

УДК 54.058:542.48:546.725

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ ПЕНТАКАРБОНИЛА ЖЕЛЕЗА В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

© 2019 г. В. А. Шапошников¹, Ю. С. Белозеров¹, Ю. П. Кириллов¹*,
А. Д. Буланов¹, А. М. Потапов¹, М. О. Стешин¹

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых Российской академии наук,
ул. Тropicина, 49, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: kirillov@ihps.nnov.ru

Поступила в редакцию 01.04.2019 г.

После доработки 15.05.2019 г.

Принята к публикации 22.05.2019 г.

Представлена математическая модель глубокой очистки веществ дистилляцией в закрытой испарительно-конденсационной системе, в которой конденсация пара осуществляется на вертикально стекающей пленке жидкости. Механизмы испарения, переноса пара, конденсации, движения сконденсированной жидкости, диффузии примеси в испаряемой жидкости рассмотрены совместно. На примере очистки пентакарбонила железа от примеси кобальта установлены зависимости глубины очистки от температур испарения и конденсации, площади испарения, доли испарившейся жидкости, радиуса и высоты конденсационной трубки. По экспериментальным зависимостям эффективного коэффициента разделения от температуры с применением математической модели определены величины коэффициентов диффузии и равновесных коэффициентов разделения примесей кобальта, вольфрама и хрома в пентакарбониле железа.

Ключевые слова: дистилляция, закрытая система, конденсация, вертикальная трубка, стекающая жидкость, коэффициент разделения, глубина очистки, пентакарбонил железа, примесь кобальта

DOI: 10.1134/S0002337X19110125

ВВЕДЕНИЕ

Пентакарбонил железа используется в качестве исходного соединения для получения высокодисперсных порошков железа с низким содержанием примесей, получения оксидов железа в виде порошков, пленок, покрытий, нитевидных металлических монокристаллов, железосодержащих органических комплексов, изотопного разделения [1–6]. В железе, получаемом из карбонила железа, присутствуют примеси углерода, азота и кислорода в составе соответственно карбида Fe_3C , нитрида Fe_4N и оксидов Fe_3O_4 и Fe_2O_3 и примеси элементов, способных к образованию карбониллов, таких как никель, хром, кобальт, молибден, вольфрам [7]. Для снижения содержания примесей пентакарбонил железа очищается методами простой перегонки и ректификации при пониженном давлении или в атмосфере инертного газа [8, 9]. Метод простой перегонки является простейшим, но достаточно эффективным методом очистки пентакарбонила железа от большинства углеводородных примесей, а также от ряда карбониллов металлов. При простой перегонке жидкость испаряется, образовавшийся пар отводится из зоны испарения и далее конденсируется

на охлаждаемой поверхности в зоне конденсации. В предельных случаях конденсация пара может осуществляться преимущественно на свободной поверхности жидкости [10, 11] или преимущественно на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости [12]. Первый предельный случай реализуется в дистилляционных установках горизонтального типа [13], второй – вертикального типа [7]. В закрытых дистилляционных установках процессы испарения, отвода пара и конденсации взаимосвязаны. Поэтому скорость испарения в замкнутой испарительно-конденсационной системе может быть рассчитана только при совместном рассмотрении этих процессов. В дистилляционных установках вертикального типа в отличие от установок горизонтального типа скорость испарения зависит еще от подвижности стекающего конденсата. Процессы конденсации пара на поверхности жидкости, стекающей вниз по вертикальной трубе, рассматривались в работах [12, 14–16]. Предложена [12] простая приближенная математическая модель конденсационного процесса, которая в совокупности с уравнениями испарения и отвода пара позволила рассчитать скорость испарения в дистилляционной установке вертикального типа. Следующим шагом в изуче-

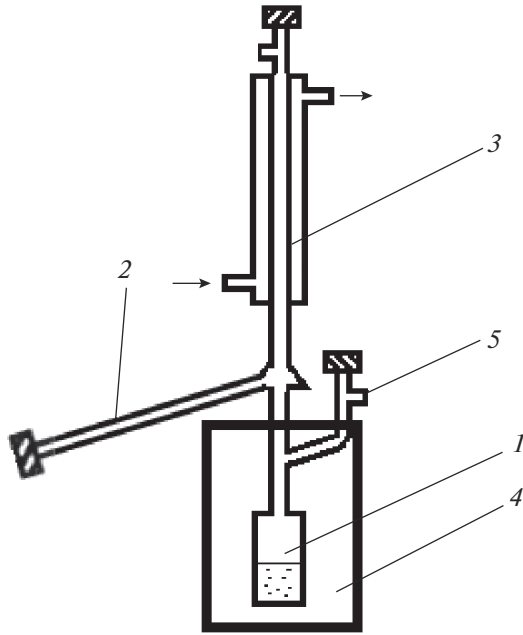


Рис. 1. Схема дистилляционного аппарата: 1 – куб, 2 – отборочная камера, 3 – холодильник, 4 – термостат, 5 – загрузочная трубка.

