

В.Н.Павлечко, доцент;
В.Н.Гуляев, доцент

АНАЛИЗ ДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПРИ ПРОТИВОТОЧНОМ И ОДНОНАПРАВЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ НА СМЕЖНЫХ ТАРЕЛКАХ

Distillation plate working conditions under cross movement of phases are analyzed. Optimal parameter ranges are pointed out.

В [1] проведено сравнение отношения разности концентраций легколетучего компонента в паровой фазе после и до двух реальных тарелок, которое может заметно отличаться в зависимости от направления движения жидкости на смежных тарелках при перекрестном движении потоков. Эти отличия особенно существенны для конечного участка тарелки по ходу движения жидкости. Следует учесть, что при противоположном движении жидкости на смежных тарелках содержание легколетучего компонента в паровой фазе несколько нивелируется. Поэтому можно предполагать разительное отличие концентраций легколетучего компонента в паре после начального и конечного участков тарелки, что не согласуется с гораздо меньшими изменениями содержания этого компонента в жидкости на тарелке.

В пределах одной тарелки интенсивность массообмена практически не изменяется, т.е. на начальном и конечном участках тарелки удельная поверхность и коэффициент массопередачи имеют одинаковые значения. Поэтому отмеченные выше особенности, вероятно, обусловлены величинами движущей силы, которые, в свою очередь, определяются использованными моделями Мерффри [2, 3] и Хаузена [3, 4].

В связи с изложенным представляется целесообразным провести анализ величин движущей силы во всех представленных в [1] вариантах.

Движущую силу выразим разностью концентраций легколетучего компонента в жидкости в равновесных условиях и в реальной паровой фазе. Причем рассмотрим ее на начальных и конечных участках по ходу движения пара и жидкости, заимствуя необходимые зависимости из [1], отдельные из которых приведены в таблице.

Для начального участка нижней тарелки по ходу движения жидкости при противоположном движении жидкости на смежных тарелках (рис., а).

