ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2002 г. ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ ТОМ 75, № 1

УДК 66.048.375

В. Н. Павлечко

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ ТАРЕЛОК. 7. ВЗАИМОСВЯЗЬ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В зависимости от величин расстояний h и h_1 выделены четыре области комплексной модели массообмена, граничными случаями которых являются модель Мерфри при анализе эффективности в паровой и жидкой фазах, модель Хаузена и гипотетическая модель. В каждой области найдены пределы изменения h и h_1. Обоснованы зависимости h и h_1 от коэффициентов активности легко- и труднолетучего компонентов и константы равновесия.

Из работ [1–3] могут быть получены соотношения соответственно при прямоточном, противоточном и перекрестном движении фаз

$$\frac{L}{mV} = -\frac{2h_1 - 1 - \dfrac{1 - \dfrac{E_{\text{п}}}{E_{\text{п,m}}}}{1 - E_{\text{п}}}}{2h - 1 - \dfrac{1 - \dfrac{E_{\text{п}}}{E_{\text{п,m}}}}{1 - E_{\text{п}}}}, \tag{1}$$

$$\frac{L}{mV} = -\frac{2h_1 - 1 + \dfrac{1 - \dfrac{E_{\text{g}}}{E_{\text{g,m}}}}{1 - E_{\text{g}}}}{2h - 1 - \dfrac{1 - \dfrac{E_{\text{g}}}{E_{\text{g,m}}}}{1 - E_{\text{g}}}}, \tag{2}$$

$$\frac{L}{mV} = -\frac{2h_1 - 1}{2h - 1 - \dfrac{1 - \dfrac{E_{\text{k}}}{E_{\text{k,m}}}}{1 - E_{\text{k}}}}. \tag{3}$$

Поскольку отношение L/mV в реальных условиях положительно, в формулах (1)–(3) при отрицательных величинах числителей знаменатели должны быть больше нуля и наоборот. Кроме того, это отношение теоретически может быть равным нулю. Отрицательным и нулевым числителям в (1)–(3) отвечают соответствующие условия

$$h_{1\text{п}} \le \frac{1}{2} + \frac{1 - \dfrac{E_{\text{п}}}{E_{\text{п,m}}}}{2\,(1 - E_{\text{п}})}, \tag{4}$$

$$h_{1\text{g}} \le \frac{1}{2} - \frac{1 - \dfrac{E_{\text{g}}}{E_{\text{g,m}}}}{2\,(1 - E_{\text{g}})}, \tag{5}$$

$$h_{1\text{k}} \le \frac{1}{2}, \tag{6}$$

а положительным знаменателям –

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск. Поступила 13.03.2001, в окончательной редакции – 16.05.2001.

$$h \geq \frac{1}{2} + \frac{1 - \dfrac{E}{E_m}}{2\,(1 - E)}\,. \tag{7}$$

Последнее выражение справедливо для прямотока, противотока и перекрестного тока.

Поскольку комплексная модель должна быть применима во всех трех указанных формах организации потоков, наиболее общим из формул (4)–(6) является условие (5), т. е.

$$h_1 \leq \frac{1}{2} - \frac{1 - \dfrac{E}{E_m}}{2\,(1 - E)}\,. \tag{8}$$

Положительным числителям в (1)–(3) соответствуют условия

$$h_{1п} \geq \frac{1}{2} + \frac{1 - \dfrac{E_п}{E_{п,m}}}{2\,(1 - E_п)}\,, \quad h_{1k} \geq \frac{1}{2}\,, \quad h_{1g} \geq \frac{1}{2} - \frac{1 - \dfrac{E_g}{E_{g,m}}}{2\,(1 - E_g)}\,,$$

наиболее общее из которых имеет вид

$$h_1 \geq \frac{1}{2} + \frac{1 - \dfrac{E}{E_m}}{2\,(1 - E)}\,, \tag{9}$$

а отрицательным знаменателям –

$$h \leq \frac{1}{2} + \frac{1 - \dfrac{E}{E_m}}{2\,(1 - E)}\,. \tag{10}$$

Зависимости (7)–(10) получены при $E < E_m$. При обратном соотношении эффективностей из (1)–(3) аналогичным образом получаем при отрицательных числителях и положительных знаменателях

