

В. Н. Павлечко

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ ТАРЕЛОК. 2. ПРОТИВОТОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ ФАЗ

Рассмотрен массообмен при противоточном движении и идеальном вытеснении фаз на тарелке, когда в состоянии равновесия находятся покидающие идеальную тарелку пар и поступающая жидкость. В предложенной комплексной модели массообмена совпадают составы потоков на идеальной и действительной тарелках на некотором расстоянии от места ввода фаз. Доказано равенство эффективностей по паровой и жидкой фазам при их противоточном движении. Рассмотрены некоторые частные и граничные случаи комплексной модели. Выведены соответствующие соотношения эффективностей. Проведен анализ противоточной комплексной модели и областей ее использования.

В моделях Мерфри [1] и Хаузена [2], получивших наибольшее распространение при анализе эффективности ректификационных колонн, одним из условий является равновесие покидающих идеальную тарелку пара и жидкости. Это условие справедливо при полном перемешивании жидкости на тарелке и при прямоточном движении фаз. При идеальном вытеснении и противоточном движении фаз с уходящим паром (рис. 1) в равновесии находится поступающая на тарелку жидкость. Использование моделей Мерфри и Хаузена в этом случае приводит к значительным погрешностям, поскольку в них занижаются концентрации легколетучего компонента в выходящем паре и искажаются соответствующим образом значения эффективности массообмена. Поэтому модели Мерфри и Хаузена не могут охватывать всего многообразия аппаратурного оформления процессов ректификации. Это подтверждается литературными данными, так как удовлетворительную сходимость с экспериментальными значениями у одних исследователей имеет модель Мерфри [1, 3, 4], у других – модель Хаузена [2, 5–7], у третьих – другие модели массообмена [8–10].

В работе [11] указывается на определенные недостатки известных моделей, которые вызваны условиями связи идеальной и реальной тарелок и условиями равновесия. Аналогичные недостатки имеют место и в случае противоточного движения взаимодействующих фаз, когда действительная тарелка несколько идеализируется и ее эффективность завышается.

В частности, для моделей Мерфри [1, 5, 6] при анализе эффективности в паровой и жидкой фазах и для модели Хаузена [2, 5, 6] условия связи идеальной и реальной тарелок можно представить в виде равенств (2), приведенных в [11].

Применительно к противоточному движению фаз условия равновесия фаз на идеальной тарелке формулируются следующим образом (рис. 1):

$$y_n^* = mx_n^* \quad (1)$$

Равенства (2а) [11] не влияют на зависимость (1), последняя согласуется с представлением о работе идеальной тарелки, и достоверность модели определяется только условиями связи идеальной и реальной тарелок.

С учетом равенства (2б) [11] формула (1) принимает вид $y_n = mx_n$, согласно которому концентрации легколетучего компонента в паровой фазе после реальной тарелки и в жидкости перед ней завышаются, а соответствующие величины для идеальной тарелки занижаются, искажая показатели работы как одной, так и другой тарелок.

Использование равенств (2в) [11] в условии равновесия (1) приводит к зависимости $y_n^* = mx_n$, посредством которой получают завышенные концентрации легколетучего компонента в жидкости, поступающей на действительную тарелку, и заниженные – в паровой фазе, покидающей идеальную тарелку. Параметры моделей идеальной и реальной тарелок также искажаются.

Таким образом, при противоточном движении фаз расчетные величины могут значительно отличаться от опытных данных, поскольку это отличие заложено при формировании моделей.

По аналогии с прямоточным [11] при противоточном движении жидкости и пара предлагается следующая модель массообмена (рис. 2). Поступающие и выходящие потоки пара и жидкости на идеальной и реальной тарелках различаются по составу и выравниваются на некотором расстоянии от места ввода фаз h для пара и h_1 для жидкости (точки А и Б на рис. 2 соответственно). В этой модели уравнения материального баланса по легколетучему компоненту для идеальной и реальной тарелок, выражения эффективности массообмена в паровой и жидких фазах имеют тот же вид, что и при прямоточном движении [11]. Поэтому при противоточном движении аналогичным образом могут быть получены такие же, как и при прямоточном движении: соотношение величин концентраций легколетучего компонента в паровой фазе и жидкости на

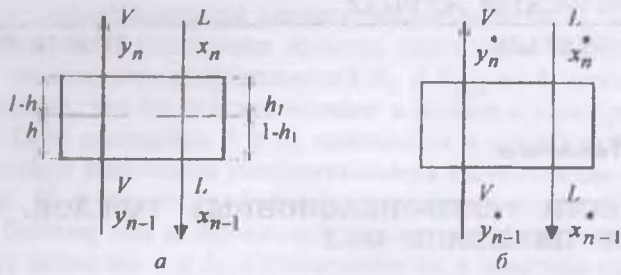


Рис. 1. Схема противоточных потоков паровой и жидкой фаз на реальной (а) и идеальной (б) тарелках

идеальной и реальной ступени, а также концентрации легколетучего компонента в паровой фазе до и после идеальной тарелки, выраженные параметрами реальной тарелки [11].