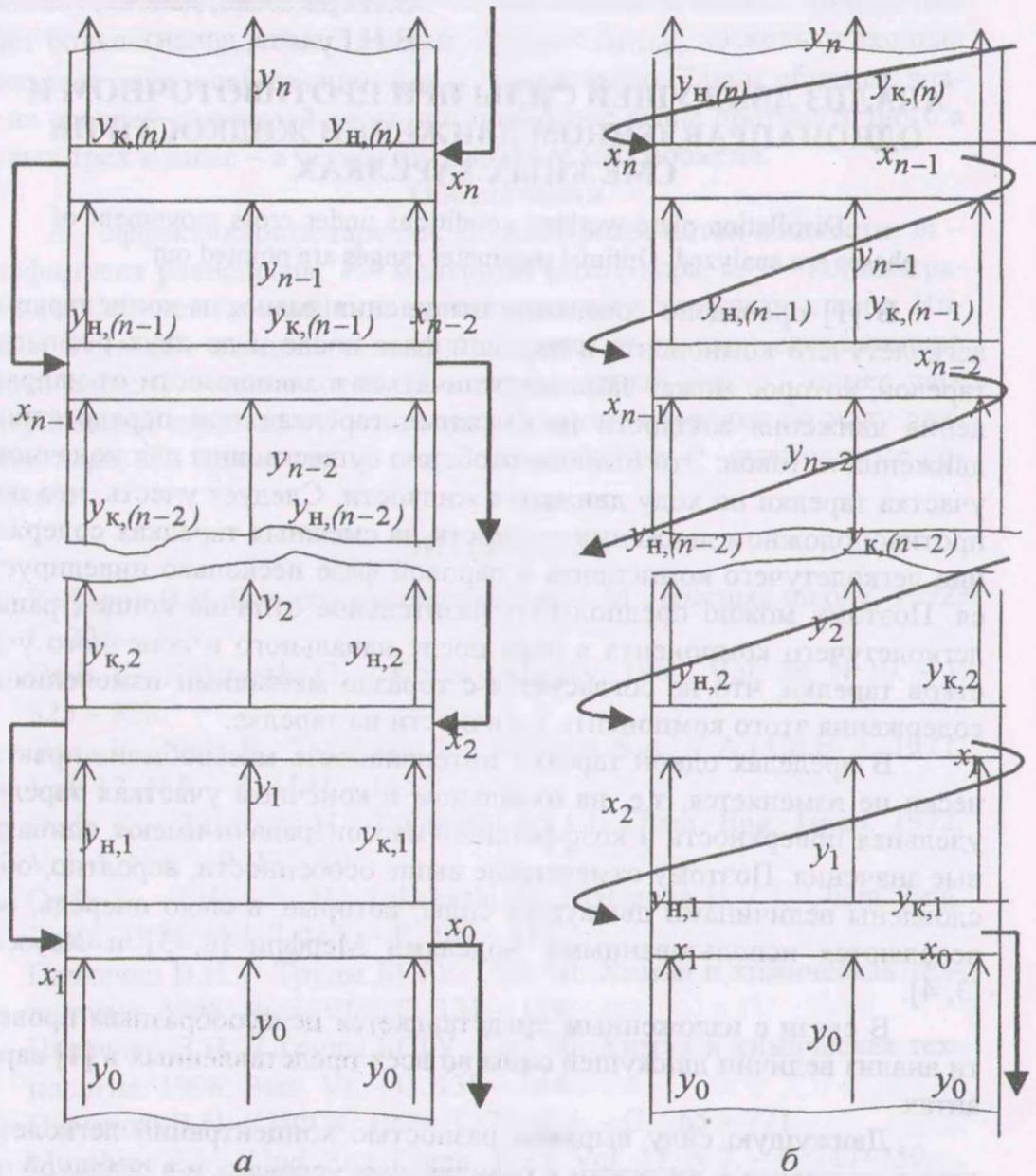


Рис. Распределение потоков компонентов при противоположном (а) и однонаправленном (б) движении пара на смежных тарелках

$$\Delta y_{H, \text{лвх}} = mx_1 - y_0 = (mx_0 - y_0)(1 + r); \quad (1)$$

$$\Delta y_{H, \text{лвых}} = mx_1 - y_{n1} = (mx_0 - y_0)(1 - z + r); \quad (2)$$

для конечного участка

$$\Delta y_{к,1вх} = mx_0 - y_0; \quad (3)$$

$$\Delta y_{к,1вх} = mx_0 - y_{к1} = (mx_0 - y_0)(1 - q). \quad (4)$$

Для второй тарелки по ходу движения пара:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{н,2вх} &= mx_2 - y_{к,1} = (mx_0 - y_0)(1 - q + r + pr); \\ \Delta y_{н,2вых} &= mx_2 - y_{н,2} = (mx_0 - y_0)[1 - q + r + p(z - r)]; \\ \Delta y_{к,2вх} &= mx_1 - y_{н,1} = (mx_0 - y_0)(1 - z + r); \\ \Delta y_{к,2вых} &= mx_1 - y_{к,2} = (mx_0 - y_0)(1 - z + r - pq). \end{aligned} \right\} (5)$$

Для третьей тарелки по ходу движения пара:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{н,3вх} &= mx_3 - y_{к,2} = (mx_0 - y_0)[1 - z + r - p(q - r) + p^2 r]; \\ \Delta y_{н,3вых} &= mx_3 - y_{н,3} = (mx_0 - y_0)[1 - z + r - p(q - r) + p^2(z - r)]; \\ \Delta y_{к,3вх} &= mx_2 - y_{н,2} = (mx_0 - y_0)[1 - q + r - p(z - r)]; \\ \Delta y_{к,3вых} &= mx_2 - y_{к,3} = (mx_0 - y_0)[1 - q + r - p(z - r) - p^2 q]. \end{aligned} \right\} (6)$$

Для n -ой тарелки (четной):

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{н,n,вх} &= mx_n - y_{к,(n-1)} = \\ &= (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [q - r + p(z - r)] \frac{1 - p^{n-3}}{1 - p^2} + p^{n-2}(q - r - pr) \right\}; \\ \Delta y_{н,n,вых} &= mx_n - y_{н,n} = (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [q - r + p(z - r)] \frac{1 - p^{n-3}}{1 - p^2} \right\}; \\ \Delta y_{к,n,вх} &= mx_{n-1} - y_{н,(n-1)} = \\ &= (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [z - r + p(q - r)] \frac{1 - p^{n-3}}{1 - p^2} - p^{n-2}(z - r) \right\}; \\ \Delta y_{к,n,вых} &= mx_{n-1} - y_{к,n} = \\ &= (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [z - r + p(q - r)] \frac{1 - p^{n-1}}{1 - p^2} - p^{n-2}(z - r + pq) \right\}. \end{aligned} \right\} (7)$$