$$h_1 \leq \frac{1}{2} - \frac{\dfrac{E}{E_m} - 1}{2\,(1 - E)}\,, \tag{11}$$

$$h \geq \frac{1}{2} - \frac{\dfrac{E}{E_m} - 1}{2\,(1 - E)} \tag{12}$$

и при положительных числителях и отрицательных знаменателях

$$h_1 \geq \frac{1}{2} + \frac{\dfrac{E}{E_m} - 1}{2\,(1 - E)}\,, \tag{13}$$

$$h \leq \frac{1}{2} - \frac{\dfrac{E}{E_m} - 1}{2\,(1 - E)}\,. \tag{14}$$

Неравенства (7)–(14) относятся к различным областям комплексной модели. Зависимости (7) и (8) характеризуют ту ее часть, в которой расстояния h_1 и h принимают значения в диапазонах $0 \leq h_1 \leq 0.5$, $1 \geq h \geq 0.5$. Граничным случаем этой области является модель Мерфри [4–6] при анализе эффективности в жидкости, когда $h_1 = 0$, $h = 1$. Соотношения (9) и (10) отличаются интервалами $1 \geq h_1 \geq 0.5$, $0.5 \leq h \leq 1$. Предельными значениями являются $h_1 = h = 1$, относящиеся к выдвинутой ранее [7, 8] гипотетической модели массообмена. Неравенства (11) и (12) касаются той части комплексной модели, у которой h_1 и h минимальны и в пределе равны нулю, как это имеет место в модели Хаузена [5, 6, 9]. Формулы (13) и (14) характеризуют сектор комплексной модели, рубежом которой является модель Мерфри [4–6] при анализе эффективности в паровой фазе. Обычные значения рассматриваемых расстояний находятся в рамках $1 \geq h_1 \geq 0.5$, $0 \leq h \leq 0.5$.

Другим пределом отмеченных областей комплексной модели являются значения $h_1 = h = 0.5$, имеющие место при разделении идеальных смесей.

В работах [1–3] показано, что эффективность массообмена снижается при увеличении расстояний h_1 и h. Из этой закономерности выпадают неравенства (8) и (13), в первом из которых низким эффективностям соответствуют малые значения h_1, во втором – высоким величинам E большие h_1. Эти неравенства отражают области комплексной модели, граничными случаями которых является модель Мерфри в обоих вариантах. Вероятность существования этих областей обусловлена использованием во многих расчетных формулах комплекса $(hL/mV + h_1)$, в котором снижение одного из расстояний компенсируется увеличением другого, что, однако, вносит определенные погрешности в получаемые результаты. Возможно, из-за отмеченных особенностей некоторые исследователи критически относятся к модели Мерфри и отдают предпочтение другим моделям.

Из (1)–(3) могут быть получены зависимости расстояний h_1 и h от основных параметров комплексной модели соответственно при прямоточном, противоточном и перекрестном движении пара и жидкости

$$h \frac{L}{mV} + h_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{mV} + 1\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{L}{mV} + 1\right) \frac{1 - \dfrac{E_{\text{п}}}{E_{\text{п,m}}}}{1 - E_{\text{п}}} , \tag{15}$$

$$h \frac{L}{mV} + h_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{mV} + 1\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{L}{mV} - 1\right) \frac{1 - \dfrac{E_{\text{g}}}{E_{\text{g,m}}}}{1 - E_{\text{g}}} , \tag{16}$$

$$h \frac{L}{mV} + h_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{mV} + 1\right) + \frac{L}{2mV} \frac{1 - \dfrac{E_{\text{k}}}{E_{\text{k,m}}}}{1 - E_{\text{k}}} . \tag{17}$$

При подстановке в (15) предельного значения $h = 1$ другое расстояние определится зависимостью

$$h_1 = \frac{E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}}) + E_{\text{п,m}} - E_{\text{п}}}{2E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}})} - \frac{L}{mV} \frac{E_{\text{п}}\,(1 - E_{\text{п,m}})}{2E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}})} . \tag{18}$$

При допущении $L/mV = 1$ полученное выражение упростится

$$h_1 = \frac{E_{\text{п,m}} - E_{\text{п}}}{E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}})} . \tag{19}$$

Из зависимости (19) видно, что положительные значения h_1 достижимы при $E_{\text{п,m}} > E_{\text{п}}$ и невозможны, если $E_{\text{п}} > E_{\text{п,m}}$. Для получения реальных величин h_1 во втором случае необходимо снижать L/mV в (18) или одновременно h и L/mV в (15).

