

Д.т.н., проф. Перелыгин В.М., к.т.н. Никитина С.Ю.

ЭФФЕКТЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В СПИРТОВОЙ КОЛОННЕ

Задачей настоящего исследования являлись разработка методов и осуществление расчетов процессов очистки этилового спирта от сопутствующих примесей в спиртовой колонне брагоректификационной установки. В основу расчетов положена модель теоретической тарелки при допущении, что мольные теплоты испарения компонентов равны и не зависят от состава разделяемых смесей, а коэффициенты испарения примесей являются функциями концентрации этилового спирта в растворах.

Пусть колонна, имеющая n теоретических тарелок в выварной части, m – в укрепляющей, и p – в зоне пастеризации, питается эюратом с содержанием x_c мольных долей этилового спирта, а обогревается острым паром, вводимым в ее куб. Счет тарелкам будем вести снизу вверх. Из конденсатора колонны отбирается D киломолей непастеризованного спирта в количестве 1 % из расчета на этиловый спирт.

Допустим, что содержание спирта в жидкой фазе питательной тарелки равно содержанию его в эюрате. В расчетах примем, что потери спирта с лютерной водой составляют 0,01 %.

Выразим через G , L_c , L_n , L_m , L_p , L_o , F_{n+m} , F_D , F_s и F_l соответственно потоки пара, эюрата, жидкости в выварной части, жидкости в укрепляющей части, жидкости в зоне пастеризации, лютерной воды, ректифицированного спирта, непастеризованного спирта, сивушного масла и сивушного спирта в киломолях из расчета на 1 киломоль этилового спирта, вводимого в колонну с питанием, через x_i и y_i – мольные доли этилового спирта, а через x_i^* и y_i^* – мольные доли примеси в жидкости и паре на i -й тарелке.

Составим теперь уравнения материального баланса спирта или примеси для $(n+m+p)$ -й тарелки колонны.

$$Gy_{n+m+p-1} + fx_D = Gy_{n+m+p} + fx_{n+m+p}, \quad (1)$$

для дефлегматора колонны:

$$Gy_{n+m+p} = fx_D + Dy_D. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем для (n+m+p)-й тарелки:

$$Gy_{n+m+p-1} = fx_{n+m+p} + Dy_D, \quad (3)$$

Аналогично:

$$\begin{aligned} Gy_{n+m+p-2} &= fx_{n+m+p-1} + Dy_D \\ &\dots \\ Gy_{n+m} &= fx_{n+m+1} + Dy_D \\ Gy_{n+m-1} &= L_m x_{n+m} + Dy_D + F_{n+m} x_{n+m} \\ Gy_{n+m-2} &= L_m x_{n+m-1} + Dy_D + F_{n+m} x_{n+m} \\ &\dots \\ Gy_n &= L_m x_{n+1} + Dy_D + F_{n+m} x_{n+m} \\ Gy_{n-1} &= L_n x_n + Dy_D + F_{n+m} x_{n+m} - L_c x_c \\ Gy_{n-2} &= L_n x_{n-1} + Dy_D + F_{n+m} x_{n+m} - L_c x_c \\ &\dots \\ Gy_0 &= L_n x_1 + Dy_D + F_{n+m} x_{n+m} - L_c x_c, \end{aligned} \quad (4)$$

где $G - D = f$ - молевой поток флегмы;

$G - D - F_{n+m} = L_m$ - молевой поток жидкости в укрепляющей части колонны;

$G - D - F_{n+m} + L_c = L_n$ - молевой поток жидкости в выварной части колонны.

Уравнения материального баланса спирта или примеси для всей колонны будут иметь вид:

$$L_n x_0 + F_l y_l + F_{n+1} x_{n+1} + F_{n+m} x_{n+m} + D y_D = L_c x_c = I. \quad (5)$$

Для расчета распределения концентраций этилового спирта по тарелкам колонны преобразуем уравнения (3), (4) с учетом (5) к виду:

$$\begin{aligned}
 (v_D + 1)y_{n+m+p-1} &= v_D x_{n+m+p} + y_D; \\
 (v_D + 1)y_{n+m+p-2} &= v_D x_{n+m+p-1} + y_D; \\
 &\dots \\
 (v_D + 1)y_{n+m} &= v_D x_{n+m+1} + y_D; \\
 (v + 1)y_{n+m-1} &= v x_{n+m} + \frac{Dy_D + F_{n+m}x_{n+m}}{D + F_{n+m}}; \\
 (v + 1)y_{n+m-2} &= v x_{n+m-1} + \frac{Dy_D + F_{n+m}x_{n+m}}{D + F_{n+m}}; \\
 &\dots \\
 (v + 1)y_n &= v x_{n+m-1} + \frac{Dy_D + F_{n+m}x_{n+m}}{D + F_{n+m}}; \\
 Gy_{n-1} &= L_n x_n - L_n x_0; \\
 Gy_{n-2} &= L_n x_{n-1} - L_n x_0; \\
 &\dots \\
 Gy_0 &= L_n x_1 - L_n x_0,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $v_D = \frac{G - D}{D}$ - флегмовое число для зоны пастеризации;