Для n -ой тарелки (нечетной):

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{H,n,ВХ} &= mx_n - y_{K,(n-1)} = \\
 &= (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [z - r + p(q - r)] \frac{1 - p^{n-2}}{1 - p^2} + p^{n-1} r \right\}; \\
 \Delta y_{H,n,ВЫХ} &= mx_n - y_{K,n} = \\
 &= (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [z - r + p(q - r)] \frac{1 - p^{n-2}}{1 - p^2} - p^{n-1}(z - r) \right\}; \\
 \Delta y_{K,n,ВХ} &= mx_{n-1} - y_{H,(n-1)} = (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [q - r + p(z - r)] \frac{1 - p^{n-2}}{1 - p^2} \right\}; \\
 \Delta y_{K,n,ВЫХ} &= mx_{n-1} - y_{H,n} = \\
 &= (mx_0 - y_0) \left\{ 1 - [q - r + p(z - r)] \frac{1 - p^{n-2}}{1 - p^2} - p^{n-1} q \right\}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Аналогичным образом при однонаправленном движении жидкости на смежных тарелках (рис., б) можно получить:

для нижней тарелки – уравнения (1) – (4);

для второй тарелки по ходу движения пара:

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{H,2ВХ} &= mx_2 - y_{H,1} = (mx_0 - y_0)(1 - z + r + pr); \\
 \Delta y_{H,2ВЫХ} &= mx_2 - y_{H,2} = (mx_0 - y_0)[1 - z + r - p(z - r)]; \\
 \Delta y_{K,2ВХ} &= mx_1 - y_{K,1} = (mx_0 - y_0)(1 - q + r); \\
 \Delta y_{K,2ВЫХ} &= mx_1 - y_{K,2} = (mx_0 - y_0)(1 - q + r - pq);
 \end{aligned} \tag{9}$$

для третьей тарелки:

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{H,3ВХ} &= mx_3 - y_{H,2} = (mx_0 - y_0)[1 - z + r - p(z - r) + p^2 r]; \\
 \Delta y_{H,3ВЫХ} &= mx_3 - y_{H,3} = (mx_0 - y_0)[1 - z + r - p(z - r) - p^2(z - r)]; \\
 \Delta y_{K,3ВХ} &= mx_2 - y_{K,2} = (mx_0 - y_0)[1 - q + r - p(q - r)]; \\
 \Delta y_{K,3ВЫХ} &= mx_2 - y_{K,3} = (mx_0 - y_0)[1 - q + r - p(q - r) - p^2 q];
 \end{aligned} \tag{10}$$

для n -ой тарелки:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{н,н,вх} &= mx_n - y_{н,(n-1)} = (mx_0 - y_0) \left[1 - (z-r) \frac{1-p^{n-1}}{1-p} + p^{n-1}r \right]; \\ \Delta y_{н,н,вых} &= mx_n - y_{н,н} = (mx_0 - y_0) \left[1 - (z-r) \frac{1-p^n}{1-p} \right]; \\ \Delta y_{к,н,вх} &= mx_{n-1} - y_{к,(n-1)} = (mx_0 - y_0) \left[1 - (q-r) \frac{1-p^{n-1}}{1-p} \right]; \\ \Delta y_{к,н,вых} &= mx_{n-1} - y_{к,н} = (mx_0 - y_{00}) \left[1 - (q-r) \frac{1-p^{n-1}}{1-p} - p^{n-1}q \right]. \end{aligned} \right\} (11)$$

При анализе величин z и q (табл.), которые определяют уровень превышения и снижения содержания легколетучего компонента в паровой фазе соответственно после начального и конечного участков тарелки по ходу движения жидкости, важно соблюдение условий $z > 1$ и $q < 1$, т.к. в противном случае концентрации легколетучего компонента в паре после начального и конечного участков будут соответственно меньше и больше среднего значения после тарелки. Указанные условия соблюдаются при $L/mV > (1 + 0,5E_1)/(1 - E_1)$, $E_2 > -0,5$, $L/mV > (1,5E_3 - 0,5)/(1 - E_3)$ и при любых L/mV и E_4 в четвертом варианте, что свидетельствует о их реальности и существовании положительных значений L/mV за исключением значений эффективности, меньших 0,333 в третьем варианте.