Если в формуле (15) задать $h_1 = 1$, то в результате получим

$$h \frac{L}{mV} = \frac{L}{mV} \frac{E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}}) + E_{\text{п,m}} - E_{\text{п}}}{2E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}})} - \frac{E_{\text{п}}\,(1 - E_{\text{п,m}})}{2E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}})} . \tag{20}$$

При подстановке $L/mV = 1$ зависимость (20) упростится до вида, аналогичного (19):

$$h = \frac{E_{\text{п,m}} - E_{\text{п}}}{E_{\text{п,m}}\,(1 - E_{\text{п}})} . \tag{21}$$

Положительные значения h в формуле (21) также невозможны при $E_{\text{п}} > E_{\text{п,m}}$. Для исключения подобной ситуации необходимо в отличие от (18) увеличивать L/mV в (20). Отмеченное противоречие указывает на то, что реальные значения одного из рассматриваемых расстояний достижимы, если другое из них меньше единицы, независимо от величин L/mV.

Задаваясь поочередно значениями $h = 1$ и $h_1 = 1$ в (16), соответственно получим

$$h_1 = \left(\frac{L}{mV} - 1\right) \frac{E_{\text{g}}\,(E_{\text{g,m}} - 1)}{2E_{\text{g,m}}\,(1 - E_{\text{g}})} , \tag{22}$$

$$h = \left(1 - \frac{mV}{L}\right) \frac{E_{\text{g,m}}(1 - E_{\text{g}}) + E_{\text{g,m}} - E_{\text{g}}}{2E_{\text{g,m}}\,(1 - E_{\text{g}})} . \tag{23}$$

Первая из выведенных зависимостей показывает невозможность существования положительных величин h_1 независимо от отношения L/mV и соотношения эффективностей $E_{\text{g,m}}$ и E_{g}. Следовательно, реальные h_1 достижимы при значениях h, заведомо меньших единицы. Анализ выражения (23) показывает, что действительные h зависят от соотношения эффективностей и невозможны при $E_{\text{g,m}} < 1$. Поэтому величины h_1 также должны быть меньше единицы. Указанные особенности подтверждаются рис. 5 и 6, приведенными в [2], на которых для $L/mV = 1.5$ отсутствуют реальные значения эффективностей при $h = 0.5$ и $h_1 > 0.75$, $h_1 = 0.5$ и $h > 0.666$, а также при $h = h_1 > 0.6$.

Подстановка h, h_1 и L/mV, равных единице, в (17) приводит к аналогичным (19) и (21) формулам с той лишь разницей, что при перекрестном движении пара и жидкости расстояния h_1 и h получаются в два раза меньшими, чем при прямоточном. Следовательно, эти расстояния могут быть положительными при оговоренных для прямотока условиях.

Поскольку вычитание из правой части зависимости (16) величины L/mV, которая при противотоке должна быть больше единицы, приводит к нереальным h_1, а вычитание значения, немногим меньше единицы, – к приемлемым значениям h, резонно уменьшить величину h на L/mV. Это расширило бы возможности комплексной модели в отношении расстояния h, но одновременно ограничило h_1, предельное значение которого при этом допущении не может превышать mV/L. Однако отмеченные особенности взаимосвязи h и h_1 характерны только для противотока и не существенны для прямоточного и перекрестного движения фаз. Кроме того, из рис. 5, *а*, *б* [1, 2], рис. 4, *а*, *б* [3] видно, что изменения h и h_1 оказывают практически одинаковое воздействие на отношение эффективностей E и E_{m}. Незначительное различие в указанных парах графиков обусловлено множителем L/mV при h, например, в левых частях зависимостей (15)–(17). И наконец, как следует из [10], при том же $L/mV = 1.5$ перемешивание жидкости расширяет диапазон возможных изменений величин h и h_1, который при $\varphi = 0.5$ изменяется от 0 до 0.8 по сравнению с максимальными их значениями 0.6 при отсутствии перемешивания. Противоточное же движение без какого-либо перемешивания практически не встречается. Поэтому для областей комплексной модели, граничными случаями которых являются модель Хаузена и гипотетическая модель, можно принять равенство расстояний h и h_1.

