

## КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ И ЧИСЛА ПЕКЛЕ В ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ РАФИНИРОВАНИЯ Веществ с простой основой при температурах вблизи от температур плавления

© 2022 г. А. И. Кравченко<sup>1</sup>, \*, А. И. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”  
Национальной академии наук Украины, ул. Академическая, 1, Харьков, 61108 Украина

\*e-mail: krwchnko@gmail.com

Поступила в редакцию 22.02.2022 г.

После доработки 17.03.2022 г.

Принята к публикации 22.03.2022 г.

С помощью уравнения Бартона–Прима–Слихтера на примерах веществ с простой основой (Sm, Yb, Mg, Eu, Te, Zn, Cd, Be, Tb) показано, что их дистилляционное или сублимационное рафинирование при  $T = (0.9–1.2)T_m$  (где  $T_m$  – температура плавления) может ухудшаться с повышением температуры вследствие роста эффективного коэффициента разделения  $\beta < 1$  и/или роста диффузионного числа Пекле  $Pe = wX/\rho D$  (где  $w$  – скорость испарения вещества с единицы поверхности,  $D$  – коэффициент диффузии примеси,  $\rho$  – плотность вещества,  $X$  – размерный фактор испаряемого материала) – с большим или меньшим влиянием  $\beta$  или  $Pe$  в зависимости от природы основы и примесей. Также показано, что в кристаллизационных процессах рафинирования  $Pe$  мало и основным параметром является коэффициент разделения.

**Ключевые слова:** дистилляция, сублимация, кристаллизация, очистка, рафинирование, коэффициент разделения, температура плавления, уравнение Бартона–Прима–Слихтера, диффузионное число Пекле

**DOI:** 10.31857/S0002337X22080073

### ВВЕДЕНИЕ

Дистилляция, направленная кристаллизация и сублимация – основные методы получения высокочистых веществ [1–3]. В этих методах многокомпонентное вещество подвергается фазовому превращению при перемещении поверхности раздела фаз со скоростью  $v$  с перераспределением примесей между фазами.