нии дистилляционных процессов является моделирование непосредственно процесса очистки в установках этого типа.

Цель настоящей работы – развить математическую модель процесса дистилляционной очистки веществ в закрытых испарительно-конденсационных установках с учетом механизма конденсации пара на вертикально стекающей пленке жидкости и на конкретном примере очистки пентакарбонила железа от примеси кобальта установить зависимости глубины очистки от температур испарения, конденсации и основных конструктивных параметров дистилляционного аппарата вертикального типа.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим процесс глубокой очистки пентакарбонила железа в дистилляционном аппарате, схема которого приведена на рис. 1.

Исходный пентакарбонил железа помещают через загрузочную трубку 5 в камеру 1 с заданной температурой испарения T_1 . Из камеры вертикально вверх выходит теплоизолированная трубка, по которой пар поступает в зону охлаждения 3. Зона охлаждения представляет собой вертикально расположенную трубку, обтекаемую проточной водой заданной температуры $T_2 < T_1$. Поступивший в зону охлаждения пар конденсируется на верхнем торце цилиндрической трубки и на ее боковой поверхно-

сти. С закрытого торца трубки при малом его уклоне образовавшийся конденсат поступает на боковую поверхность трубки и далее по ней стекает вниз. По мере стекания толщина пленки жидкости увеличивается за счет дополнительной конденсации пара. Образующийся на стенках охлаждаемой трубки конденсат стекает в отборочную камеру 2. Объединенный испарительно-конденсационный процесс, включающий в себя испарение со свободной поверхности жидкости в камере 1, массоперенос пара по вертикальной трубке из камеры 1 в зону охлаждения 3, конденсацию пара на поверхности жидкости, стекающей вниз по охлаждаемой трубке, рассмотрен в [12]. Уравнения стационарного массопереноса имеют следующий вид:

$$\operatorname{div}(\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\rho [v \operatorname{grad}(v)] = -\operatorname{grad} p + \eta \Delta v + \frac{\eta}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} v, \quad (2)$$

$$p = \frac{\rho}{M} RT, \quad (3)$$

$$v|_{\sigma_0} = 0, \quad (4)$$

$$v|_{\sigma_1} = \frac{M}{\rho_1} L_{\text{исп}} = \frac{RT_1}{p_1} L_{\text{исп}} = RT_1 L_{\text{исп}} \left(p_1^0 - \frac{1}{k} \sqrt{2\pi MRT_1} L_{\text{исп}} \right)^{-1}, \quad (5)$$

$$p|_{\sigma_1} = p_1 = p_1^0 - \frac{1}{k} \sqrt{2\pi MRT_1} L_{\text{исп}}, \quad (6)$$

$$p|_{\sigma_2} = p_2 = p_2^0 + \frac{1}{k} \sqrt{2\pi MRT_2} L_{\text{конд}}, \quad (7)$$

где (1)–(3) – уравнения неразрывности, Навье–Стокса и состояния пара соответственно; (4) – граничное условие для пара на всей поверхности σ_0 его контакта со стенками аппарата, кроме поверхностей испарения σ_1 и конденсации σ_2 ; (5)–(7) – граничные условия, вытекающие из лэнгмюровской зависимости скорости испарения (конденсации) [17, 18], на поверхностях σ_1 и σ_2 . В уравнениях (1)–(7) v – вектор локальной скорости переноса пара, м/с; p – давление, Па; ρ – плотность пара, кг/м³; η – вязкость пара, Па с; M – молярная масса жидкости, кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К моль); T – температура пара, К; $L_{\text{исп}}$ – скорость испарения, моль/(м² с); $L_{\text{конд}}$ – скорость конденсации, моль/(м² с); p_1, p_2 – давление пара вблизи поверхности испарения σ_1 и конденсации σ_2 соответственно, Па; p_1^0, p_2^0 – давление насыщенного пара в зонах испарения и конденсации соответственно, Па; k – коэффициент испарения. Наряду с искомыми переменными ρ, v, p (плотность, скорость, давление) в уравнениях (1)–(7) неизвестными также являются