Кроме отмеченных, значения h_1 и h для областей, предельными случаями которых являются модель Хаузена и гипотетическая модель, должны отвечать следующим требованиям:

а) при увеличении активности легколетучего компонента h должно стремиться к нулю, а при уменьшении – к единице;

б) с возрастанием активности труднолетучего компонента h_1 должно стремиться к единице, а со снижением активности – к нулю;

в) при разделении смесей, приближающихся к идеальным, когда коэффициенты активности обоих компонентов приближаются к единице, h и h_1 должны быть близкими к 0.5.

Высказанные условия позволяют сформулировать следующую зависимость для определения расстояний h и h_1:

$$h = h_1 = \frac{\gamma_{\text{т}}}{\gamma_{\text{л}} + \gamma_{\text{т}}} = \frac{1}{\dfrac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{т}}} + 1} . \tag{24}$$

Вместо коэффициентов активности в (24) могут быть также использованы парциальные давления легко- и труднолетучего компонентов. Однако поскольку и те, и другие величины редко встречаются в литературе, а более доступны и получили широкое применение на практике данные о коэффициентах равновесия, то для определения расстояний h и h_1 приемлемо использование выражения

$$h = h_1 = \frac{1}{m + 1} . \tag{25}$$

Таким образом, с возрастанием коэффициента активности легколетучего, со снижением соответствующей величины труднолетучего компонентов и с увеличением константы равновесия расстояния h и h_1 уменьшаются и комплексная модель сдвигается в направлении модели Хаузена [5, 6, 9]. При возрастании $\gamma_{\text{т}}$, падении $\gamma_{\text{л}}$ и m комплексная модель стремится к гипотетической модели. Если одновременно возрастают или снижаются активности обоих компонентов, то необходим сопоставительный анализ их активностей. Модель массообмена в зависимости от преобладающего влияния одного их компонентов может отклоняться как в направлении модели Хаузена, так и в сторону гипотетической модели. Тем самым в зависимости от активности компонентов разделяемой смеси или от коэффициента равновесия определяется модель массообмена, которая является индивидуальной для конкретной смеси, но может также видоизменяться для данного раствора от тарелки к тарелке при отклонении активности его компонентов от начальных величин.

В модели Мерфри с возрастанием активности легколетучего компонента и с убыванием активности труднолетучего компонента h_1 должно стремиться к единице, а при противоположной тенденции активностей компонентов – к нулю, что приводит к зависимости

$$h_1 = \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{л}} + \gamma_{\text{т}}} = \frac{1}{\dfrac{\gamma_{\text{т}}}{\gamma_{\text{л}}} + 1} \tag{26}$$

или

$$h_1 = \frac{m}{m + 1} . \tag{27}$$

Расстояние h для этой модели при анализе эффективности в паровой и жидкой фазах определяется по формулам (24) или (25).

Обозначения

E – эффективность тарелки; $\gamma_л$ и $\gamma_т$ – коэффициенты активности соответственно легко- и труднолетучего компонентов реального раствора; φ – степень перемешивания; h, h_1 – безразмерное расстояние от места ввода пара и жидкости соответственно до поверхности равенства концентраций фаз на идеальной и реальной тарелках; L – молярный поток жидкости; m – константа равновесия; V – молярный поток пара. Индексы: g – противоток; k – перекрестный ток; m – значения параметров при $h = h_1 = 0.5$; п – прямоток.

Литература

1. **Павлечко В. Н.**//ИФЖ. 2001. Т. 74, № 1. С. 50–56.
2. **Павлечко В. Н.**//ИФЖ. 2001. Т. 74, № 1. С. 57–61.
3. **Павлечко В. Н.**//ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2. С. 43–47.
4. **Murphree E. V.**//Ind. Eng. Chem. 1925. Vol. 17, No. 7. Pp. 747–750.
5. **Medina A. G., Ashton N., and McDermott C.**//Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34, No. 9. Pp. 1105–1112.
6. **Savcovic-Stevanovic J.**//Separ. Sci. Technol. 1984. Vol. 19, No. 4–5. Pp. 283–285.
7. **Павлечко В. Н.**//Тр. БГТУ. 1998. Вып. VI. С. 131–138.
8. **Павлечко В. Н.**//Тр. БГТУ. 1998. Вып. VI. С. 138–144.
9. **Hausen H.**//Chem. Ing. Tech. 1953. Bd. 25, No. 10. S. 595–597.
10. **Павлечко В. Н.**//ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2. С. 38–42.