$v = \frac{G - D - F_{n+m}}{D + F_{n+m}}$ - флегмовое число для укрепляющей части колонны;

Заметим, что величина $\bar{x}_{cn} = \frac{Dy_D + F_{n+m}x_{n+m}}{D + F_{n+m}}$ представляет собой

среднюю мольную долю спирта или примеси в фракциях ректифицированного спирта и непастеризованного спирта.

Используем уравнения системы (6) для определения мольной доли этилового спирта на тарелках колонны. В расчетах будем пренебрегать отборами спирта с фракциями сивушного масла и сивушного спирта. При этом примем $Dy_D = 0,01$; $L_n x_0 = 0,0001$; $F_{n+m} x_{n+m} = 0,9899$; $v = 5$. Содержание спирта в

ректификате $x_p=0,8721$ (96,5 % об.). Величину x_0 принимаем равной $x_0^{(1)}=0,00003$.

Для обеспечения сходимости итерационного расчета необходимо, чтобы содержание спирта в элюате равнялось содержанию его в жидкой фазе n -й тарелки [1]. Расчет проводился «снизу вверх» для всех тарелок выварной части колонны. Полученное значение x_n сравниваем с содержанием спирта в элюате. Если заданная точность не достигалась, x_0 изменялось и расчет повторялся. Затем по уравнениям (6) рассчитывались концентрации x_i спирта на остальных тарелках. Результаты расчета для различных концентраций элюата представлены на рис.