скорости испарения $L_{исп}$ и конденсации $L_{конд}$. Связь между ними определяется уравнением материального баланса

$$L_{исп}S_{исп} = L_{конд} \left(\pi R_n^2 + \sum_{i=1}^n 2\pi R_i dz \right), \quad (8)$$

где левая часть соответствует входящему в зону конденсации потоку пара $\pi R_1^2 L_{вх}$, равному потоку испарения $L_{исп}S_{исп}$ в кубе I , а в правой части первое слагаемое соответствует конденсационному потоку на верхнем торце трубки, второе – на ее боковой поверхности; R_i – расстояние от центральной оси трубки радиусом R_0 до поверхности жидкой пленки, толщина которой $\delta_i = R_0 - R_i$ зависит от координаты z вдоль охлаждаемой трубки или приближенно от номера i малого цилиндрического кольца. Упорядоченным набором $i = 1, 2, 3, \dots, n$ малых цилиндрических колец высотой $dz = H_0/n$ приближенно представлен объем жидкости, находящейся на охлаждаемой трубке высотой H_0 , n – количество ($n > 100$) малых колец. При ламинарном течении массовый расход жидкости в i -й ячейке

$$Q_i = 2\pi\rho \int_{R_i}^{R_0} rv(r)dr, \quad v = \frac{\rho g}{2\eta} \left(\frac{R_0^2 - r^2}{2} + R_i^2 \ln \frac{r}{R_0} \right),$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; η – вязкость жидкости, Па·с; g – ускорение свободного падения, м/с²; r – радиальная координата, м; равен

$$Q_i = \frac{\pi\rho^2 g R_0^4}{2\eta} \left(\frac{1}{4} - \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 + \left(\frac{3}{4} - \ln \left(\frac{R_i}{R_0} \right) \right) \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^4 \right). \quad (9)$$

При переходе от i -й к $(i - 1)$ -й ячейке к расходу (9) добавляется поток жидкости

$$Q_i^{конд} = 2L_{конд}\pi R_i dz, \quad (10)$$

сконденсировавшейся на боковой поверхности i -го кольца. В n -й ячейке к боковому потоку добавляется поток жидкости, сконденсировавшейся на верхнем основании цилиндра при $z = H_0$ и равный $L_{конд}\pi R_n^2$. В результате имеем уравнения

$$Q_i = Q_i^{конд} + Q_{i-1}, \quad i = \overline{1, (n-1)}, \quad (11)$$

$$Q_n = Q_n^{конд} + L_{конд}\pi R_n^2. \quad (12)$$

Из условия полного обращения паровой фазы в жидкую в зоне конденсации для первой ячейки получаем

$$Q_1 = L_{исп}S_{исп}. \quad (13)$$

Система разностных уравнений (8)–(13) позволяет рассчитать внутренние радиусы колец R_i и скорость конденсации пара $L_{конд}$, если задана скорость испарения $L_{исп}$. Для того чтобы определить ее величину, необходимо решить совместно систему уравнений (1)–(13). Решение может быть

найдено, например, по методике, изложенной в работе [10].

Что касается поведения примеси в очищаемой жидкости, то заметим, что эффект очистки обусловлен различием в составах разделяемой жидкой смеси и образующегося из нее пара. При испарении находящаяся в жидкости примесь перераспределяется с течением времени в результате диффузии, оттока через поверхность испарения и уменьшения объема жидкости. Для расчета глубины очистки можно применить диффузионную модель [19]

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + w \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (14)$$

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} + w(1 - \alpha)C \Big|_{x=0} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=X_0-w\tau} = 0, \quad (16)$$

$$C \Big|_{\tau=0} = C_0. \quad (17)$$

Уравнение (14) характеризует изменение концентрации примеси $C(\tau, x)$ внутри исходной жидкости, (15) – на верхней ее границе (поверхность испарения), (16) – на нижней границе (дно кубовой емкости), (17) – начальное распределение примеси в жидкости. Кроме того, в уравнениях (14)–(17) τ – время, с; x – координата, направленная по нормали от поверхности испарения в глубину жидкости, м; D – коэффициент диффузии примеси, м²/с; $\alpha = C_n/C_{ж}$ – равновесный коэффициент разделения; w – скорость перемещения границы раздела фаз, м/с; C_0 – начальная концентрация, моль/м³; C_n и $C_{ж}$ – концентрация примеси вблизи границы раздела фаз в паре и кубовой жидкости соответственно, моль/м³; $X_0 = V_0/S_{исп}$, V_0 – начальный объем жидкости, м³; $S_{исп}$ – площадь испарения, м².

