

УДК 66.048.375

В. Н. Павлечко, доцент;  
И. М. Плехов, профессор

### ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССООБМЕНА ПРИ ПРОТИВОПОЛОЖНОМ И ОДНОНАПРАВЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ НА СМЕЖНЫХ ТАРЕЛКАХ

Distillation plate efficiency dependence on liquid movement direction on adjacent plates for four types of mass exchange is considered. It is shown that there is higher concentration of volatile component in vapor at the beginning of a plate and its lower concentration in the vapor leaving a plate. Mean concentration after the plate does not depend on liquid movement direction.

В промышленных ректификационных колоннах жидкость движется на смежных тарелках, как правило, в противоположных направлениях. Однонаправленное движение жидкости практически не используется из-за определенных сложностей конструктивного характера.

При движении жидкости по тарелке она обедняется легколетучим компонентом. Соответственно пар, выходящий из начального по ходу движения жидкости участка тарелки, имеет большую концентрацию по сравнению с паром после конечного участка тарелки. При противоположном движении жидкости пар, выходящий из начального участка нижней тарелки, на вышележащей тарелке контактирует с жидкостью, обедненной легколетучим компонентом, а пар, выходящий из конечного участка нижней тарелки, на вышележащей тарелке контактирует с жидкостью, содержащей большее количество этого компонента. Таким образом, содержание легколетучего компонента в паре, выходящем из противоположных участков двух смежных тарелок, частично выравнивается (рис. 1а).

При однонаправленном движении жидкости такого выравнивания концентраций пара не происходит (рис. 1б).

Настоящая работа посвящена анализу изменения концентраций легколетучего компонента в паровой фазе в зависимости от направления движения жидкости.

Пар, выходящий из начального по ходу движения жидкости участка тарелки, находится в равновесии с поступающей на  $n$ -ую идеальную тарелку жидкостью,

$$y_{nn}^* = mx_n^* \quad (1)$$

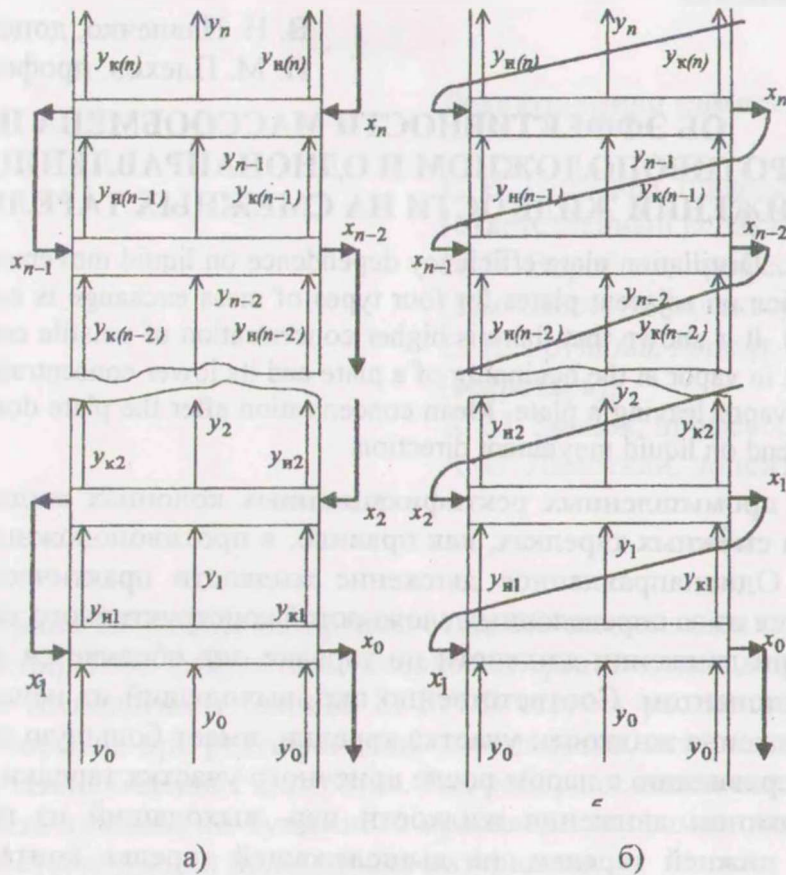


Рис. 1. Распределение потоков компонентов при противоположном (а) и одноподвижном (б) движении пара на смежных тарелках

а выходящий из конечного участка  $n$ -ой тарелки – с уходящей жидкостью,

$$y_{кn}^* = mx_{n-1}^* \quad (2)$$

Среднюю концентрацию легколетучего компонента в паре после  $n$ -ой тарелки представим как среднеарифметическое значение

$$y_n^* = \frac{m(x_n^* + x_{n-1}^*)}{2} \quad (3)$$

Анализ связей идеальной и действительной тарелок позволяет выделить четыре варианта [1, 2].