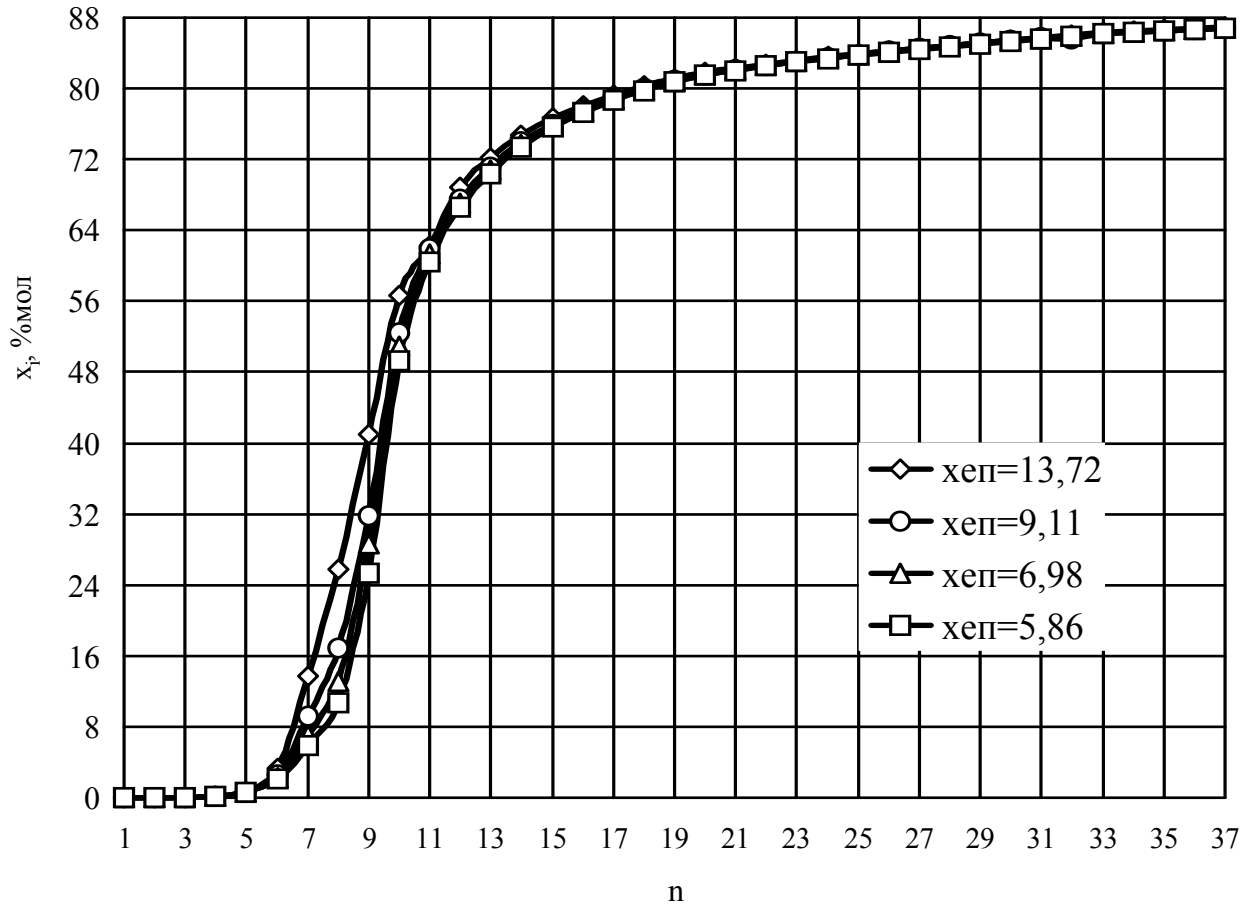


Рис. Зависимость распределения этилового спирта x_i по тарелкам спиртовой колонны от состава элюата (x_{ep} , % мол.)

Заметим, что содержание этилового спирта на тарелках спиртовой колонны увеличивается с ростом его концентрации в элюате.

Для расчета эффекта концентрирования примесей на тарелках колонны и в дефлегматоре используем выражения системы (6), а также уравнение:

$$\frac{y_D}{y_{n+m+1}} = (v_D + 1)^{\frac{K_D - 1}{K_D}}, \quad (7)$$

С учетом (7) уравнения (6) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned}
\delta_{n+m+k} &= \frac{x_{n+m+k}}{x_{n+m+k-1}} = \frac{\alpha_{n+m+k-1}}{1 + \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}}} \\
\delta_{n+m+k-1} &= \frac{x_{n+m+k-1}}{x_{n+m+k-2}} = \frac{\alpha_{n+m+k-2}}{1 + \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}} \delta_{n+m+k}} \\
\delta_{n+m+k-2} &= \frac{x_{n+m+k-2}}{x_{n+m+k-3}} = \frac{\alpha_{n+m+k-3}}{1 + \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}} \delta_{n+m+k} \delta_{n+m+k-1}} \\
&\dots \\
\delta_{n+m+1} &= \frac{x_{n+m+1}}{x_{n+m}} = \frac{\alpha_{n+m}}{1 + \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}} \prod_{i=2}^k \delta_{n+m+i}} \\
\delta_{n+m} &= \frac{x_{n+m}}{x_{n+m-1}} = \frac{L_m \alpha_{n+m-1}}{L_m + (G-D) \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}} \prod_{i=1}^k \delta_{n+m+i}} \\
\delta_{n+m-1} &= \frac{x_{n+m-1}}{x_{n+m-2}} = \frac{L_m \alpha_{n+m-2}}{L_m + (G-D) \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}} \prod_{i=0}^k \delta_{n+m+i}} \\
&\dots \\
\delta_{n+1} &= \frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{L_m \alpha_n}{L_m + (G-D) \alpha_{n+m+k} (v_D + 1)^{\frac{1}{K_D}} \prod_{i=2}^{m+k} \delta_{n+i}}, \quad (8)
\end{aligned}$$

где $\alpha_i = \frac{G}{L} K_i$.

Из уравнений (8) определим эффект разделяющего действия укрепляющей части колонны:

$$\sigma_{m+p} = \prod_{i=1}^{m+p} \delta_{n+i} = \frac{x_{n+m+p}}{x_n}, \quad (9)$$

Для $(n-1)$ -й тарелок выварной части колонны запишем:

$$\begin{aligned}
\frac{x_1}{x_0} &= \delta_0 = 1 + \alpha_0, \\
\frac{x_2}{x_1} &= \delta_1 = \frac{1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_0}{1 + \alpha_0}, \\
\frac{x_3}{x_2} &= \delta_2 = \frac{1 + \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_1 + \alpha_2 \alpha_1 \alpha_0}{1 + \alpha_1 + \alpha_1 \alpha_0}, \\
&\dots \\
\frac{x_n}{x_{n-1}} &= \delta_{n-1} = \frac{1 + \alpha_{n-1} + \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} \dots \alpha_0}{1 + \alpha_{n-2} + \alpha_{n-2} \alpha_{n-3} + \dots + \alpha_{n-2} \alpha_{n-3} \dots \alpha_0}, \\
\frac{x_{op}}{x_{n-1}} &= \delta_n = \frac{1 + \alpha_n + \alpha_n \alpha_{n-1} + \dots + \alpha_n \alpha_{n-1} \dots \alpha_0}{1 + \alpha_{n-1} + \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} \dots \alpha_0}, \quad (10)
\end{aligned}$$

