УДК 66.048.37

В. Н. Павлечко

О РАСЧЕТЕ ЧИСЛА ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ТАРЕЛОК РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Одной из наиболее простых для аналитического определения числа теоретических тарелок N является формула Сореля — Харина [1, 2], видоизмененная в соответствии с принятыми в данной статье обозначениями:

$$N = \frac{\ln\left[1 + \frac{x_n}{x_0}\left(\frac{GK}{L} - 1\right)\right]}{\ln\frac{GK}{L}} - 1, \qquad (1)$$

где G, L — потоки пара и жидкости; K — тангенс угла наклона равновесной линии; x_n, x_0 — содержание легколетучего компонента в жидкости, поступающей на питающую тарелку и выходящей из колонны соответственно.

Формула Сореля — Харина может быть использована при обогреве колонны острым паром, не содержащим легколетучего компонента, и при постоянном значении K.

Рассмотрим возможность нахождения аналогичной формуле Сореля — Харина зависимости, в которой учитывалась бы эффективность тарелки.

Составим уравнения материального баланса для нижней тарелки, работающей в равновесных и реальных условиях соответственно:

$$Lx_1 + Gy_0 = Lx_0^* + Gy_1^*; \qquad (2)$$

$$Lx_1 + Gy_0 = Lx_1 + Gy_1, \qquad (3)$$

где y_0, y_1 — содержание легколетучего компонента в паре, поступающем на тарелку и отходящем от нее соответственно; x_0^*, y_1^* — содержание легколетучего компонента в жидкости и паре, отходящем от тарелки, в равновесных условиях. Для работающей в равновесных условиях тарелки $y_1^* = Kx_0^*$. Тогда с учетом уравнения (2)

$$y_1^* = \frac{\frac{L}{G} x_1 + y_0}{\frac{L}{GK} + 1}. \tag{4}$$

Известно, что эффективность η тарелки в реальных условиях определяется выражением

$$\eta = \frac{y_1 - y_0}{y_1^* - y_0},$$

из которого может быть получено

$$y_1 = \eta y_1^* + (1 - \eta)\, y_0. \tag{5}$$

Подставляя (4) в (5), получим

$$y_1 = \frac{\frac{L}{G}\eta x_1 + \left(\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta\right) y_0}{\frac{L}{GK} + 1}. \tag{6}$$

Из уравнения (3) находим

$$x_1 = x_0 + \frac{G}{L}(y_1 - y_0). \tag{7}$$

При совместном решении (6) и (7) получим

$$x_1 = \frac{\left(\frac{L}{GK} + 1\right) x_0 - \frac{\eta}{K}\, y_0}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}. \tag{8}$$

Используя выражение (8), получим

$$x_1 - x_0 = \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(x_0 - \frac{y_0}{K}\right). \tag{9}$$

Подставим (8) в (6):

$$y_1 = \frac{\frac{L}{G}\eta x_0 + \left(\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta - \eta\right) y_0}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}. \tag{10}$$

Scanned by TapScanner

Рассматривая вторую снизу тарелку, аналогичным образом получаем

$$x_2 - x_1 = \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(x_1 - \frac{y_1}{K}\right). \qquad (11)$$

Подставим (8) и (9) в (11):

$$x_2 - x_1 = \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)\left(x_0 - \frac{y_0}{K}\right).$$

Аналогичные зависимости находим для третьей, четвертой и других тарелок, включая питающую:

$$\left.\begin{aligned}
x_3 - x_2 &= \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)^2\left(x_0 - \frac{y_0}{K}\right),\\
x_4 - x_3 &= \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)^3\left(x_0 - \frac{y_0}{K}\right),\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
x_{n-1} - x_{n-2} &= \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)^{n-2}\left(x_0 - \frac{y_0}{K}\right),\\
x_n - x_{n-1} &= \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)^{n-1}\left(x_0 - \frac{y_0}{K}\right).
\end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Сложим левые и правые части уравнений (9), (11) и системы уравнений (12):

$$x_n - x_0 = \frac{\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\left[1 + \left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right) + \right.$$

$$+ \left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\frac{L}{GK} + 1 - \frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK} + 1 - \eta}\right)^{n-2} +$$

$$+\left(\frac{\frac{L}{GK}+1-\frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK}+1-\eta}\right)^{n-1}\Bigg]\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right),$$

или после преобразований

$$x_n-x_0=\frac{x_0-\frac{y_0}{K}}{1-\frac{L}{GK}}\left[\left(\frac{\frac{L}{GK}+1-\frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK}+1-\eta}\right)^{n}-1\right]. \quad (13)$$