Скорость перемещения границы w связана со скоростью испарения $L_{исп}$ следующим соотношением:

$$w = \frac{\rho_{ж} M}{\rho^2} L_{исп}, \quad (18)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность кубовой жидкости.

Глубину очистки веществ удобно количественно характеризовать фактором разделения $F = C_0/C_{прод}$, где C_0 и $C_{прод}$ – концентрация примеси в исходной смеси и конечном продукте соответственно [8, 11, 19]. Продуктом является дистиллят, если примесь труднолетучая, или кубовый остаток, если примесь легколетучая.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В [7] представлены общая схема и описание дистилляционной установки для фракционной

разгонки пентакарбонила железа. Показанная на рис. 1 схема испарительно-конденсационной системы является частью этой общей схемы. Целью экспериментов было определение температурных зависимостей эффективного коэффициента разделения труднолетучих примесей кобальта, вольфрама, хрома в пентакарбониле железа и сопоставление экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов. Для экспериментов использовался пентакарбонил железа производства ООО “Синтез-ПКЖ” (г. Дзержинск), полученный в соответствии с ТУ 2436-051-05807977-99 и содержащий не менее 93 мас. % основного вещества. Эксперименты проводили следующим образом.

В предварительно промытый (последовательно фтористоводородной кислотой марки ОСЧ 27-5, бидистиллированной водой, ацетоном квалификации “ос. ч.”) и вакуумированный испаритель (куб цилиндрической формы высотой 115 и внутренним диаметром 43 мм) загружали пентакарбонил железа массой 73.580 г. Испаритель помещали в термостат с регулируемой температурой. Температуру в ходе серии экспериментов изменяли в диапазоне 50–68°C. Давление в системе составляло 20 мм рт. ст. и контролировалось при помощи образцового мановакуумметра с классом точности 0.25. Пары пентакарбонила железа конденсировались в цилиндрической трубке высотой 163 и диаметром 14 мм, охлаждаемой проточной водой с температурой 20°C. Конденсат стекал по поверхности трубки в отборочную камеру с предварительно нанесенной меткой для отбора фиксированного объема дистиллята. После первого его заполнения в приемнике конденсата открывали кран и сливали дистиллят в предварительно вакуумированную приемную ампулу. Ампула взвешивалась на аналитических весах класса точности 4 с пределом погрешности ± 20 мг до и после заполнения. Разность масс составила 4.640 г. Эта величина в дальнейшем использовалась для фиксации доли испарившейся жидкости и расчета скорости испарения. Далее пентакарбонил железа выдерживали в испарителе в течение 1.5 ч для установления стационарного режима испарения. Скопившуюся за это время в приемнике конденсата жидкость сливали в ампулу. Далее продолжали процесс испарения и при помощи секундомера определяли время заполнения фиксированного объема приемника. Для каждой температуры время заполнения измерялось 3 раза. По измеренным временам заполнения и фиксированной массе 4.640 г рассчитывалась средняя скорость испарения. Процесс дистилляции продолжали до момента, когда доля отобранной жидкости достигала величины 0.85.

Далее брались пробы на анализ на содержание примесей кобальта, вольфрама, хрома. Анализ про-

водился методом масс-спектрометрии высокого разрешения с индуктивно-связанной плазмой. Полученные данные для различных температур использовались для расчета эффективного коэффициента разделения $\alpha_{эф} = C_k/C_{cp}$, где C_k – средняя концентрация примеси в конденсате, C_{cp} – средняя концентрация примеси в кубовой жидкости.