Следовательно:

$$\sigma_n = \frac{x_n}{x_0} = 1 + \alpha_{n-1} + \alpha_{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} \dots \alpha_0. \quad (11)$$

Аналогично укрепляющее действие нижних l - тарелок:

$$\sigma_l = \frac{x_l}{x_0} = 1 + \alpha_{l-1} + \alpha_{l-2} + \dots + \alpha_{l-1} \alpha_{l-2} \dots \alpha_0. \quad (12)$$

Из уравнений (8) - (12) получаем:

$$\begin{aligned}
\chi_1 &= \frac{1}{1 + 0,04\alpha_l \sigma_l + \frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \delta_{n+1} + \frac{F_{n+m}}{L_n} \sigma_n \prod_{i=1}^m \sigma_{n+i} + \frac{D}{L_n} K_{n+m+p} \sigma_n \sigma_D \sigma_{m+p}}, \\
\chi_2 &= \frac{0,04\alpha_l \sigma_l}{1 + 0,04\alpha_l \sigma_l + \frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \delta_{n+1} + \frac{F_{n+m}}{L_n} \sigma_n \prod_{i=1}^m \sigma_{n+i} + \frac{D}{L_n} K_{n+m+p} \sigma_n \sigma_D \sigma_{m+p}}, \\
\chi_3 &= \frac{\frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \delta_{n+1}}{1 + 0,04\alpha_l \sigma_l + \frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \delta_{n+1} + \frac{F_{n+m}}{L_n} \sigma_n \prod_{i=1}^m \sigma_{n+i} + \frac{D}{L_n} K_{n+m+p} \sigma_n \sigma_D \sigma_{m+p}}
\end{aligned}$$

$$\chi_4 = \frac{\frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \prod_{i=1}^m \sigma_{n+i}}{1 + 0,04 \alpha_l \sigma_l + \frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \delta_{n+1} + \frac{F_{n+m}}{L_n} \sigma_n \prod_{i=1}^m \sigma_{n+i} + \frac{D}{L_n} K_{n+m+p} \sigma_n \sigma_D \sigma_{m+p}}$$

$$\chi_5 = \frac{\frac{D}{L_n} K_{n+m+p} \sigma_n \sigma_D \sigma_{m+p}}{1 + 0,04 \alpha_l \sigma_l + \frac{F_{n+1}}{L_n} \sigma_n \delta_{n+1} + \frac{F_{n+m}}{L_n} \sigma_n \prod_{i=1}^m \sigma_{n+i} + \frac{D}{L_n} K_{n+m+p} \sigma_n \sigma_D \sigma_{m+p}}, \quad (13)$$

где $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5$ – доля примесей, перешедших в лютер, сивушное масло, сивушный спирт, ректифицированный и непастеризованный спирт. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

Распределение некоторых примесей в спиртовой колонне

Примесь	χ_1	χ_2	χ_3	χ_4	χ_5
Валериановая кислота	25,61	69,00	5,06	0,32	0,01
Изомасляная кислота	87,50	12,35	0,12	0,03	0
Масляная кислота	71,60	28,12	0,24	0,04	0
Пропионовая кислота	94,50	5,29	0,19	0,02	0
Метиловый спирт	0,004	0,194	0,72	70,80	28,34
Пропиловый спирт	0,031	1,585	98,42	0,013	0
Изобутиловый	0,0031	0,461	99,536	0	0
Изоамиловый	0	0,091	99,909	0	0
Ацетальдегид	0	0	0	18,23	81,77
Метилацетат	0	0	0	26,030	73,97
Этилацетат	0	0	0	42,289	57,71

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стабников В.Н. Перегонка и ректификация этилового спирта. - М.: Пищевая промышленность, 1969. - 456 с.
2. Цыганков П.С. Ректификационные установки в спиртовой промышленности. - М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1984. - 336 с.
3. Яровенко В.Л. и др. Справочник по производству спирта. Сырье, технология и теххимконтроль. М: Легкая и пищевая пром-сть.1981.
4. Перельгин В.М., Никитина С.Ю., Мазалов Н.В. Эффект очистки этилового спирта в дефлегматорах бражных и брагоэпюрационных колонн // Вестник ВГТА. - Воронеж, 1998 - №3.- С.80-84.