

УДК 663.551.2.001.2

Д.т.н., профессор В.М. Перельгин,

к.т.н. С.Ю. Никитина, инженер Н.А. Порохова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭПЮРАЦИИ СПИРТА

В вопросах моделирования процесса эпюрации этилового спирта имеется ряд нерешенных проблем, в частности, отсутствуют строгие модели эпюрационной колонны, работающей по методу гидроселекции [1, 2]. В настоящей работе предпринята попытка создания математической модели процесса эпюрации с подачей горячей воды в концентрационную часть колонны.

Пусть эпюрационная колонна имеет n теоретических тарелок в выварной части и $(m+p)$ - в концентрационной. На питательную тарелку колонны поступает L_c киломолей бражного дистиллята с содержанием этилового спирта или примеси x_c мольных долей, а из нижнего отделения отводится L_0 киломолей эпюрата с содержанием x_0 мольных долей спирта или примеси. На $(n+m)$ -ю тарелку подается L_g киломолей горячей воды, а из жидкой фазы $(n+m+1)$ -й тарелки отводится F_{n+m+1} киломолей фракции промежуточных примесей. Из конденсатора колонны отбирается F_D киломолей головной фракции с мольной долей спирта или примеси y_D . Обозначим через G молевой поток пара, а через x_i, y_i - мольные доли спирта и примеси соответственно в паре и жидкости на i -й тарелке. Тогда количество флегмы, возвращаемой на верхнюю $(n+m+p)$ -ю тарелку составит $(G - F_D)$ киломолей. Составим уравнение материального баланса спирта или примеси для дефлегматора:

$$G y_{n+m+p} = (G - F_D) x_D + F_D y_D, \quad (1)$$

где x_D - мольная доля спирта или примеси в флегме.

Допустим, что укрепляющее действие дефлегматора равно одной теоретической ступени равновесной конденсации пара. Это допущение эквивалентно тому, что пар, выходящий из дефлегматора, и флегма, возвращаемая из дефлег-

матора на верхнюю тарелку колонны, имеют равновесные составы. Тогда коэффициент испарения K_D спирта или примеси для дефлегматора:

$$K_D = \frac{y_D}{x_D} \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует [3]:

$$\frac{y_D}{y_{n+m+p}} = \sigma_D = \frac{K_D(v+1)}{K_D + v}, \quad (3)$$

где $v = \frac{G - F_D}{F_D}$ - флегмовое число.

Для тарелок колонны уравнения материального баланса имеют вид:

$$\begin{aligned} Gy_{n+m+p-1} &= L_p x_{n+m+p} + F_D y_D; \\ Gy_{n+m+p-2} &= L_p x_{n+m+p-1} + F_D y_D; \\ &\dots \\ &\dots \\ Gy_{n+m+1} &= L_p x_{n+m+2} + F_D y_D; \\ Gy_{n+m} &= L_p x_{n+m+1} + F_D y_D; \\ Gy_{n+m-1} &= L_m x_{n+m} + F_D y_D + F_{n+m+1} x_{n+m+1}; \\ Gy_{n+m-2} &= L_m x_{n+m-1} + F_D y_D + F_{n+m+1} x_{n+m+1}; \\ &\dots \\ &\dots \\ Gy_{n+1} &= L_m x_{n+2} + F_D y_D + F_{n+m+1} x_{n+m+1}; \\ Gy_n &= L_m x_{n+1} + F_D y_D + F_{n+m+1} x_{n+m+1}; \\ Gy_{n-1} &= L_n x_n - L_0 x_0; \\ Gy_{n-2} &= L_n x_{n-1} - L_0 x_0; \\ &\dots \\ &\dots \\ Gy_1 &= L_n x_2 - L_0 x_0; \\ Gy_0 &= L_n x_1 - L_0 x_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $L_n = G - F_D - F_{n+m+1} + L_c + L_g$,

$L_m = G - F_D - F_{n+m+1} + L_g$,

$L_p = G - F_D$,

$L_0 = G - F_D - F_{n+m+1} + L_c$ - при открытом обогреве,

$L_0 = F_D - F_{n+m+1} + L_c$ - при закрытом обогреве.