Вычислительные эксперименты проводились с применением математической модели (1)–(18). Вычисления проводились в следующей последовательности. Сначала методом доверительных областей (Trust-Region Dogleg Method) [20] решались уравнения (8)–(13) при некотором заданном значении $L_{исп}$. Затем методом конечных объемов [21] решалась краевая задача (1)–(7) по методике, предложенной в [10]. В результате определялись соответствующие заданным температурам испарения и конденсации величины скорости испарения $L_{исп}$ для закрытой испарительно-конденсационной установки (рис. 1). Найденные значения $L_{исп}$ далее использовались при решении уравнений (14)–(18) методом “ловли фронта в узел сетки” [22]. Необходимые для расчета физико-химические характеристики, температурная зависимость давления насыщенного пара пентакарбонила железа

$$\lg p^0 = 8.89976 - \frac{2480.3270}{T + 35.937} \quad (19)$$

были взяты из [1, 23].

Уравнения математической модели (1)–(18) использованы для расчета процесса очистки пентакарбонила железа от примесей кобальта, вольфрама и хрома. Коэффициент испарения $k = 5.5 \times 10^{-4}$ пентакарбонила железа в дистилляционной установке, схема которой приведена на рис. 1, был определен ранее [12]. Значение равновесного коэффициента разделения $\alpha = C_n/C_{ж} = 0.042$ системы пентакарбонил железа – примесь кобальта приведено в [24]. Для примесей вольфрама и хрома в литературе нет данных о величинах равновесных коэффициентов разделения в пентакарбониле железа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены значения величины, обратной эффективному коэффициенту разделения, рассчитанные по экспериментально измеренным значениям концентраций примесей кобальта, вольфрама и хрома при различных температурах. При $T_1 = 291.6$ К для кобальта значение эффективного коэффициента разделения равно значению равновесного коэффициента $\alpha = 0.042$, которое измерено отдельно при равновесных условиях и приведено в работе [24].

Таблица 1. Значения величины, обратной эффективному коэффициенту разделения для примесей кобальта, вольфрама, хрома при различных температурах

Температура, К	1/α _{эф}		
	Co	W	Cr
291.6	23.8 [25]	–	–
323	3.55	4.34	2.96
328	3.49	1.93	1.36
338	1.31	1.96	1.54
341	1.26	1.10	1.01

Таблица 2. Значения равновесного коэффициента разделения и коэффициента диффузии для примесей кобальта, вольфрама, хрома

Примесь	Co	W	Cr
α	0.042[25]	0.059	0.1
D × 10 ⁹ , м ² /с	3.1	3.0	2.0

На рис. 2 приведена зависимость величины, обратной эффективному коэффициенту разделения α_{эф}, от температуры испарения T₁. Сравнивая теоретические кривые с экспериментальными точками, отметим, что теоретические расчеты согласуются с экспериментальными данными. Путем решения обратной задачи из условия минимума среднеквадратичного отклонения теоретической кривой от экспериментальных данных (рис. 2) для примеси кобальта получено значение коэффициента диффузии D = 3.1 × 10⁻⁹ м²/с. Найденное значение далее использовалось как начальное приближение для определения коэффициентов диффузии,

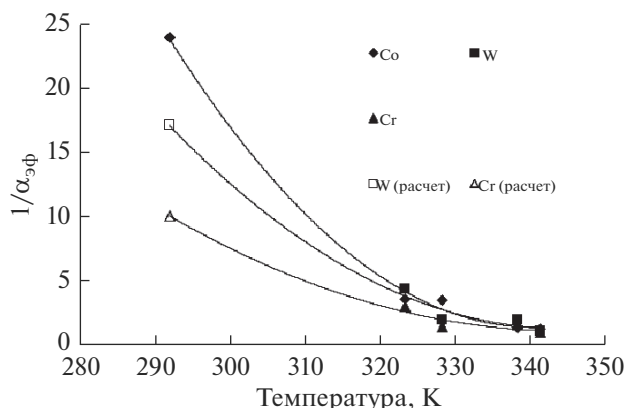


Рис. 2. Зависимости величины, обратной эффективному коэффициенту разделения 1/α_{эф}, от температуры испарения T₁ для кобальта, вольфрама и хрома: сплошные линии – расчет по уравнениям (1)–(19); T₂ = 293 К; D = 3.1 × 10⁻⁹ м²/с.

зии, а также равновесных коэффициентов разделения примесей вольфрама и хрома (табл. 2).