Из условий $z > 0$ и $q > 0$ следует, что значения L/mV должны быть больше 0,5 при эффективности, равной единице, во всех вариантах, за исключением второго, у которого $L/mV > -0,5$. При уменьшении эффективности минимально возможные отношения L/mV не изменяются в первом, снижаются во втором и третьем и повышаются в четвертом варианте, что также подтверждает реальность этих отношений для первых трех вариантов и с некоторыми ограничениями – для четвертого.

Из таблицы следует, что выражение $[(z - r + p(q - r))/(1 - p^2)]$ может быть больше единицы при $L/mV > (1 - E_1)/(2 - E_1)$ в первом, $L/mV > (1 - 1/E_2)$ во втором, $L/mV > -(1 - E_3)/(2 - E_3)$ в третьем и $L/mV > (1 - E_4)/E_4$ в четвертом вариантах. Следовательно, минимальные значения L/mV равны нулю при эффективности, равной единице. При снижении эффективности до нуля минимально возможные отно-

шения L/mV повышаются до 0,5 в первом варианте, принимают отрицательные значения во втором и третьем вариантах и повышаются до бесконечности в четвертом варианте массообмена. Соблюдение этих ограничений при величинах p , заметно отличающихся от единицы, и достаточно большом числе тарелок может привести к отрицательным значениям $\Delta u_{к,лвх}$ и $\Delta u_{к,лввх}$ в (7), а также $\Delta u_{н,лввх}$ в (8) для первых трех вариантов и практически нереально в четвертом.

С учетом уменьшения движущей силы на выходе пара из конечного участка четных тарелок на величину, пропорциональную $p^{n-2}(z - r)$, или на выходе пара из начального участка нечетных тарелок — на $p^{n-1}(r - z)$ соответствующие выражения движущей силы в (7) и (8) тем более могут стать отрицательными при изменениях L/mV в более широком диапазоне. Вероятно, подобными условиями обусловлено отмеченное в [1] заметное отклонение величин разности концентраций легколетучего компонента в паровой фазе после тарелки.

Движущая сила может стать отрицательной, когда $[(q - r + p(z - r))/(1 - p^2)]$ становится больше единицы при соответствующих p и n при $L/mV < (1 - E_1)/(2 - E_1)$ в первом, $L/mV < (1 - 1/E_2)$ во втором, $L/mV < -(1 - E_3)/(2 - E_3)$ в третьем и $L/mV < (1 - E_4)/E_4$ в четвертом вариантах. Это возможно в первом и четвертом вариантах при невысоких значениях эффективности и нереально во второй и третьей схемах массообмена. При этом вероятность возникновения подобных ситуаций повышается на начальном участке четной тарелки и на конечном участке нечетной тарелки при выходе пара.

Как и при противоположном, при однонаправленном движении жидкости на смежных тарелках величина движущей силы во многом определяется величинами $[(z - r)/(1 - p)]$ и $[(q - r)/(1 - p)]$ (табл.). Если первая из них больше единицы, что имеет место при $L/mV > 1$ во всех рассматриваемых вариантах, то на выходе пара из начального участка тарелки при значениях p , заметно отличающихся от единицы, и достаточно большом числе тарелок может быть получено отрицательное значение движущей силы. В этих условиях значение $[(q - r)/(1 - p)]$ становятся меньшими единицы и движущая сила на входе и выходе пара из конечного участка не может стать отрицательной. Если $L/mV < 1$, то $[(q - r)/(1 - p)] > 1$ и при соответствующих величинах p и чисел тарелок может быть получено отрицательное значение движущей силы на конечном участке тарелки по ходу движения жидкости, особенно по выходе пара, т.к. в последнем случае движущая сила дополнительно снижается на величину, пропорциональную $p^{n-1}q$.