В первом варианте одинаковые составы имеют поступающие на обе тарелки потоки пара ( $y_{n-1} = y_{н-1}^*$ ) и уходящие потоки жидкости ( $x_{n-1} = x_{н-1}^*$ ), что характерно для модели Мерффи при анализе эф-

эффективности в паровой фазе [3, 4]. Во втором варианте равны составы потоков на обеих тарелках уходящего пара ( $y_n = y_n^*$ ) и поступающей жидкости ( $x_n = x_n^*$ ), что свойственно модели Мерффи при анализе эффективности по жидкости [3, 4]. Третий вариант характеризуется равенством составов поступающих на обе тарелки пара ( $y_{n-1} = y_{n-1}^*$ ) и жидкости ( $x_n = x_n^*$ ), что имеет место в модели Хаузена [4, 5]. Последний вариант отличается равенством составов пара ( $y_n = y_{n-1}^*$ ) и жидкости ( $x_{n-1} = x_{n-1}^*$ ), уходящих с обеих тарелок [1, 2]. Кроме того, на идеальной и реальной тарелках равны молярные потоки пара и жидкости, а также теплообмен между обеими тарелками и окружающей средой.

Предположим, что наклон равновесной линии мало зависит от концентрации легколетучего компонента для  $n$ -го количества тарелок.

Для первого варианта решением уравнений материального баланса по легколетучему компоненту идеальной и действительной тарелок, выражений эффективности, приведенных в [1, 2], с учетом (1) и (2) можно получить следующие зависимости разности концентраций для четного количества  $n$  тарелок, начиная с нижней, при противоточном движении жидкости на смежных тарелках:

для левого края колонны (рис. 1а):

$$\left. \begin{aligned} y_{н1} - y_0 &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})z; \\ y_{к2} - y_{н1} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})qp; \\ y_{н3} - y_{к2} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})zp^2; \\ y_{к4} - y_{н3} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})qp^3; \\ y_{н(n-1)} - y_{к(n-2)} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})zp^{n-2}; \\ y_{к(n)} - y_{н(n-1)} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})qp^{n-1}; \end{aligned} \right\} (4)$$

для правого края колонны (рис. 1а):

$$\begin{aligned}
 y_{к1} - y_0 &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})q; \\
 y_{н2} - y_{к1} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})zp; \\
 y_{к3} - y_{н2} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})qp^2; \\
 y_{н4} - y_{к3} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})zp^3; \\
 y_{к(n-1)} - y_{н(n-2)} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})qp^{n-2}; \\
 y_{к(n)} - y_{н(n-1)} &= m(x_0 - \frac{y_0}{m})qp^{n-1},
 \end{aligned} \tag{5}$$

где

$$z = \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} - \frac{1}{2}} E_1; \tag{6}$$

$$q = E_1; \tag{7}$$

$$p = \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} + E_1 - \frac{L}{mV} E_1}{\frac{L}{mV} - \frac{1}{2}}. \tag{8}$$

После сложения левых и правых частей систем уравнений (4) и (5) и соответствующих преобразований можно получить следующие выражения при противоположном движении жидкости на смежных тарелках:

$$(y_{н(n)} - y_0)' = m(x_0 - \frac{y_0}{m})(q + zp) \frac{1-p^n}{1-p}; \tag{9}$$

$$(y_{к(n)} - y_0)' = m(x_0 - \frac{y_0}{m})(z + qp) \frac{1-p^n}{1-p}. \tag{10}$$

Для этого же варианта решением уравнений материального баланса, выражений эффективности [1, 2] с учетом зависимостей (1) и

(2) можно получить для однонаправленного движения жидкости на смежных тарелках следующие выражения:

для левого края колонны (рис. 1б):

$$\begin{aligned}
 y_{н1} - y_0 &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)z; \\
 y_{н2} - y_{н1} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)zp; \\
 y_{н3} - y_{н2} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)zp^2; \\
 y_{н4} - y_{н3} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)zp^3; \\
 y_{н(n-1)} - y_{н(n-2)} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)zp^{n-2}; \\
 y_{н(n)} - y_{н(n-1)} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)zp^{n-1};
 \end{aligned} \tag{11}$$

для правого края колонны (рис. 1б):

$$\begin{aligned}
 y_{к1} - y_0 &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)q; \\
 y_{к2} - y_{к1} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)qp; \\
 y_{к3} - y_{к2} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)qp^2; \\
 y_{к4} - y_{к3} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)qp^3; \\
 y_{к(n-1)} - y_{к(n-2)} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)qp^{n-2}; \\
 y_{к(n)} - y_{к(n-1)} &= m\left(x_0 - \frac{y_0}{m}\right)qp^{n-1};
 \end{aligned} \tag{12}$$

В результате сложения левых и правых частей систем уравнений (11) и (12) и соответствующих преобразований могут быть получены следующие выражения:

$$(y_{н(n)} - y_0)^n = m(x_0 - \frac{y_0}{m}) z \frac{1-p^n}{1-p}; \quad (13)$$

$$(y_{к(n)} - y_0)^n = m(x_0 - \frac{y_0}{m}) q \frac{1-p^n}{1-p}. \quad (14)$$

Как и при противоположном движении жидкости на смежных тарелках, при однонаправленном движении в первом варианте массообмена справедливы зависимости (6) – (8).

Делением левых и правых частей уравнений соответственно (9) и (13), (10) и (14) можно получить соотношения, характеризующие эффективность тарелок при разных направлениях движения жидкости на смежных тарелках:

$$\frac{(y_{н(n)} - y_0)'}{(y_{н(n)} - y_0)^n} = \frac{q + p}{z + p}; \quad (15)$$

$$\frac{(y_{к(n)} - y_0)'}{(y_{к(n)} - y_0)^n} = \frac{z + p}{q + p}. \quad (16)$$

Поскольку в соответствии с формулами (6) и (7)  $q < z$ , то в зависимости (15) числитель меньше знаменателя, а в (16) – больше. Это свидетельствует о том, что однонаправленное движение жидкости на смежных тарелках позволяет получить большее содержание легколетучего компонента в паре, покидающем начальный по ходу движения жидкости участок тарелки, чем при противоположном движении жидкости, но меньшее содержание этого компонента в паре, покидающем конечный участок тарелки. Средняя же концентрация пара после тарелки, что имеет место при перемешивании пара между тарелками, не зависит от организации движения жидкости.

Формулы (15) и (16) показывают также, что количество тарелок не оказывает влияния на разность концентраций легколетучего компонента в паре в зависимости от направления движения жидкости на смежных тарелках. Для анализа влияния направления движения жидкости на эффективность массообмена достаточно рассмотреть две смежные тарелки.

При анализе уравнений материальных балансов идеальной и действительной тарелок, выражений эффективности [1, 2] с учетом зависимостей (1) и (2) могут быть получены формулы (9) – (16) также и

для второго, третьего и четвертого вариантов. Эти варианты отличаются от первого другими значениями величин  $z$ ,  $q$  и  $p$ .

Для второго варианта

$$z = \frac{\frac{L}{mV} E_2 + \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} E_2 + \frac{1}{2} - E_2}; \quad (17)$$

$$q = \frac{\frac{L}{mV} E_2 - \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} - E_2}; \quad (18)$$

$$p = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} E_2 + \frac{1}{2} - E_2}. \quad (19)$$

Для третьего варианта

$$z = \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} - E_3} E_3; \quad (20)$$

$$q = \frac{\frac{L}{mV} - \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} - E_3} E_3; \quad (21)$$

$$p = \frac{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} - \frac{L}{mV} E_3}{\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} - E_3}. \quad (22)$$

Для четвертого варианта

$$z = \frac{\frac{L}{mV} E_4 + \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} E_4 - \frac{1}{2}}; \quad (23)$$

$$q = 1; \quad (24)$$

$$p = \frac{E_4 - \frac{1}{2}}{\frac{L}{mV} E_4 - \frac{1}{2}} \quad (25)$$

Влияние направления движения жидкости на смежных тарелках во втором, третьем и четвертом вариантах массообмена аналогично первому: при однонаправленном движении увеличивается содержание легколетучего компонента в паре после начального участка верхней тарелки и уменьшается после ее конечного участка по сравнению с противоположным движением жидкости.