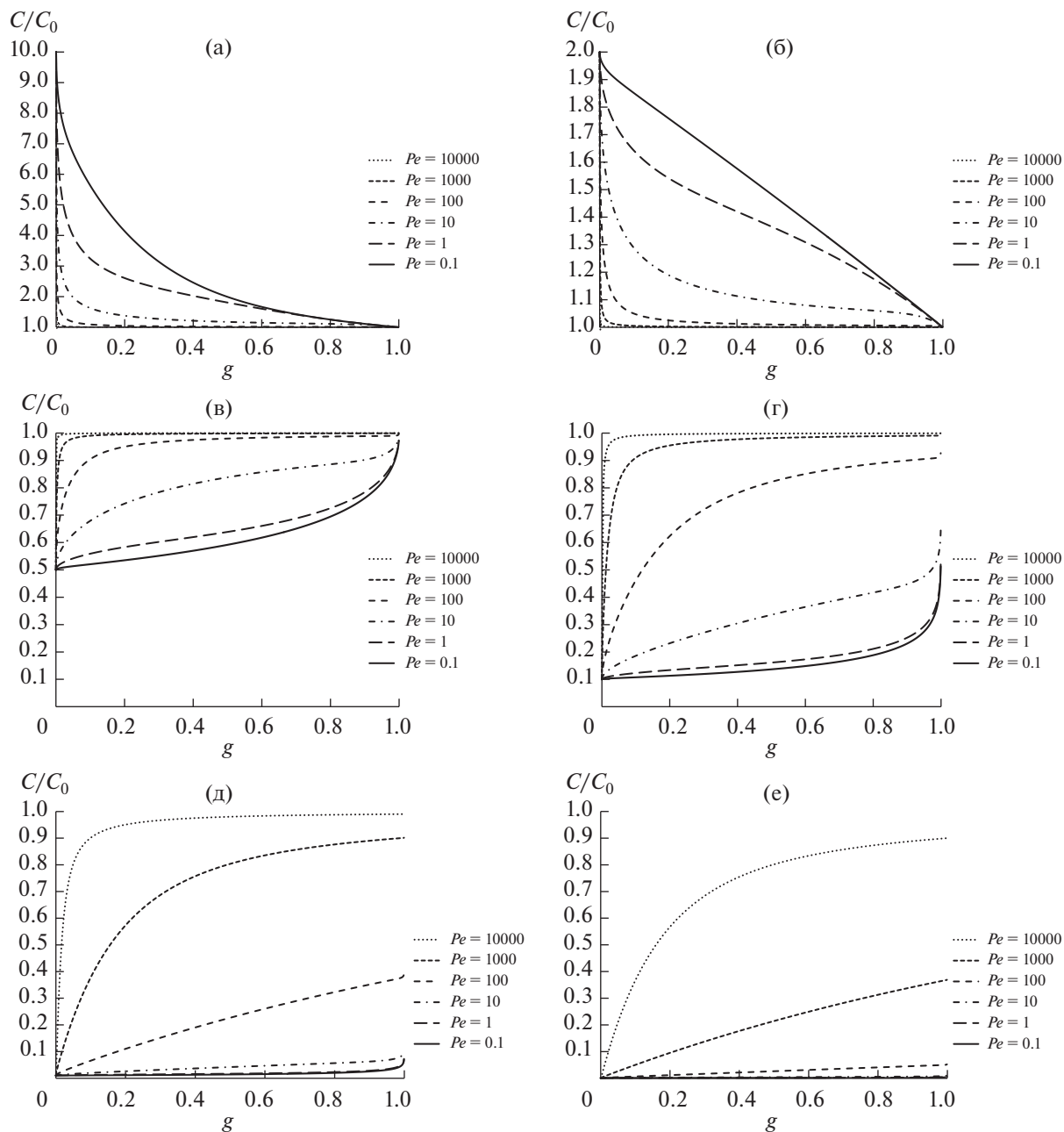
В испарительных методах (дистилляция и сублимация) скорость  $v$  определяется скоростью испарения  $w$  вещества с единицы поверхности. Если жидкость содержится в контейнере простой (например, цилиндрической) формы, то  $v = w/\rho$ , где  $\rho$  – плотность вещества (та же зависимость имеет место при сублимации материала в виде диска, плотно вложенного в цилиндрический тигель). Разработано математическое описание процесса испарения вещества “основа–примесь” – в виде системы уравнений, связывающих чистоту продукта со степенью перегонки  $g$  (т.е. с выходом продукта). Параметрами уравнений являются эффективный коэффициент разделения  $\beta$  (отношение концентрации примеси в паре, покидающей поверхность испарения, к концентрации приме-

си в жидкости, из которой образуется пар – вблизи поверхности испарения) и число Пекле  $Pe = vX/D$ , где  $D$  – коэффициент диффузии примеси, а  $X$  – размерный фактор испаряемого материала (начальная толщина слоя жидкости в тигле при дистилляции; или начальная толщина испаряемой пластины, плотно вложенной в тигель; или начальный радиус шара при сублимации) [4, 5].

При  $\beta < 1$  эффективность очистки конденсата повышается с уменьшением числа  $Pe$  (рис. 1). Если  $g = 1$ , то  $C/C_0 = 1$ . При заданном  $\beta$  рассматриваемая зависимость при  $Pe = 0.1$  практически совпадает с зависимостью при  $Pe = 0$ . Если  $Pe = 0$ , то (как это отмечено ранее [5–7]) зависимость  $C/C_0$  от  $g$  имеет вид известного уравнения дистилляции с идеальным перемешиванием жидкости (которое описывает и нормальную направленную кристаллизацию):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1 - (1 - g)^\beta}{g}.$$

Важно отметить, что описание дистилляции и сублимации с помощью двух параметров ( $\beta$  и  $Pe$ ) предполагает, что процесс определяется только



**Рис. 1.** Зависимости относительной усредненной концентрации  $C/C_0$  примеси в конденсате от степени перегонки  $g$  материала в виде плоского слоя при его одностороннем испарении в вакууме при различных значениях числа Пекле  $Pe$  и коэффициенте разделения  $\beta = 10$  (а), 2 (б), 0.5 (в), 0.1 (г), 0.01 (д), 0.001 (е) ( $C_0$  – исходная концентрация примеси).