Из уравнения (13) находим степень исчерпывания колонны:

$$\frac{x_n}{x_0}=\frac{1-\frac{y_0}{Kx_0}}{1-\frac{L}{GK}}\left[\left(\frac{\frac{L}{GK}+1-\frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK}+1-\eta}\right)^{n}-1\right]+1 \quad (14)$$

и действительное число тарелок:

$$n=\ln\left[\frac{\left(\frac{x_n}{x_0}-1\right)\left(1-\frac{L}{GK}\right)}{1-\frac{y_0}{Kx_0}}+1\right]:\ln\left(\frac{\frac{L}{GK}+1-\frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK}+1-\eta}\right). \quad (15)$$

Как видно из (15), число действительных тарелок зависит от степени исчерпывания колонны, начального содержания легколетучего компонента в греющем паре и конечного в кубовом остатке, отношения расходов жидкости и пара, угла наклона равновесной линии и эффективности тарелки. Теплофизические свойства разделяемых компонентов, а также конструктивные особенности тарелок и колонны в полученном уравнении отражаются с помощью эффективности тарелки.

Найденная зависимость (15) в отличие от формулы Сореля — Харина позволяет определять число действительных тарелок без промежуточных вычислений, при любом содержании легколетучего компонента в греющем паре, включая обогрев острым паром. В частности, при обогреве колонны острым паром содержание легколетучего компонента в нем равно нулю и формула (15) упрощается:

Scanned by TapScanner

$$n=\frac{\ln\left[\left(\frac{x_n}{x_0}-1\right)\left(1-\frac{L}{GK}\right)+1\right]}{\ln\left(\frac{\frac{L}{GK}+1-\frac{L}{GK}\eta}{\frac{L}{GK}+1-\eta}\right)}.$$

Зависимость (15) справедлива при $L/G \neq K$. Определим формулу для расчета числа действительных тарелок при условии $L/G = K$. В этом случае уравнения (9), (11) и система уравнений (12) примут вид

$$\left.\begin{aligned}
x_1-x_0&=\frac{\eta}{2-\eta}\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right),\\
x_2-x_1&=\frac{\eta}{2-\eta}\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right),\\
x_3-x_2&=\frac{\eta}{2-\eta}\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right),\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
x_{n-1}-x_{n-2}&=\frac{\eta}{2-\eta}\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right),\\
x_n-x_{n-1}&=\frac{\eta}{2-\eta}\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right).
\end{aligned}\right\}\tag{16}$$

Сложим левые и правые части уравнений (16):

$$x_n-x_0=\frac{n\eta}{2-\eta}\left(x_0-\frac{y_0}{K}\right),$$

откуда

$$n=\left(\frac{2}{\eta}-1\right)\frac{\frac{x_n}{x_0}-1}{1-\frac{y_0}{Kx_0}}.$$

Определим степень приближения зависимости (15) к формуле Сореля — Харина. Из (1) получим

$$\frac{x_n}{x_0}=\frac{\left(\frac{GK}{L}\right)^{N+1}-1}{\frac{GK}{L}-1}.\tag{17}$$

Если в уравнении (14) $y_0=0$, $\eta=1$, то

Scanned by TapScanner

$$\frac{x_n}{x_0} = \frac{\left(\frac{GK}{L}\right)^N - 1}{1 - \frac{L}{GK}} + 1.$$

Умножим числитель и знаменатель правой части на GK/L и после преобразований получим

$$\frac{x_n}{x_0} = \frac{\left(\frac{GK}{L}\right)^{N+1} - 1}{\frac{GK}{L} - 1}. \qquad (18)$$

Таким образом, из выражения (15) получена зависимость (18), идентичная (17), полученной из формулы Сореля — Харина. Отсюда следует, что формула Сореля — Харина является частным случаем формулы (15). Последняя может быть применена при условии постоянства всех входящих в нее величин по высоте колонны. Расходы пара и жидкости постоянны, если их численные значения выражены в молях. Значения эффективности тарелок и угла наклона равновесной линии зависят от содержания легколетучего компонента в жидкости и могут изменяться в широких пределах. Однако в ряде производств, например в микробиологической промышленности при ректификации этанола и фурфурола, получаемого из паров самоиспарения гидролизата, молярная доля легколетучего компонента в питании составляет соответственно около 0,3 и 0,6 %. При таких низких значениях вполне допустимо постоянство K и η для исчерпывающей части колонны, так как они незначительно изменяются по высоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стабников В. Н., Харин С. Е.* Теоретические основы перегонки и ректификации спирта.— М., 1951.— 217 с.
2. *Стабников В. Н.* Ректификационные аппараты: Расчет и конструирование.— М., 1965.— 356 с.

Scanned by TapScanner