Уравнение материального баланса спирта или примеси для всей колонны:

$$F_D y_D + L_0 x_0 + F_{n+m+1} x_{n+m+1} = L_c x_c. \quad (5)$$

С использованием данных о фазовом равновесии жидкость – пар в системе этанол – вода по уравнениям (3) – (5) было рассчитано распределение

этилового спирта по высоте элюционной колонны, питаемой бражным дистиллятом с содержанием этилового спирта $x_c = 0,2254$ (50% об.), $G = 4.05$, $n = 12$, $m = 4$, $p = 4$, $v = 40$, $y_D F_D = 0.03$, $x_{n+m+1} F_{n+m+1} = 0.03$, $L_g = 5G, 3G, G, 0.5G, 0$. Значения молевых потоков пара и жидкости рассчитывались на 1 киломоль абсолютного спирта. При работе колонны без гидроселекции ($L_g = 0$) принималось: $F_{n+m+1} = 0$, $y_D F_D = 0.06$, $m = 8$, $p = 0$. Результаты расчета (рис.) показали, что увеличение расхода воды на гидроселекцию вызывает резкое снижение концентрации спирта на всех тарелках колонны.

Воспользуемся теперь уравнениями (3) – (5) для расчета эффектов очистки спирта от примесей.

Прежде всего, преобразуем уравнения системы (4) для тарелок от $(n+m+p)$ -й до $(n+m+2)$ -й с учетом соотношений (1) - (3):

$$\begin{aligned}
 y_{n+m+p-1} &= y_{n+m+p} \left(\beta_{n+m+p} + \frac{\sigma_D}{v+1} \right) \\
 y_{n+m+p-2} &= y_{n+m+p} \left[\beta_{n+m+p} \beta_{n+m+p-1} + \frac{\sigma_D}{v+1} (1 + \beta_{n+m+p-1}) \right] \\
 y_{n+m+p-3} &= y_{n+m+p} \left[\beta_{n+m+p} \beta_{n+m+p-1} \beta_{n+m+p-2} + \frac{\sigma_D}{v+1} (1 + \beta_{n+m+p-2} + \beta_{n+m+p-2} \beta_{n+m+p-1}) \right] \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 y_{n+m+1} &= y_{n+m+p} \left[\beta_{n+m+p} \beta_{n+m+p-1} \dots \beta_{n+m+2} + \frac{\sigma_D}{v+1} (1 + \beta_{n+m+2} + \beta_{n+m+2} \beta_{n+m+3} + \dots + \beta_{n+m+2} \beta_{n+m+3} \dots \beta_{n+m+p-1}) \right],
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $\beta_i = \frac{G - F_D}{GK_i}$.

Последнее уравнение системы (5) приведем к виду:

$$\sigma_p = \frac{y_{n+m+p}}{x_{n+m+1}} = \frac{v}{(v+1) \prod_{i=1}^p \beta_{n+m+i} + \sigma_D \sum_{i=1}^{p-1} \beta_{n+m+i}}, \tag{7}$$

где $\prod_{i=1}^p \beta_{n+m+i} = \beta_{n+m+1} \cdot \beta_{n+m+2} \dots \beta_{n+m+p}$, \tag{8}

$$\sum_{i=1}^{p-1} \beta_{n+m+i} = \beta_{n+m+1} + \beta_{n+m+1} \cdot \beta_{n+m+2} + \dots + \beta_{n+m+1} \beta_{n+m+2} \dots \beta_{n+m+p-1}. \tag{9}$$

Аналогично для тарелок от $(n+m+1)$ -й до $(n+1)$ -й тарелок получаем:

$$\sigma_{m+1} = \frac{x_{n+m+1}}{y_n} = \frac{v+1}{\sigma_D \sigma_p \prod_{i=1}^m \beta_{n+i}^* + \theta \prod_{i=1}^{m-1} \beta_{n+i}^* + v \prod_{i=1}^m \beta_{n+i}^*}, \quad (10)$$

где $\beta_i^* = \frac{G-F_D+L_g}{GK_i}$; $\theta = \frac{F_{n+m+1}}{F_D}$, $\prod_{i=1}^m \beta_{n+i}^* = \beta_{n+1}^* \cdot \beta_{n+2}^* \dots \beta_{n+m}^*$,

$$\prod_{i=1}^m \beta_{n+i}^* = \beta_{n+1}^* + \beta_{n+1}^* \cdot \beta_{n+2}^* + \dots + \beta_{n+1}^* \beta_{n+2}^* \dots \beta_{n+m}^*$$