диффузией примесей. Между тем, факторами реальных процессов могут быть захват примесей паром основного компонента в процессах дистилляции и сублимации, а также конвекция в процессах дистилляции (хотя отмечалось, что конвекция мала при малых  $X$  [4]).

Была рассмотрена температурная зависимость числа Пекле как следствия температурных зависимостей  $\nu(T)$  и  $D(T)$ : зависимости  $D(T)$  и  $Pe(T)$  для той или иной примеси определяются энерги-

ей активации диффузии примеси в системе “основа–примесь” [6, 7].

Напротив, в процессах направленной кристаллизации скорость  $\nu$  задается скоростью изменения тепловых условий процесса – например, скоростью перемещения нагревателя вдоль материала удлиненной формы или скоростью вытягивания кристалла из расплава. Выведены уравнения, связывающие чистоту продукта с долей закристаллизованного материала при заданном эф-

**Таблица 1.** Отношение  $\beta/\beta_0$  и число  $Pe = vX/D$  при  $X = 1$  см для веществ при известных  $T_m$  и различных значениях  $\beta_0$  и  $\delta/D$

Вещество	$T_m$ , К	$\rho_m$ , мм рт. ст.	$M$ , а. е. м.	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$w$ , г/(см <sup>2</sup> с)	$v$ , см/с	$\beta/\beta_0$ при $\delta/D = 100$ с/см			$\beta/\beta_0$ при $\delta/D = 1000$ с/см			$Pe$ при $X = 1$ см
							$\beta_0 = 0.1$	$\beta_0 = 0.01$	$\beta_0 = 0.001$	$\beta_0 = 0.1$	$\beta_0 = 0.01$	$\beta_0 = 0.001$	
Sm	1350	4.4	150	7.5	0.08	0.011	3	3	3	10	100	1000	$\sim 10^3$
Yb	1097	3.1	173	7.0	0.07	0.010	2	3	3	10	100	1000	$\sim 10^3$
Mg	923	2.8	24	1.7	0.03	0.018	4	6	6	10	100	1000	$\sim 10^3$
Eu	1099	1.1	152	5.2	0.02	0.004	1.4	1.5	1.5	9	36	53	$\sim 10^2$
Te	723	0.18	128 × 4	6.2	0.006	0.0009	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	$\sim 10$
Zn	693	0.15	65	7.1	0.003	0.0004	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	$\sim 10$
Cd	594	0.12	112	8.7	0.003	0.0004	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	$\sim 10$
Be	1551	0.032	9	1.8	0.00014	0.00008	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	$\sim 1$
Tb	1629	<0.001	159	8.2	$<1 \times 10^{-5}$	$<1 \times 10^{-5}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	$\approx 0$

фективном коэффициенте разделения  $k$  при кристаллизации [1–3].

Эффективный коэффициент разделения в фазовых превращениях зависит от скорости процесса. Известно уравнение Бартона-Прима-Слихтера, связывающее  $k$  с равновесным коэффициентом разделения  $k_0$  и линейной скоростью процесса  $v$  [1–3, 8, 9]:

$$k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-v \frac{\delta}{D}\right)}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина диффузионного слоя в 1-й фазе перед поверхностью раздела фаз в процессе перехода 1-й фазы во 2-ю. Согласно этому уравнению, если  $v\delta/D \rightarrow 0$ , то  $k \rightarrow k_0$ ; если же  $v\delta/D$  растет, то  $k \rightarrow 1$ , т.е. при больших значениях  $v\delta/D$  эффективность очистки мала. (Число  $v\delta/D$  в этом уравнении, по сути, является числом Пекле для материала в диффузионном слое.) Уравнение (1) выведено в предположении, что расхождение между  $k$  и  $k_0$  определяется только диффузией примеси в жидкости. Данные о равновесном коэффициенте  $k_0$  для ряда систем “основа–примесь” при фазовых равновесиях жидкость–кристалл и жидкость–пар содержатся в монографии Нисельсона и Ярошевского [10].

Известен порядок значений  $\delta$  и  $D$  в жидкостях при температурах вблизи температуры плавления  $T_m$ : в большинстве систем “основа–примесь”  $\delta \sim 10^{-3} - 10^{-2}$  см,  $D \sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, т.е.  $\delta/D \sim 10^2 - 10^3$  с/см [1–3, 8, 9]. Также известно, что вблизи  $T_m$  в твердом теле для большинства систем “основа–примесь”  $D \sim 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с [11, 12].

