

Д. В. Елизаров, Т. С. Камалиев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Ключевые слова: экстракция, степень извлечения, теоретическая ступень, действительная ступень.

Вводится понятие относительной величины степени извлечения компонента из раствора. Предлагается метод расчета числа теоретических и действительных ступеней экстрагирования. Произведен расчет процесса экстракции фенола из сточных вод по предложенному методу, проведено сравнение расчетных данных с результатами других авторов.

Keywords: extraction, recovery ratio, theoretical tray, actual tray.

It is introduced the concept of relative value of recovery ratio of the component from solution. It is proposed the method for calculating the number of theoretical and actual trays of extraction process. On the basis of the proposed method calculated the extraction process of phenol from waste water, these calculated data compared with the results of other authors.

Введение

При очистке воды от фенола используются следующие технологии:

- экстракция;
- выпаривание;
- сорбция;
- озонирование.

Метод экстракции экономически выгоден в том случае, если извлекаемые вещества содержатся в значительной концентрации или имеют высокую товарную стоимость. Экстракция может осуществляться в одну или несколько ступеней.

Если в сточной воде содержится фенол, то для его выделения воду можно смешать с бензолом (растворителем), в котором фенол растворяется в значительно большей степени. Таким образом, последовательно действуя бензолом на воду, можно добиться почти полного удаления фенола из воды. В качестве растворителей обычно применяют различные органические вещества — бензол, четыреххлористый углерод и др.

Экстракцию можно проводить в насадочных и распылительных колонных аппаратах. Однако чаще применяют многоступенчатую противоточную экстракцию [1]. Сточные воды и экстрагент поступают на установку с противоположных сторон. Экстракт (раствор извлеченных веществ в экстракторе) удаляется из первой ступени, а очищенные сточные воды из последней ступени.

Теоретическая часть

Для определения количества ступеней экстрагирования вводится в рассмотрение относительная величина степени извлечения компонента из жидкостного раствора или степень обогащения экстрагента [2, 3, 4].

Относительная величина степени извлечения компонента из раствора или степень обогащения экстрагента представляют собой отношение между количеством извлеченного на ступени компонента и количеством этого компонента, поступающего на ступень с экстрагируемым раствором.

Относительная величина степени обогащения экстрагента отношение между количеством вещества перешедшего из раствора и количеством этого вещества в экстрагенте, поступающим на ступень.

Нумерацию ступеней будем вести от ступени входа экстрагируемого раствора при противотоке с экстрагентом. Относительная величина степени извлечения (обогащения) на i -ой ступени составляет ($i = 1, 2, \dots, N$)

по рафинату $\varphi_{xi} = (L_{i+1}x_{i+1} - L_i x_i) / L_i x_i$,

по экстракту $\varphi_{yi} = (G_{i+1}y_{i+1} - G_i y_i) / G_i y_i$,

где G_i , L_i — расход экстрагента и экстрагируемого раствора.

Относительная степень извлечения (обогащения) на первой ступени по экстрагируемому раствору и экстрагенту составляет:

по экстрагируемому раствору

$$\varphi_{x1} = (L_H x_H - L_1 x_1) / L_1 x_1, \quad (1)$$

по экстрагенту

$$\varphi_{y1} = (G_K y_K - G_1 y_1) / G_1 y_1. \quad (2)$$

Из уравнений (1), (2) следует:

$$\frac{L_H x_H}{L_1 x_1} = 1 + \varphi_{x1}, \quad \frac{G_K y_K}{G_1 y_1} = 1 + \varphi_{y1}. \quad (3)$$

Здесь L_H , G_1 — расход раствора и экстрагента на входе первой ступени, а L_1 , G_K — на выходе ступени при противотоке; x_H , y_1 — концентрация раствора и экстрагента на входе, а x_1 , y_K — на выходе первой ступени.

На второй ступени степень извлечения (обогащения) составляет:

$$\begin{aligned} \varphi_{x2} &= (L_1 x_1 - L_2 x_2) / L_2 x_2, \\ \varphi_{y2} &= (G_1 y_1 - G_2 y_2) / G_2 y_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнений (3), (4) следует:

$$\frac{L_H x_H}{L_2 x_2} = (1 + \varphi_{x1})(1 + \varphi_{x2}),$$

$$\frac{G_K y_K}{G_2 y_2} = (1 + \varphi_{y1})(1 + \varphi_{y2}).$$

Поступая аналогично при определении сте-

пени извлечения (обогащения) а третьей ступени, получим:

$$\frac{L_H X_H}{L_3 X_3} = (1 + \varphi_{x1})(1 + \varphi_{x2})(1 + \varphi_{x3}),$$

$$\frac{G_K Y_K}{G_3 Y_3} = (1 + \varphi_{y1})(1 + \varphi_{y2})(1 + \varphi_{y3}).$$