Таблица
Результаты промежуточных вычислений

	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
z	$\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} \frac{E_1}{mV}$	$\frac{L}{mV} \frac{E_2 + \frac{1}{2}}{2}$	$\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} \frac{E_3}{mV}$	$\frac{L}{mV} \frac{E_4 + \frac{1}{2}}{2}$
q	$\frac{L}{mV} \frac{1}{2} \frac{E_1}{mV}$	$\frac{L}{mV} \frac{E_2 + \frac{1}{2}}{2} - \frac{E_2}{2}$	$\frac{L}{mV} \frac{1}{2} \frac{E_3}{mV}$	$\frac{L}{mV} \frac{E_4 - \frac{1}{2}}{2}$
p	E_1	$\frac{L}{mV} \frac{E_2 - \frac{1}{2}}{2}$	$\frac{L}{mV} \frac{1}{2}$	1
r	$\frac{L}{mV} (1 - E_1) - 1 + E_1$	$\frac{L}{mV} \frac{E_2 + \frac{1}{2}}{2} - \frac{E_2}{2}$	$\frac{L}{mV} (1 - E_3) + \frac{1}{2}$	$E_4 - \frac{1}{2}$
$\frac{z - r + p(q - r)}{1 - p^2}$	$\frac{L}{mV} \frac{1}{2} \frac{E_1}{mV}$	$\frac{L}{mV} \frac{E_2 + \frac{1}{2}}{2} - \frac{E_2}{2}$	$\frac{L}{mV} + \frac{1}{2} \frac{E_3}{mV}$	$\frac{L}{mV} \frac{E_4 - \frac{1}{2}}{2}$
	$1 + \frac{L}{mV} (2 - E_1) - 1 + E_1$	$1 + \frac{L}{mV} \frac{E_2 + 1 - E_2}{2}$	$1 + \frac{L}{mV} (2 - E_3) + 1 - E_3$	$1 + \frac{L}{mV} \frac{E_4 - 1 + E_4}{2}$

Окончание табл.

	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
$\frac{q-r+p(z-r)}{1-p^2}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV}(2-E_1)-1+E_1}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV}E_2+1-E_2}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}E_3}{\frac{L}{mV}(2-E_3)+1-E_3}$	$1 + \frac{\frac{1}{2}E_4}{\frac{L}{mV}E_4-1+E_4}$
$\frac{z-r}{1-p}$	$1 + \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV}-1}$	$1 + \frac{\frac{1}{2}}{(\frac{L}{mV}-1)E_2}$	$1 + \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV}-1}$	$1 + \frac{\frac{1}{2}}{(\frac{L}{mV}-1)E_4}$
$\frac{q-r}{1-p}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV}-1}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}}{(\frac{L}{mV}-1)E_2}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}}{\frac{L}{mV}-1}$	$1 - \frac{\frac{1}{2}}{(\frac{L}{mV}-1)E_4}$

На начальном участке в этом случае движущая сила положительна. Однако снижение L/mV возможно только до 0,5 во всех вариантах, за исключением второго, т.к. в противном случае z принимает отрицательные значения и концентрация легколетучего компонента в паре после начального участка по ходу движения жидкости становится меньше средней величины после всей тарелки, что нереально.

Следует отметить, что в действительности отрицательные величины движущей силы при массообмене нереальны и в предельном случае могут иметь нулевые значения. Поэтому при проектировании ректификационных колонн следует учитывать рассмотренные особенности процесса массообмена при перекрестном движении фаз, т.к. их несоблюдение равнозначно отклонению от оптимальных условий работы.

Обозначения

E - эффективность тарелки; L - молярный поток жидкости; m - коэффициент равновесия; V - молярный поток пара; x , y - концентрации легколетучего компонента соответственно в жидкости и паре; Δu - движущая сила массообмена; p , q , r , z - вспомогательные величины. Индексы: v_x , v_y - соответственно входной и выходной участки тарелки по ходу движения пара; k , n - соответственно конечный и начальный участки тарелки по ходу движения жидкости; n - номер рассматриваемой тарелки; $n-1$ - номер предыдущей тарелки по ходу движения пара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлечко В.Н. // Труды БГТУ. Серия III. Химия и химическая технология. 1999. Вып. VII. – С. 3-11.
2. Murphree E.V. // Ind. Eng. Chem. 1925. Vol. 17, № 7. – P. 747.
3. Medina A.G., Ashton N., McDermott C. // Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34, № 9. – P. 1105-1112.
4. Hausen H. // Chem. Ing. Tech. 1953. J. 25, № 10. – S. 595-597.