Противоточное движение отличается от прямоточного только уравнением равновесия (1). С учетом этого при использовании эффективности массопередачи в паровой фазе можно получить разность концентраций легколетучего компонента в жидкости на идеальной и реальной ступенях соответственно

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

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) E_v}{L(1-E_v) \left(\frac{1-h}{mV} + \frac{1-h_1}{L}\right) + \frac{L}{mV} E_v - 1} \quad (3)$$

а при использовании эффективности в жидкости - разность концентраций легколетучего компонента в паровой фазе на идеальной тарелке

$$y_n^* - y_{n-1}^* = \frac{1-h_1}{1-h} mx_n + \frac{h_1}{1-h} mx_{n-1} + \frac{h_1}{1-h} m \frac{x_n - x_{n-1}}{E_{liq}} - \frac{h}{1-h} y_n - y_{n-1} \quad (4)$$

и разность

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) E_{liq}}{L(1-E_{liq}) \left(\frac{1-h}{mV} + \frac{1-h_1}{L}\right) + \frac{L}{mV} E_{liq} - 1}$$

Сравнительный анализ последнего выражения с (3) подтверждает равенство эффективностей в паровой и жидкой фазах для рассматриваемой модели массообмена, т. е.

$$E_v = E_{liq} = E_g \quad (5)$$

В частном случае, когда расстояние h может быть равно h_1 , формула (3) упрощается:

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) E_g}{(1-E_g)(1-h) \left(\frac{L}{mV} + 1\right) + \frac{L}{mV} E_g - 1} \quad (6)$$

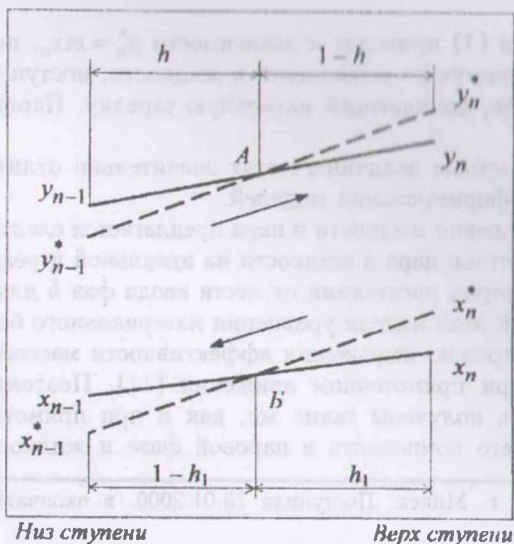


Рис. 2. Изменение концентраций на реальной (сплошные линии) и идеальной (штриховые) тарелках при противоточном движении фаз

а при $h = h_1 = 0.5$ она приводится к виду

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) 2E_{g,m}}{\left(\frac{L}{mV} - 1\right) (1 + E_{g,m})} \quad (7)$$

Граничными случаями комплексной модели являются условия связи идеальной и реальной тарелок, свойственные моделям Мерффи [1, 5, 6] и Хаузена [2, 5, 6], когда расстояния h и h_1 становятся равными нулю или единице. При $y_{n-1}^* = y_{n-1}$, $x_{n-1}^* = x_{n-1}$ эти величины конкретизируются как $h = 0$ и $h_1 = 1$. В этом случае зависимость (3) упрощается:

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) E_{g1}}{\frac{L}{mV} - 1} \quad (8)$$

Если $y_n^* = y_n$ и $x_n^* = x_n$, что применительно к рассматриваемой модели соответствует $h = 1$ и $h_1 = 0$, выражение (3) принимает вид формулы (8), у которой эффективность равна единице:

$$x_n - x_{n-1} = \frac{x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}}{\frac{L}{mV} - 1} \quad (9)$$

С учетом этого обстоятельства следует отметить, что для расчета параметров действительной тарелки использовать выражение (9) при противоточном движении фаз не представляется возможным, поскольку эффективность массообмена должна быть меньше единицы.