Продолжая процесс преобразований до N-ой ступени, придем к уравнениям:

$$\frac{L_H X_H}{L_K X_K} = \prod_{i=1}^N (1 + \varphi_{xi}), \quad (5)$$

$$\frac{G_K Y_K}{G_H Y_H} = \prod_{i=1}^N (1 + \varphi_{yi}).$$

В частном случае, когда степень извлечения на ступенях одинакова или равна среднему значению $\varphi_{yi} = \bar{\varphi}_y$, $\varphi_{xi} = \bar{\varphi}_x$, из уравнений (5) получим:

$$\frac{L_H X_H}{L_K X_K} = N_p (1 + \bar{\varphi}_x), \quad (6)$$

$$\frac{G_K Y_K}{G_H Y_H} = N_3 (1 + \bar{\varphi}_y).$$

Логарифмируя (6), найдем число ступеней

по рафинату
$$N_p = \frac{\ln \frac{L_H X_H}{L_K X_K}}{\ln(1 + \bar{\varphi}_x)}, \quad (7)$$

по экстракту
$$N_3 = \frac{\ln \frac{G_K Y_K}{G_H Y_H}}{\ln(1 + \bar{\varphi}_y)}. \quad (8)$$

Метод приближенного расчета числа ступеней разделения в процессах жидкостной экстракции.

В противоточный экстрактор непрерывного действия поступает на экстрагирование исходный раствор в количестве L_H (кг/ч) с начальной концентрацией экстрагируемого вещества x_H (кг/м³) при температуре T °С. Конечная концентрация рафината x_K (кг/м³). Начальная концентрация экстрагируемого вещества в экстрагенте y_H (кг/м³), а конечная концентрация y_K (кг/м³). Требуется определить расход экстрагента и число ступеней разделения.

1. Из уравнения материального баланса определяется количество извлекаемого вещества:

$$M = L_H(x_H - x_K)/\rho.$$

2. Расход рафината и экстрагента на входе установки составляет:

$$L_K = L_H - M, \quad G_K = G_H + M.$$

Необходимое количество экстрагента определяется из уравнения материального баланса:

$$L_H(x_H - x_K) = G_H(y_K - y_H),$$

$$G_H = L_H \frac{x_H - x_K}{y_K - y_H}.$$

3. Определяют средние расходы экстрагируемого раствора и экстрагента и концентрацию раствора:

$$L_{CP} = \frac{L_H + L_K}{2}, \quad G_{CP} = \frac{G_H + G_K}{2},$$

$$x_{CP} = \frac{x_H + x_K}{2}.$$

Средняя концентрация экстрагента определяется из уравнения материального баланса:

$$y_{CP} = (L_{CP} x_{CP} + G_K y_K - L_H x_H)/G_{CP}.$$

4. Находится отношение G_{CP}/L_{CP} и константа фазового равновесия m .

5. Для ступени, расположенной в области средних значений параметров процесса составляется уравнение материального баланса:

$$L_{CP} x_{CP} + G_{CP} y_{CP} = Lx + Gy, \quad (9)$$

где L и G – расходы раствора и экстрагента на выходе ступени, а x и y – концентрации раствора и экстрагента.

Пренебрегая изменениями расходов L и G на ступени и принимая $L = L_{CP}$, $G = G_{CP}$, найдем концентрацию вещества в рафинате:

$$x = x_{CP} + \frac{G}{L}(y_{CP} - y), \quad (10)$$

где x_{CP} и y_{CP} – концентрации экстрагируемого вещества в растворе и экстрагенте на входе ступени.

Введем эффективность ступени по Мерффри:

$$E_y = \frac{y - y_{CP}}{y^* - y_{CP}}.$$

Отсюда $y_{CP} - y = -E_y(y^* - y_{CP})$.

Записывая равновесную зависимость y^* в виде $y^* = mx$, где m – константа фазового равновесия и подставляя данные выражения в уравнение (10), получим значения концентрации экстрагируемого вещества в растворе на выходе ступени:

$$x = \left(x_{CP} + \frac{G}{L} E_y y_{CP} \right) / \left(1 + \frac{G}{L} m E_y \right). \quad (11)$$

6. Определяется степень извлечения экстрагируемого вещества из раствора на ступени при средних значениях параметров

$$\bar{\varphi}_x = (x_{CP} - x)/x_{CP},$$

где значение концентрации x на выходе ступени находится из уравнения (11).

7. По уравнению (7) находится число действительных ступеней разделения. Принимая эффективность ступени в выражении (11) $E_y = 1$, находится число теоретических ступеней.

При расчете числа ступеней по фазе экстракта из уравнения (9) выразим концентрацию экстрагента, покидающего ступень

$$y = y_{CP} + L/G(x_{CP} - x) \quad (12)$$

и введем эффективность по Мерффри, выраженную в концентрациях рафината:

$$E_x = (x_{CP} - x)/(x_{CP} - x^*),$$

где x^* – концентрация раствора, равновесная с концентрацией уходящего экстрагента: $x^* = y/m$.

