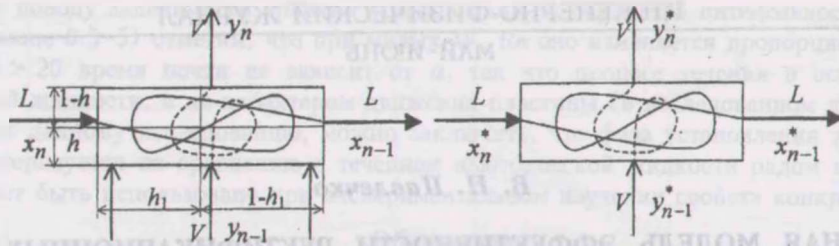


Рис. 1. Схема перекрестного движения паровой и жидкой фаз на реальной (а) и идеальной (б) тарелках при перемешивании

Уравнения материального баланса по легколетучему компоненту для идеальной и реальной тарелок, выражения эффективности в паровой и жидкой фазах имеют тот же вид, что и при прямоточном движении [3].

Концентрации легколетучего компонента в паровой фазе до и после идеальной тарелки, выраженные через параметры действительной тарелки, сохраняют свой вид и при отсутствии перемешивания [2]

$$y_{n-1}^* = hy_n + (1-h)y_{n-1} - h \frac{y_n - y_{n-1}}{E_v}, \quad (4)$$

$$y_n^* = hy_n + (1-h)y_{n-1} + (1-h) \frac{y_n - y_{n-1}}{E_v}, \quad (5)$$

а их разность в жидкости с учетом (1) видоизменяется

$$x_n^* - x_{n-1}^* = \frac{2(1-h_1)}{1-2h_1+\varphi} x_n + \frac{2h_1}{1-2h_1+\varphi} x_{n-1} - \frac{2h}{1-2h_1+\varphi} \frac{y_n}{m} - \frac{2(1-h)}{1-2h_1+\varphi} \frac{y_{n-1}}{m} - \frac{2(1-h)}{1-2h_1+\varphi} \frac{y_n - y_{n-1}}{mE_v}, \quad (6)$$

Решением (4)–(6) уравнений материального баланса идеальной и реальной тарелок [3] получим

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) E_v \left/ \left[L(1-E_v) \left(\frac{1-h}{mV} + \frac{1-h_1}{L} \right) + \frac{L}{mV} E_v - \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right] \right. \quad (7)$$

Аналогичная зависимость может быть найдена при использовании эффективности в жидкости, что подтверждает равенство эффективностей в паровой и жидкой фазах

$$E_v = E_{liq} = E_{k,\varphi}. \quad (8)$$

В частных случаях, когда $h = h_1$ или $h = h_1 = 0.5$, формула (7) принимает соответствующие выражения

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) E_{k,\varphi} \left/ \left[(1-E_{k,\varphi})(1-h) \left(\frac{L}{mV} + 1 \right) + \frac{L}{mV} E_{k,\varphi} - \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right] \right. \quad (9)$$

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) 2E_{k,\varphi,m} \left/ \left(\frac{L}{mV} + \frac{L}{mV} E_{k,\varphi,m} - E_{k,\varphi,m} + \varphi \right) \right. \quad (10)$$

Граничными случаями обобщенной модели являются условия связи идеальной и реальной тарелок, свойственные моделям Мерффи [4–6] и Хаузена [5–7], когда расстояния h и h_1 становятся равными нулю или единице. Формула (7) в этом случае упрощается до соответствующего вида:

при $y_{n-1}^* = y_{n-1}$, $x_{n-1}^* = x_{n-1}$ ($h = 0$; $h_1 = 1$)

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) E_{k,\varphi 1} \left/ \left(\frac{L}{mV} - \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right.; \quad (11)$$

при $y_n^* = y_n$, $x_n^* = x_n$ ($h = 1$, $h_1 = 0$)

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) E_{k,\varphi 2} \left/ \left(\frac{L}{mV} E_{k,\varphi 2} - E_{k,\varphi 2} + \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right.; \quad (12)$$