Труднолетучие примеси кобальта, вольфрама, хрома концентрируются в жидкой фазе. В этом случае продуктом очистки является дистиллят, для которого C_{прод} = C_д. Тогда для фактора разделения F = C₀/C_{прод} получаем [11]

$$F = \frac{V}{V_0} \left(1 - \int_0^{1-V/V_0} \frac{C(V, u)}{C_0} du \right)^{-1}, \quad (20)$$

где u = x/X₀, V₀ = S_{исп}X₀, V = V_и = S_{исп}ωτ – объем отогнанной кубовой жидкости, C(V, u) – распределение концентрации примеси в жидкой фазе при фиксированном объеме отогнанной жидкости. В случае полного перемешивания жидкости фактор разделения становится максимальным

$$F = \frac{V/V_0}{1 - (1 - V/V_0)^\alpha}. \quad (21)$$

Для примеси кобальта на рис. 3–6 показаны зависимости фактора разделения от доли отбора, площади испарения, радиуса и высоты конденсационной трубки при различных температурах испарения. Из рисунков следует, что фактор разделения увеличивается при уменьшении доли отбора, сближении температур испарения и конденсации, увеличении площади испарения, уменьшении радиуса и высоты конденсационной трубки. Фактор разделения принимает предельные значения, если для жидкости выполняются условия полного перемешивания. В этом случае фактор разделения зависит только от доли отбора и равновесного коэффициента разделения. Максимальное значение фактора разделения не превышает величины, равной обратному равновесному коэффициенту разделения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена математическая модель глубокой очистки веществ методом простой перегонки с учетом диффузии примеси в жидкости и конденсации пара на вертикально стекающей пленке жидкости. Верификация модели проведена по экспериментальным температурным зависимостям эффективного коэффициента разделения при очистке пентакарбонила железа от примесей кобальта, вольфрама и хрома.

Модель позволяет рассчитать распределение примеси в жидкости, распределение скоростей течения в пленке, утолщение пленки при конденсации, распределение скоростей газового потока в пространстве от поверхности испарения до поверхности конденсации, эффективный коэффициент

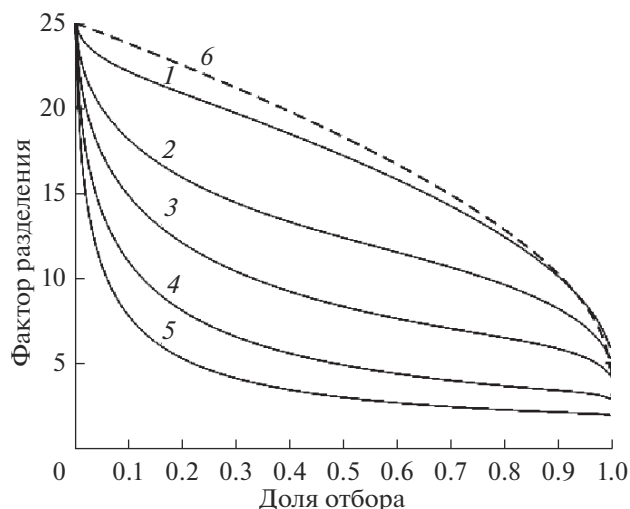


Рис. 3. Зависимости фактора разделения F от доли отбора $v = V/V_0$ при различных температурах испарения T_1 , К: 1 – 293,5, 2 – 297, 3 – 301, 4 – 323, 5 – 341; пунктирная линия 6 – расчет по уравнению (21); $T_2 = 293$ К.

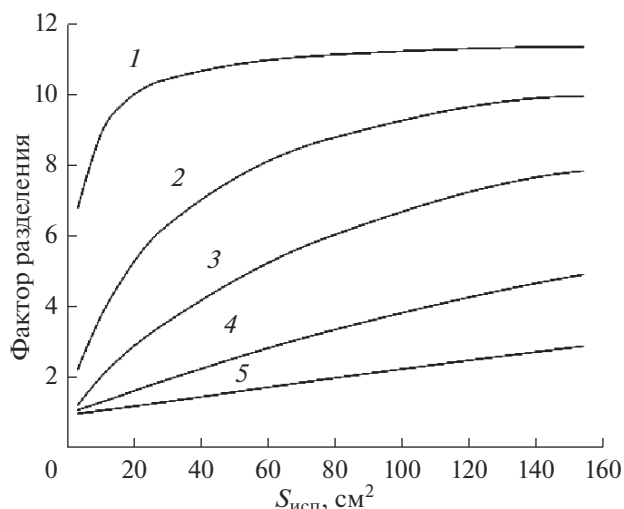


Рис. 4. Расчетные зависимости фактора разделения F от площади испарения $S_{\text{исп}}$ при различных температурах испарения T_1 , К: 1 – 293,5, 2 – 297, 3 – 301, 4 – 323, 5 – 341; $V/V_0 = 0,85$.