Используя данную зависимость в уравнении (12), получим:

$$y = \left(y_{CP} + \frac{L}{G} E_x x_{CP} \right) / \left(1 + \frac{L}{G} \frac{E_x}{m} \right).$$

Затем определяется степень обогащения экстрагента $\bar{\varphi}_y = (y - y_{CP}) / y_{CP}$, а по уравнению (8) находится число действительных ступеней экстрагирования. При $E_x = 1$ получают число теоретических ступеней разделения.

Расчет процесса экстракции фенола из сточных вод

В противоточном экстракторе непрерывного действия обрабатываются чистым бензолом сточные воды с целью очистки воды и извлечения фенола. Определить необходимое число теоретических ступеней экстрагирования, если в 1 г обрабатывается 10 м³ воды. Содержание фенола в воде: начальное 8 кг/м³, конечное 0,5 кг/м³. Конечное содержание фенола в бензоле 25 кг/м³, расход бензола 2,988 м³/ч, температура жидкости 25 °С.

Количество извлекаемого фенола
 $M = (8 - 0,5) \cdot 10 / 1070 = 0,07 \text{ м}^3/\text{ч}.$

Расход воды в конце процесса:
 $L_K = L_H - M = 10 - 0,07 = 9,93 \text{ м}^3/\text{ч}.$

Конечный расход бензола:
 $G_K = G_H + M = 2,988 + 0,07 = 3,058 \text{ м}^3/\text{ч}.$

Средний расход воды и бензола:
 $L_{CP} = \frac{L_H + L_K}{2} = \frac{10 + 9,93}{2} = 9,965 \text{ м}^3/\text{ч};$

$G_{CP} = \frac{G_H + G_K}{2} = \frac{2,988 + 3,058}{2} = 3,023 \text{ м}^3/\text{ч}.$

Средняя концентрация фенола в воде:
 $x_{CP} = (8 + 0,5) / 2 = 4,25 \text{ кг/м}^3.$

Средняя концентрация фенола в бензоле определяется из уравнения материального баланса:

$$y_{CP} = \frac{L_{CP} \cdot x_{CP} + G_K y_K - L_H x_H}{G_{CP}} = \frac{9,965 \cdot 4,25 + 3,058 \cdot 25 - 10 \cdot 8}{3,023} = 12,835 \text{ кг/м}^3.$$

Отношение $G_{CP} / L_{CP} = 3,023 / 9,965 = 0,303$.

Значение константы равновесия [5] $m = 9,16$. Концентрация жидкости, покидающей ступень равна:

$$x = \frac{x_{CP} + y_{CP} \cdot G/L}{1 + m \cdot G/L} = \frac{4,25 + 12,835 \cdot 0,303}{1 + 9,16 \cdot 0,303} = 2,156 \text{ кг/м}^3.$$

Степень извлечения фенола на ступени:

$$\bar{\varphi}_x = \frac{x_{CP} - x}{x_{CP}} = \frac{4,25 - 2,156}{4,25} = 0,493.$$

Число теоретических ступеней

$$N_T = \frac{\ln(L_H \cdot x_H / L_K \cdot x_K)}{\ln(1 + \bar{\varphi}_x)} = \frac{\ln(10 \cdot 8 / 9,93 \cdot 0,5)}{\ln 1,493} = \frac{2,78}{0,4} = 6,95.$$

Принимается 7 теоретических ступеней, что в точности согласуется с расчетом по $y - x$ диаграмме [5].

При КПД ступени $E_y = 0,5$ средняя концентрация жидкости покидающей ступень равна:

$$x = \frac{x_{CP} + E_y y_{CP} G/L}{1 + E_y m G/L} = \frac{4,25 + 0,5 \cdot 12,835 \cdot 0,303}{1 + 0,5 \cdot 9,16 \cdot 0,303} = 2,594 \text{ кг/м}^3.$$

Степень извлечения:

$$\bar{\varphi}_x = \frac{x_{CP} - x}{x_{CP}} = \frac{4,25 - 2,594}{4,25} = 0,3896.$$

Число действительных ступеней равно:

$$N_D = \frac{\ln L_H x_H / L_K x_K}{\ln(1 + \bar{\varphi}_x)} = \frac{2,78}{\ln(1,3896)} = 8,45.$$

Достаточно принять $N_D = 9$ ст.

Результаты работы получены в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение №14.В37.21.0591).

Литература

1. А.Г. Касаткин, *Основные процессы и аппараты химической технологии*. Химия, Москва, 1971. 784 с.
2. С.А. Мерзляков, В.В. Елизаров, Д.В. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 14, 9, 140–145 (2011).
3. С.А. Мерзляков, Д.В. Елизаров, В.И. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 14, 19, 199–206 (2011).
4. Т. С. Камалиев, Д. В. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 14, 9, 127–131 (2011).
5. К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков, *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов*. ООО ТИД “Альянс”, Москва, 2006. 576 с.