при $y_{n-1}^* = y_{n-1}$, $x_n^* = x_n$ ($h = 0$, $h_1 = 0$)

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) E_{k,\varphi 3} \left/ \left(\frac{L}{mV} - E_{k,\varphi 3} + \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right.; \quad (13)$$

при $y_n^* = y_n$, $x_{n-1}^* = x_{n-1}$ ($h = 1$, $h_1 = 1$)

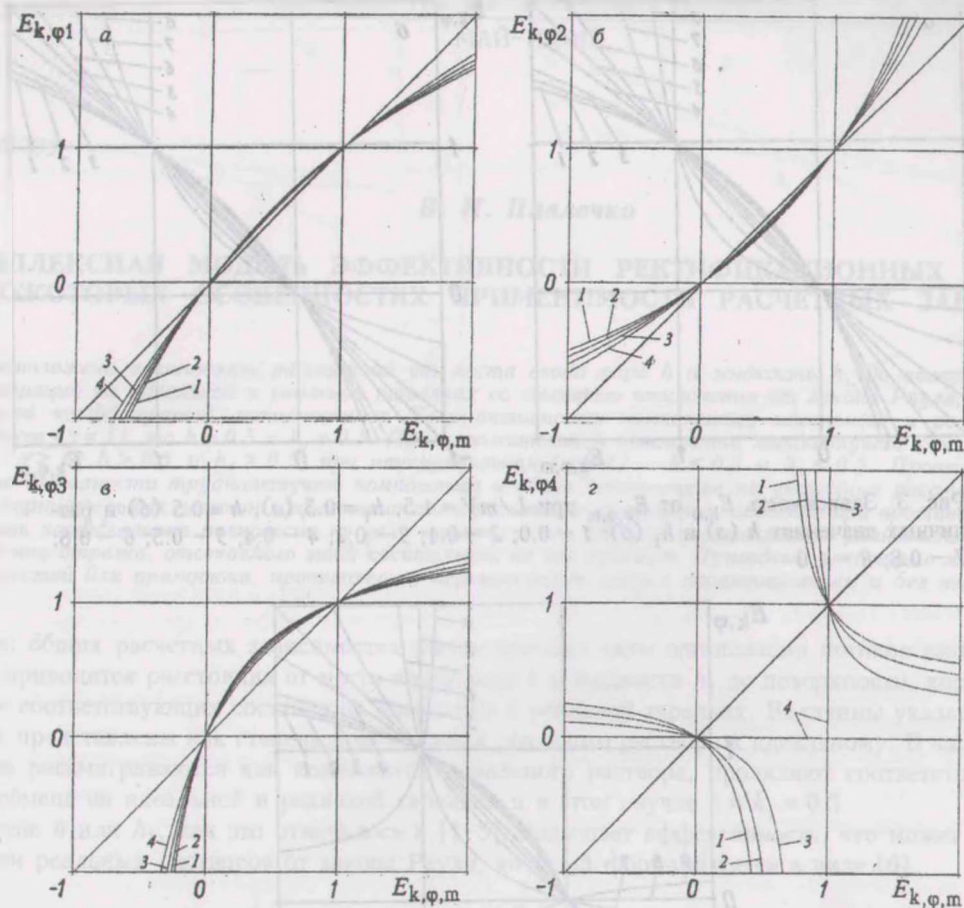


Рис. 2. Зависимость $E_{k,\varphi 1}$ (а), $E_{k,\varphi 2}$ (б), $E_{k,\varphi 3}$ (в) и $E_{k,\varphi 4}$ (г) от $E_{k,\varphi,m}$ при $L/mV = 1.5$ и различных значениях φ : 1 - 0.0; 2 - 0.2; 3 - 0.5; 4 - 1.0

$$x_n - x_{n-1} = \left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m} \right) E_{k,\varphi 4} / \left(\frac{L}{mV} E_{k,\varphi 4} - \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right). \quad (14)$$