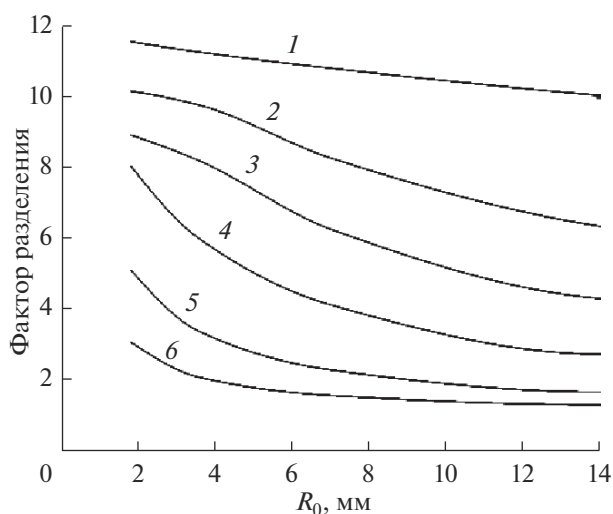


Рис. 5. Расчетные зависимости фактора разделения F от радиуса трубки конденсации при различных температурах испарения T_1 , К: 1 – 293,5, 2 – 297, 3 – 301, 4 – 308, 5 – 323, 6 – 341; $V/V_0 = 0,85$.

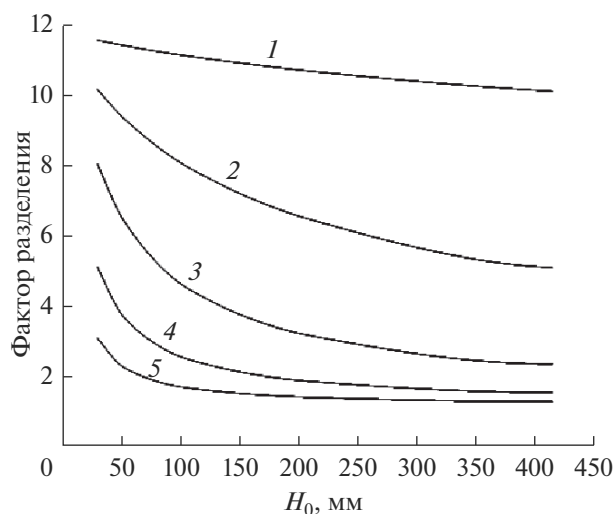


Рис. 6. Расчетные зависимости фактора разделения F от высоты конденсационной трубки при различных температурах испарения T_1 , К: 1 – 293,5, 2 – 297, 3 – 301, 4 – 323, 5 – 341; $T_2 = 293$ К.

разделения, фактор разделения при различных значениях температуры испарения, конденсации, доли отогнанной при испарении жидкости, равновесного коэффициента разделения, коэффициента диффузии примеси и конструктивных параметров дистилляционной установки вертикального типа. Кроме того, модель позволяет путем решения обратной задачи идентифицировать величины коэффициента диффузии и равновесного коэффициен-

та разделения присутствующих в очищаемых веществах примесей.

На примере примеси кобальта продемонстрированы основные характерные закономерности дистилляционной очистки пентакарбонила железа. Для примесей кобальта, вольфрама и хрома определены значения равновесного коэффициента разделения и коэффициента диффузии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Научно-исследовательская работа выполнена по теме государственного задания № 0095-2019-0003.