Когда $y_{n-1}^* = y_{n-1}$ и $x_n^* = x_n$, величины h и h_1 принимают нулевые значения и зависимость (3) упрощается:

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) E_{g3}}{\frac{L}{mV} - E_{g3}} \quad (10)$$

Если $y_n^* = y_n$ и $x_{n-1}^* = x_{n-1}$, то $h = 1$, $h_1 = 1$ и зависимость (3) принимает вид

$$x_n - x_{n-1} = \frac{\left(x_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{m}\right) E_{g4}}{\frac{L}{mV} E_{g4} - 1} \quad (11)$$

Левые части в формулах (7), (8), (10) и (11) равны. Приравнивая их правые части, получим соотношения между эффективностями

$$\frac{\frac{L}{mV} - 1}{2E_{g,m}} + \frac{L}{2mV} - \frac{1}{2} = \frac{\frac{L}{mV} - 1}{E_{g1}} = \frac{\frac{L}{mV}}{E_{g3}} - 1 = \frac{L}{mV} - \frac{1}{E_{g4}} \quad (12)$$

Зависимости для определения эффективности реальной тарелки на основе экспериментальных данных можно вывести из обобщенной формулы (3) с учетом (5)

$$E_g = \frac{(1-h) \frac{L}{mV} - h_1}{\frac{x_n - \frac{y_{n-1}}{m}}{x_n - x_{n-1}} - h \frac{L}{mV} - h_1} \quad (13)$$

или из ее модификации (7) при $h = h_1 = 0.5$

$$E_{g,m} = \frac{\frac{L}{mV} - 1}{\frac{x_n + x_{n-1} - 2 \frac{y_{n-1}}{m}}{x_n - x_{n-1}} - \frac{L}{mV}} \quad (14)$$

На рис. 3, 4 приведены графические изображения зависимостей отдельных пар эффективностей комплексной модели массообмена при противоточном движении фаз в соответствии с формулой (12).

Как видно из рис. 3, величины E_{g1} , соответствующие противоточному массообмену и условиям связи идеальной и реальной тарелок, аналогичным модели Мерффи при анализе эффективности в паровой фазе,

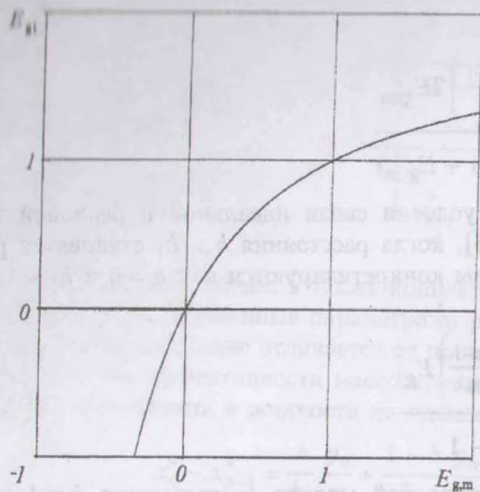


Рис. 3. Зависимость E_{g1} от $E_{g,m}$

больше значений $E_{g,m}$, соответствующих комплексной модели, в реальном диапазоне эффективностей ($0 < E < 1$) при любых значениях параметра L/mV . Это подтверждает предположение, что реальная тарелка, у которой $y_{n-1} = y_{n-1}^*$ и $x_{n-1} = x_{n-1}^*$, несколько идеализирована и что действительным условиям массообмена на тарелке больше соответствует комплексная модель.

Эффективность E_{g3} , отвечающая требованиям условий связи реальной и идеальной тарелок в модели Хаузена, но при противоточном движении фаз, в реальном диапазоне больше $E_{g,m}$ при $L/mV > 1$ (рис. 4, а). Причем с ростом L/mV различие величин эффективностей снижается, хотя полностью не исчезает, что также подтверждает большее соответствие комплексной модели действительным условиям. При $L/mV < 1$ реальным значениям одной из эффективностей соответствуют нереальные значения другой в любом диапазоне их величин.

Аналогичная зависимость имеет место между эффективностями E_{g4} и $E_{g,m}$ (рис. 4, б). В отличие от предыдущего рисунка $E_{g4} > E_{g,m}$ при $L/mV < 1$ и нереальным значениям одной из эффективностей соответствуют нереальные величины другой при $L/mV > 1$.