Приравнявая правые части зависимостей (10)–(14), получим соотношение между эффективностями рассмотренных вариантов

$$\frac{\frac{L}{mV} + \varphi}{2E_{k,\varphi,m}} + \frac{L}{2mV} - \frac{1}{2} = \frac{\frac{L}{mV} - \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2}}{E_{k,\varphi 1}} = \frac{L}{mV} - 1 + \frac{1 + \varphi}{2E_{k,\varphi 2}} = \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2}}{E_{k,\varphi 3}} - 1 = \frac{L}{mV} - \frac{1 - \varphi}{2E_{k,\varphi 4}}. \quad (15)$$

Из (7) и (10) могут быть получены выражения эффективности реальной тарелки при известных экспериментальных данных

$$E_{k,\varphi} = \left[(1-h) \frac{L}{mV} - h_1 + \frac{1}{2} + \frac{\varphi}{2} \right] / \left(\frac{x_n - \frac{y_{n-1}}{m}}{x_n - x_{n-1}} - h \frac{L}{mV} - h_1 \right). \quad (16)$$

$$E_{k,\varphi,m} = \left(\frac{L}{mV} + \varphi \right) / \left(\frac{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_{n-1}}{m}}{x_n - x_{n-1}} - \frac{L}{mV} \right). \quad (17)$$

Как видно из рис. 2, перемешивание при перекрестном токе и $L/mV = 1.5$ оказывает малое влияние на взаимосвязь эффективностей. Причем эффективность $E_{k,\varphi,m}$, соответствующая комплексной модели, немного меньше $E_{k,\varphi 1}$, учитывающей условия связи идеальной и реальной тарелок в модели Мерффи при анализе эффективности в паровой фазе (рис. 2, а), незначительно больше $E_{k,\varphi 2}$, отражающей модель Мерффи при ее анализе в жидкости (рис. 2, б), заметно меньше $E_{k,\varphi 3}$, характеризующей модель Хаузена (рис. 2, в). В первом и третьем случае перемешивание ненамного снижает эффективность, во втором – повышает ее и во всех трех – уменьшает различие указанных пар эффективностей, не устраняя его полностью.

Как и при отсутствии перемешивания при перекрестном токе [2] его наличие не дает значений соотношений $E_{k,\varphi,m}$ и $E_{k,\varphi 4}$ в реальном диапазоне (рис. 2, г). Вторую из указанных эффективностей можно рассматривать только в теоретическом плане, поскольку действительным значениям одной из эффективнос-