Авторы благодарят академика М.Ф. Чурбанова за помощь в обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В.Л., Сыркин В.Г., Толмасский И.С. Карбонильное железо. М.: Металлургия, 1969. 256 с.
2. Maruyama T., Shinyashiki Y. Iron-Iron Oxide Composite Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition from Iron Pentacarbonyl // *Thin Solid Films*. 1998. V. 333. № 1–2. P. 203–206. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)00999-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)00999-7)
3. van Worterghem J., Mørup S., Charles S.W. et al. Formation and Chemical Stability of Metallic Glass Particles Prepared by Thermolysis of Fe(CO)₅ // *Hyperfine Interact.* 1986. V. 27 № 1. P. 333–336. <https://doi.org/10.1007/BF02354774>
4. Comprehensive Organometallic Chemistry. V. 4 / Ed. Wilkinson G. et al. Abel.: Elsevier Science Ltd., 1982. 1064 с.
5. Wiesli R.A., Beard B.L., Braterman P.S. et al. Iron Isotope Fractionation between Liquid and Vapor Phases of Iron Pentacarbonyl // *Talanta*. 2007. V. 71. № 1. P. 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.03.026>
6. Кузнецов В.И. Металлоорганические соединения в разделении стабильных изотопов. М.: Альфа-Лабл, 2001. 200 с.
7. Белозеров Ю.С., Буланов А.Д., Потапов А.М., Союзин А.Ю., Стешин М.О., Чернова О.Ю. Глубокая очистка пентакарбонила железа дистилляционными методами // *Неорган. материалы*. 2017. Т. 53. С. 1129–1134. № 10. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17100177>
8. Девятых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Введение в теорию глубокой очистки веществ. М.: Наука, 1981. 320 с.
9. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981. 812 с.
10. Кириллов Ю.П., Шапошников В.А., Кузнецов Л.А., Ширяев В.С., Чурбанов М.Ф. Моделирование испарения жидких веществ и конденсации их паров при дистилляции // *Неорган. материалы*. 2016. Т. 52. № 11. С. 1256–1261. <https://doi.org/10.7868/S0002337X161100063>
11. Кириллов Ю.П., Шапошников В.А., Чурбанов М.Ф. Моделирование глубокой очистки веществ дистилляционным методом простой перегонки // *Неорган. материалы*. 2017. Т. 53. № 8. С. 867–873. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17080127>
12. Шапошников В.А., Белозеров Ю.С., Кириллов Ю.П., Буланов А.Д., Чурбанов М.Ф. Моделирование испарения пентакарбонила железа в условиях конденсации его паров на вертикально стекающей пленке жидкости // *Неорган. материалы*, 2018. Т. 54. № 9. С. 929–935. <https://doi.org/10.1134/S0002337x18090154>
13. Ширяев В.С., Пименов В.Г., Липатова М.М., Евдокимов И.И., Чурбанов М.Ф., Кириллов Ю.П., Корноухов В.Н. Очистка селена от примеси бария вакуумной дистилляцией // *Неорган. материалы*. 2010. Т. 46. № 3. С. 365–369.
14. Lee K.-Y., Kim M.H. Experimental and Empirical Study of Steam Condensation Heat Transfer with a Noncondensable Gas in a Small-Diameter Vertical Tube // *Nucl. Eng. Des.* 2008. V. 238. № 1. P. 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.07.001>
15. Hammami Y.El., Feddaoui M., Mediouni T., Mir A. Numerical Study of Condensing a Small Condensation of Vapour Inside a Vertical Tube // *Heat Mass Transf.* 2012. V. 48. № 9. P. 1675–1685. <https://doi.org/10.1007/s00231-012-1011-0>
16. Adil Charef, M'barek Feddaoui, Monssif Najim, Hicham Meftah. Liquid Film Condensation from Water Vapour Flowing Downward along a Vertical Tube // *Desalination*. 2017. V. 409. P. 21–23. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.018>
17. Кнаке О., Странский И.Н. Механизм испарения // *Успехи физ. наук*. 1959. Т. 68. № 6. С. 261–305.
18. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Субботин В.И. Испарение и конденсация металлов. М.: Атомиздат, 1976. 216 с.
19. Кириллов Ю.П., Кузнецов Л.А., Шапошников В.А., Чурбанов М.Ф. Влияние диффузии на глубину очистки веществ дистилляцией // *Неорган. материалы*. 2015. Т. 51. № 11. С. 1177–1182. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15100085>
20. Powell M.J.D. A Fortran Subroutine for Solving Systems of Nonlinear Algebraic Equations. London: H.M. Stationery Office, 1968. 55 p.
21. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. 552 с.
22. Будак Б.М., Соловьев Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // *Журн. вычислительной математики и математической физики*. 1965. Т. 5. № 5. С. 828–840.
23. Yaws C.L., Satyro M.A. Vapor Pressure – Inorganic Compounds // *The Yaws Handbook of Vapor Pressure: Antoine Coefficients (Second Edition)*. Elsevier Inc., 2015. P. 315–322. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03590-3>
24. Шарова Т.В., Леонов М.Р. Изучение возможности выделения микропримесей никеля и кобальта из карбонила железа методами экстракции и дистилляции // *Получение и анализ чистых веществ. Горький: Изд-во ГГУ*, 1987. С. 53.