Проведенный анализ показывает, что в комплексной модели использование граничных условий связи идеальной и реальной тарелок, когда h или h_1 равны нулю или единице, приводит к завышению эффективности по сравнению с ее значением при $h = h_1 = 0.5$, т. е. заданием граничных условий действительная тарелка слегка идеализируется и реальными могут быть некоторые промежуточные значения эффективностей. Подтверждением этого являются также рис. 5, б.

Из рис. 5, а следует, что при заданных величинах $L/mV = 1.5$ и $h = 0.5$ снижение h_1 со среднего значения повышает эффективность, а рост расстояния более $3/4$ полной величины — приводит к нереальным значениям. Это указывает на возможность использования комплексной модели при $0.5 < h_1 < 0.75$, но предпочтительна область $h > 0.5$.

При фиксированных значениях L/mV и h_1 (рис. 5, б) эффективность возрастает при снижении h и принимает нереальные значения при $h > 0.666$. В этих условиях комплексную модель целесообразно использовать в диапазоне $0.5 < h < 0.666$.

Одновременное увеличение расстояний h и h_1 (рис. 6) снижает эффективность массообмена по сравнению с их средними значениями. Причем $E_g < E_{g,m}$, если $h = h_1 > 0.5$, и $E_g > E_{g,m}$, если эти расстояния меньше

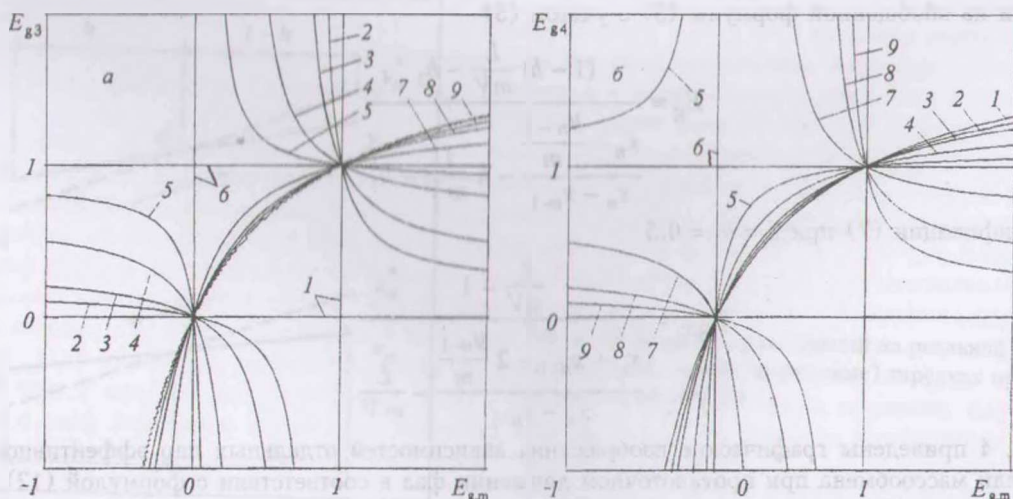


Рис. 4. Зависимость E_{g3} (а) и E_{g4} (б) от $E_{g,m}$ при различных значениях L/mV : 1 — 0; 2 — 0.1; 3 — 0.2; 4 — 0.5; 5 — 0.8; 6 — 1.0; 7 — 2.0; 8 — 5.0; 9 — 10