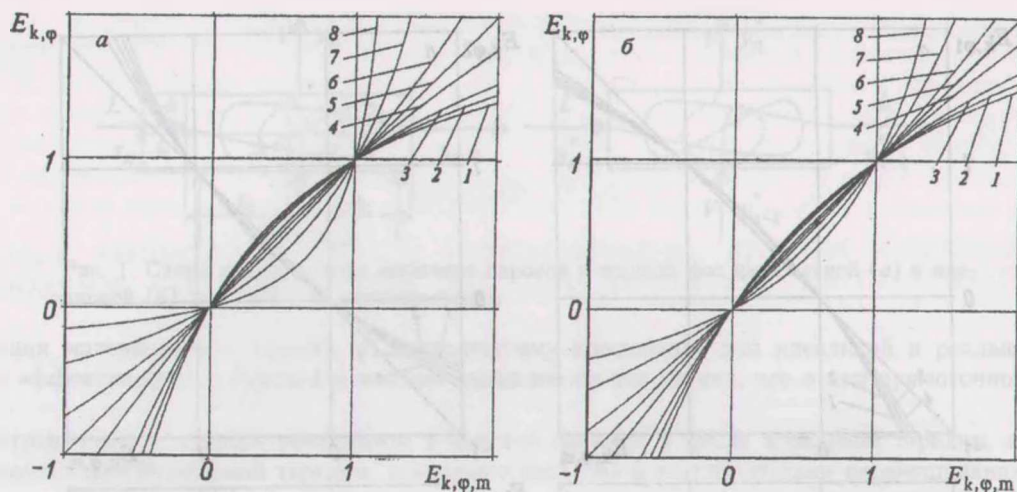


Рис. 3. Зависимость $E_{k,\phi}$ от $E_{k,\phi,m}$ при $L/mV = 1.5$, $h_1 = 0.5$ (а), $h = 0.5$ (б) и различных значениях h (а) и h_1 (б): 1 - 0.0; 2 - 0.1; 3 - 0.2; 4 - 0.4; 5 - 0.5; 6 - 0.6; 7 - 0.8; 8 - 1.0

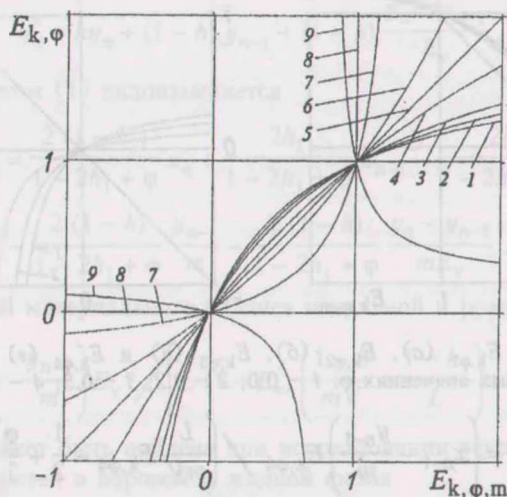


Рис. 4. Зависимость $E_{k,\phi}$ от $E_{k,\phi,m}$ при $L/mV = 1.5$, $h_1 = h$ и различных значениях h : 1 - 0.0; 2 - 0.1; 3 - 0.2; 4 - 0.4; 5 - 0.5; 6 - 0.6; 7 - 0.8; 8 - 0.9; 9 - 1.0

тей соответствуют нереальные величины другой. Поэтому применение $E_{k,\phi}$ в расчетах имеет ограниченный характер и только в случае нереальных значений $E_{k,\phi,m}$.

При фиксированном значении одного из расстояний уменьшение h (рис. 3, а), h_1 (рис. 3, б), а также одновременное их снижение (рис. 4) повышает эффективность. Причем в последнем случае реальные эффективности возможны при $h = h_1 < 0.9$, что хорошо согласуется с данными рис. 2, г, для которого, как отмечалось выше, $h = h_1 = 1$.

Обозначения

E - эффективность тарелки; ϕ - количество полностью перемешанной жидкости на тарелке; h , h_1 - безразмерное расстояние от места ввода соответственно пара и жидкости до поверхности равенства концентраций фаз на идеальной и реальной тарелках; L - молярный поток жидкости; m - коэффициент равновесия; V - молярный поток пара; x , y - концентрация легколетучего компонента соответственно в жидкости и паре. Индексы: в - идеальное вытеснение; ф - учет перемешивания жидкости; кон - конечный участок; к - перекрестное движение фаз; к,φ,м - перекрестное движение фаз при перемешивании и значениях h и h_1 , равных половине их полной величины; liq - жидкая фаза; нач - начальный участок; n - номер рассматриваемой тарелки; n-1 - номер предыдущей тарелки по ходу движения пара; с - идеальное смешение; v - паровая фаза; * - идеальные условия.

Литература

1. Павлечко В. Н. // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2. С. 38-42.
2. Павлечко В. Н. // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2. С. 43-47.
3. Павлечко В. Н. // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 1. С. 50-56.
4. Murphree E. V. // Ind. Eng. Chem. 1925. Vol. 17, N 7. P. 747-750.
5. Medina A. G., Ashton N., McDermott C. // Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34, N 9. P. 1105-1112.
6. Savcovic-Stevanovic J. // Separ. Sci. and Technol. 1984. Vol. 19, N 4-5. P. 283-285.
7. Hausen H. // Chem. Ing. Tech. 1953. Bd. 25, N 10. S. 595-597.