а для тарелок выварной части колонны:

$$\sigma_n = \frac{y_n}{x_0} = \frac{1}{G} \left(L_0 \prod_{i=1}^n \alpha_i + L_n \prod_{i=0}^n \alpha_i \right), \quad (11)$$

где $\alpha_i = \frac{G}{L_n} K_i$, $\prod_{i=0}^n \alpha_i = \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \dots \alpha_n$,

$$\prod_{i=1}^n \alpha_i = \alpha_n + \alpha_n \alpha_{n-1} + \alpha_n \alpha_{n-1} \alpha_{n-2} + \dots + \prod_{i=1}^n \alpha_i. \quad (13)$$

Поскольку на тарелках от 2-й до n -й и от $(n+1)$ -й до $(n+m)$ -й концентрации этилового спирта практически не меняются (см. рис.) можно допустить:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_n = \alpha \quad (14)$$

$$\beta_{n+1}^* = \beta_{n+2}^* = \dots = \beta_{n+m}^* = \beta^*. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) уравнения (10) и (11) преобразуются к виду:

$$\sigma_{m+1} = \frac{x_{n+m+1}}{y_n} = \frac{(v+1)(1-\beta^*)}{\beta^* (\theta + \sigma_D \sigma_p) + \beta^{*m} (v-\theta) - \beta^{*(m+1)} (v + \sigma_D \sigma_p)}, \quad (16)$$

$$\sigma_n = \frac{y_n}{x_0} = \frac{L_0(\alpha^n - \alpha) + \alpha^{n-1} \alpha_1 (\alpha - 1) (L_0 + L_n \alpha_0)}{G(\alpha - 1)}. \quad (17)$$

Заметим, что при $\beta^*=1$ уравнение (16) запишется в виде:

$$\sigma_{m+1} = \frac{(v+1)}{\sigma_D \sigma_p m + \theta(m-1) + v},$$

а с учетом (11) при $\alpha=1$ выражение (17):

$$\sigma_n = \frac{L_0}{L_n} (n + \alpha_1 - 1) + \alpha_0 \alpha_1.$$

Из соотношений (3), (5), (7), (16), (17) следует:

$$\chi_{n+m+1} = \frac{F_{n+m+1} x_{n+m+1}}{L_0 x_0 + F_{n+m+1} x_{n+m+1} + F_D y_D} = \frac{F_{n+m+1} \sigma_{m+1} \sigma_n}{L_0 + F_{n+m+1} \sigma_{m+1} \sigma_n + F_D \sigma_D \sigma_p \sigma_{m+1} \sigma_n}, \quad (18)$$

$$\chi_D = \frac{F_D y_D}{L_0 x_0 + F_{n+m+1} x_{n+m+1} + F_D y_D} = \frac{F_D \sigma_D \sigma_p \sigma_{m+1} \sigma_n}{L_0 + F_{n+m+1} \sigma_n \sigma_{m+1} + F_D \sigma_D \sigma_p \sigma_{m+1} \sigma_n}, \quad (19)$$

где χ_{n+m+1} , χ_D - доли спирта или примеси, которые выводятся из эппюрационной колонны с фракциями, отбираемыми соответственно из жидкой фазы $(n+m+1)$ -й тарелки и из конденсатора.

Заметим, что если эппюрационная колонна, имеющая n теоретических тарелок в выварной части и m – в концентрационной, работает без гидроселекции, то:

$$F_D y_D + L_0 x_0 = L_c x_c. \quad (20)$$

В этом случае доля примеси, отбираемой с фракцией из конденсатора, равна:

$$\chi_D = \frac{F_D y_D}{F_D y_D + L_0 x_0} = \frac{F_D \sigma_D \sigma_n \sigma_{n+m}}{L_0 + F_D \sigma_D \sigma_n \sigma_{n+m}}. \quad (21)$$

где $\sigma_D = \frac{y_D}{y_{n+m}}$ и $\sigma_n = \frac{y_n}{x_0}$ рассчитываются соответственно по уравнениям (3),

$$(17), \text{ а } \sigma_{n+m} = \frac{y_{n+m}}{y_n} = \frac{v+1}{(v+1) \prod_{i=1}^m \beta_{n+i} + \sigma_D \left(\prod_{i=1}^{m-1} \beta_{n+i} + 1 \right)}. \quad (22)$$

Приведенные выше уравнения использованы для расчета эффектов очистки спирта от сопутствующих примесей в эппюрационной колонне. Результаты расчета приведены в таблице. Как видно, увеличение количества гидроселекционной воды резко увеличивает степень извлечения большинства примесей.