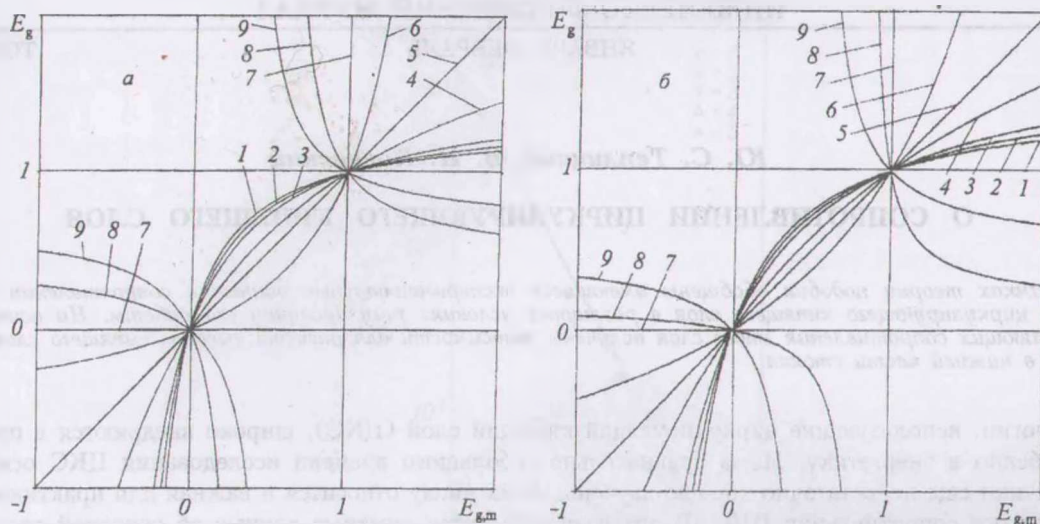


Рис. 5. Зависимость E_g от $E_{g,m}$ при $L/mV = 1.5$, $h = 0.5$ (а), $h_1 = 0.5$ (б) и различных значениях h_1 (а) и h (б): 1 - 0; 2 - 0.1; 3 - 0.2; 4 - 0.4; 5 - 0.5; 6 - 0.6; 7 - 0.75 (а), 0.666 (б); 8 - 0.8; 9 - 1.0

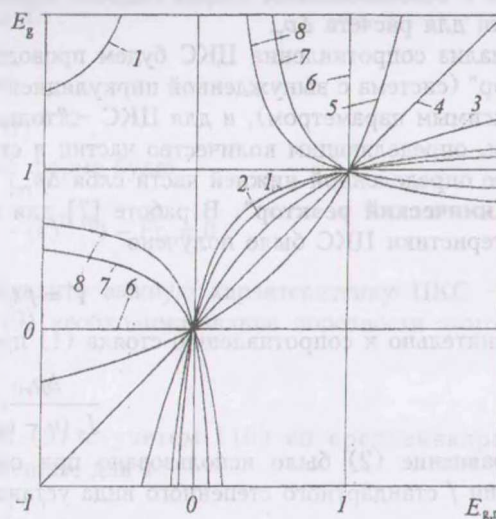


Рис. 6. Зависимость E_g от $E_{g,m}$ при $L/mV = 1.5$, $h_1 = h$ и различных значениях h : 1 - 0; 2 - 0.2; 3 - 0.4; 4 - 0.5; 5 - 0.55; 6 - 0.6; 7 - 0.8; 8 - 1.0

половины. Как видно из рис. 5, 6, при некоторых условиях $E_g < E_{g,m}$; это, вероятно, обусловлено тем, что в комплексной модели эффективность минимальна, когда h и h_1 отличаются не только от граничных величин, но и от среднего значения.

Предложенная комплексная модель массообмена расширяет область применения и уменьшает негативные обстоятельства, вызванные как условиями формирования известных моделей, так и характером движения фаз.

Обозначения

E - эффективность тарелки; h, h_1 - безразмерное расстояние от места ввода пара и жидкости соответственно до поверхности равенства концентраций фаз в идеальной и действительной тарелках; L - молярный поток жидкости; m - коэффициент равновесия; V - молярный поток пара; x, y - концентрация легколетучего компонента соответственно в жидкости и паре. Индексы: g - противоточное движение фаз; g,m - противоточное движение фаз при $h = h_1 = 0.5$; liq - жидкая фаза; n - номер рассматриваемой тарелки; n-1 - номер предыдущей тарелки по ходу движения пара; v - паровая фаза; * - идеальные условия.

Литература

1. Murphree E. V. // Ind. Eng. Chem. 1925. Vol. 17, N 7. P. 747-750.
2. Hausen H. // Chem. Ing. Tech. 1953. Bd. 25, N 10. S. 595-597.
3. English G. E., Winkle M. Van. // Chem Eng. 1963. Vol. 70, N 23. P. 241-244.
4. Funada I., Asahara K., Hirose J., Tachibana H. // Kogaku kogaku rombunshu. 1987. Vol. 13, N 5. P. 533-541.
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. Марушкин Б. К., Теляшева Л. М. // Нефтепереработка и нефтехимия. 1976. № 7. С. 14-16.
8. Holland C. D., McMahon K. S. // Chem. Eng. Sci. 1970. Vol. 25, N 3. P. 431-436.
9. Кударов Р., Тасев Ж. // ЖПХ. 1985. Т. 58, № 8. С. 1813-1818.
10. Марушкин Б. К., Теляшев Г. Г. // Технология нефти и газа. Вопросы фракционирования. Вып. 3. Уфа, 1975. С. 35-86.
11. Павлечко В. Н. // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 1. С. 50-56.