Конкретные значения величин, рассчитанных при  $L/mV = 1,5$  и различных значениях эффективности  $E$ , приведены в таблице.

Таблица

	$E$	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
$z$	0,50 0,75 1,0	1,0 1,50 2,0	1,667 1,857 2,0	0,667 1,20 2,0	5,0 2,60 2,0
$q$	0,50 0,75 1,0	0,50 0,75 1,0	0,333 0,714 1,0	0,333 0,60 1,0	1,0 1,0 1,0
$p$	0,50 0,75 1,0	0,75 0,625 0,50	0,667 0,571 0,50	0,833 0,70 0,50	0,0 0,40 0,50
$\frac{(y_{n(n)} - y_0)'}{(y_{n(n)} - y_0)''} = \frac{q + p}{z + p}$	0,50 0,75 1,0	0,714 0,692 0,667	0,520 0,608 0,667	0,727 0,706 0,667	0,20 0,56 0,667
$\frac{(y_{k(n)} - y_0)'}{(y_{k(n)} - y_0)''} = \frac{z + p}{q + p}$	0,50 0,75 1,0	1,571 1,615 1,667	3,40 2,018 1,667	1,545 1,588 1,667	5,0 2,143 1,667

Как следует из данных таблицы, при увеличении эффективности  $E$  величины  $z$  и  $q$  возрастают в первых трех вариантах, а величина  $p$  снижается. В четвертом варианте  $z$  снижается,  $q$  остается неизменной, а  $p$  увеличивается. При эффективности, равной единице, т.е. когда исчезают различия в условиях связи идеальной и реальной тарелок, рас-



смаатриваемые величины неизменны во всех вариантах:  $z = 2,0$ ;  $q = 1,0$  и  $p = 0,5$ .

При увеличении эффективности  $E$  снижается влияние направления движения на состав пара после ректификационных тарелок. Так, например, отношение разности концентраций легколетучего компонента в паре после и до начального участка пары тарелок при противоположном и однонаправленном движении жидкости снижается в первом и третьем и возрастает во втором и четвертом вариантах, а после и до конечного участка пары тарелок, наоборот, уменьшаются во втором и четвертом и увеличивается в первом и третьем вариантах. Эти отношения практически мало изменяются в диапазоне эффективностей  $E = 0,5 - 1,0$  для первых трех вариантов массообмена и только для четвертого варианта достигают трехкратной разницы. При эффективности  $E = 1$  указанная разность концентраций при противоположном движении по сравнению с однонаправленным движением жидкости после начального участка тарелки на треть меньше, а после конечного участка тарелки – на две трети больше во всех вариантах.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$E$  - эффективность тарелки;  $L$  - молярный поток жидкости;  $m$  - коэффициент равновесия;  $V$  - молярный поток пара;  $x$  - концентрация легколетучего компонента в жидкости;  $y$  - концентрация легколетучего компонента в паре;  $q, p, z$  - вспомогательные величины. Индексы:  $n$  - номер рассматриваемой тарелки;  $n-1$  - номер предыдущей тарелки по ходу движения пара;  $n, k$  - соответственно начальный и конечный участок тарелки по ходу движения жидкости;  $V$  - паровая фаза; \* - равновесное состояние; 0 - кубовый продукт; 1 - 4 - номера рассматриваемых вариантов изменения концентраций; ', '' - соответственно противоположное и однонаправленное движение жидкости на смежных тарелках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Павлечко В.Н. // Труды БГТУ. Серия III. Химия и химическая технология. 1998. Вып. VI. С. 131 - 138.
2. Павлечко В.Н. // Труды БГТУ. Серия III. Химия и химическая технология. 1998. Вып. VI. С. 138 - 144.
3. Murphree E.V. // Ind. Eng. Chem. 1925. Vol. 17, № 7. P. 747 - 750.
4. Medina A.G., Ashton N., McDermott C. // Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34, № 9. P. 1105-1112.
5. Hausen H. // Chem. Ing. Tech. 1953. J. 25, № 10. S. 595-597.