Результаты расчета хорошо согласуются с производственными испытаниями, проведенными в цехе брагоректификации ОАО «Спиртовый комбинат» г. Мариинск.

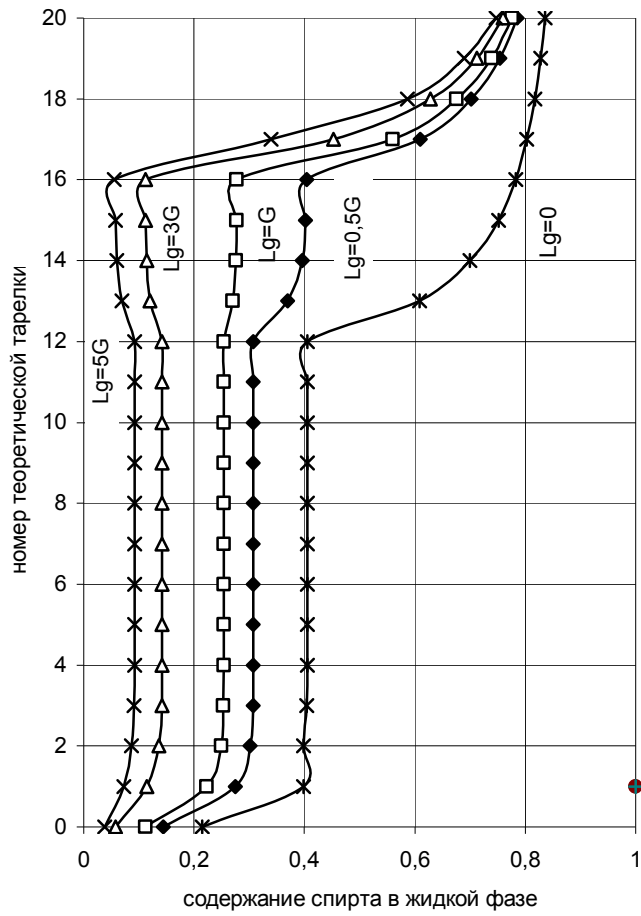


Рис. Зависимость распределения этилового спирта по тарелкам элюционной колонны от количества гидроселекционной воды

Эффекты очистки спирта от сопутствующих примесей

Наименование примеси	Доля выделенной примеси, χ , %										
	$L_g = 0$			$L_g = 0.5G$		$L_g = G$		$L_g = 3G$		$L_g = 5G$	
	χ_D	χ_D	χ_{n+m+1}	χ_D	χ_{n+m+1}	χ_D	χ_{n+m+1}	χ_D	χ_{n+m+1}	χ_D	χ_{n+m+1}
Ацетальдегид	99.99	99.86	0.14	99.87	0.13	99.88	0.12	99.88	0.12		
Метилацетат	99.99	99.60	0.40	99.65	0.35	99.71	0.29	99.70	0.30		
Н. масляный альдегид	99.98	98.85	1.15	98.92	1.08	99.10	0.9	99.15	0.85		
Этилацетат	99.99	97.84	2.16	98.94	1.06	98.99	1.01	99.25	0.75		
Метиловый спирт	99.85	48.04	4.52	29.25	2.78	6.37	0.49	5.62	1.03		
Изоамилацетат	98.64	0.56	34.49	1.85	90.46	9.68	91.01	5.78	94.22		
Изопропиловый спирт	0	31.06	8.87	31.97	18.02	40.13	17.79	49.97	18.79		
Пропиловый спирт	0	0.02	0.53	0.05	1.23	0.68	30.07	2.31	34.05		
Изобутиловый спирт	0	0	0.25	0	1.57	0.44	44.12	1.49	95.27		
Бутиловый спирт	0	0	0.18	0	1.28	0.16	68.08	0.35	95.64		
Изоамиловый спирт	0	0	0.02	0	0.35	0.02	31.25	0.06	95.75		

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганков П.С., Цыганков С.П. Руководство по ректификации спирта. - М.: Пищепромиздат, 2001. 400 с.
2. Стабников В.Н. Перегонка и ректификация этилового спирта. М.: Пищ. пром-сть, 1969.
3. .Перельгин В.М., Никитина С.Ю. и др. Эффект очистки этилового спирта от примесей в дефлегматорах бражных и брагоэпюрационных колонн // Вестник ВГТА , №3, 1998