Отмечалось подобие уравнений дистилляции и направленной кристаллизации при соответствующей подстановке в них  $\beta$  или  $k$  ([2, гл. 15] и

[4, 13]). Так, в работе [4] было отмечено, что уравнение (1), изначально выведенное для рассмотрения кристаллизационных процессов, не имеет запретов на применение также для рассмотрения процессов дистилляции или сублимации, если считать, что  $k$  – это межфазовый коэффициент разделения в рассматриваемом испарительном процессе. В то же время, применение уравнения (1) для расчета эффективного коэффициента разделения в испарительных процессах при выбранной температуре наталкивается на препятствие, связанное с отсутствием соответствующих данных о значениях  $\delta/D$ . Между тем, технологические испарительные процессы рафинирования тех или иных веществ с простой основой зачастую проводятся при температурах, не слишком удаленных от  $T_m$ , и можно предполагать, что в этих процессах и при кристаллизации значения  $\delta/D$  близки. Также можно ожидать, что дополнительные (помимо диффузии примесей) факторы этих процессов (конвекция и/или захват примесей паром основного компонента) несильно проявляются при данных температурах.

В то же время, можно отметить, что описание дистилляции и сублимации с помощью двух параметров ( $\beta$  и  $Pe$ ) [4, 5] не содержит запретов рассматривать подобным образом и кристаллизационные процессы, в связи с чем возникает вопрос о вычислении в них числа  $Pe$ .

В настоящем исследовании была поставлена цель, используя уравнение Бартона-Прима-Слихтера, вычислить значения  $\beta/\beta_0$  в процессах испарения веществ “основа–примесь” (где основа – простое вещество) при температурах вблизи  $T_m$  (т.е. в предположении, что  $\delta/D \sim 10^2 - 10^3$  с/см, как в процессах кристаллизации), а также вычислить значения диффузионного числа Пекле при этих температурах для выяснения влияния температуры

**Таблица 2.** Отношение  $\beta/\beta_0$  и число  $Pe = vX/D$  при  $X = 1$  см для веществ при температуре испарения  $T \neq T_m$  и различных значениях  $\beta_0$  и  $\delta/D$  ( $p$  – давление пара вещества при температуре  $T$ )

Вещество	$T_m$ , К	$T$ , К	$T/T_m$	$p$ , мм рт. ст.	$w$ , г/(см <sup>2</sup> с)	$v$ , см/с	$\beta/\beta_0$ при $\delta/D = 100$ с/см			$\beta/\beta_0$ при $\delta/D = 1000$ с/см			$Pe$ при $X = 1$ см					
							$\beta_0 = 0.1$	$\beta_0 = 0.01$	$\beta_0 = 0.001$	$\beta_0 = 0.1$	$\beta_0 = 0.01$	$\beta_0 = 0.001$	$Q/R = 1 \times 10^4$ К	$Q/R = 2 \times 10^4$ К	$Q/R = 3 \times 10^4$ К	17	2.5	0.36
Sm	1350	1200	0.9	0.63	0.013	0.0017	1.2	1.2	1.2	4	5	6	$1 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$			
Yb	1097	1000	0.9	0.55	0.013	0.0019	1.2	1.2	1.2	4	6	7	$1 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	$6 \times 10^3$			
Mg	923	800	0.9	0.16	0.002	0.0009	1.1	1.1	1.1	2	2	2	$1 \times 10^3$	$6 \times 10^3$	$5 \times 10^5$			
Eu	1099	1000	0.9	0.18	0.004	0.0008	1.1	1.1	1.1	2	2	2	$4 \times 10^2$	$5 \times 10^2$	$3 \times 10^3$			
Te	723	800	1.1	0.18	0.008	0.0013	1.1	1.3	1.5	3	12	48	57	14	4			
Zn	693	800	1.2	2.40	0.040	0.0056	1.6	1.7	1.8	10	73	213	17	2.5	0.36			
Cd	594	700	1.2	2.42	0.056	0.0065	1.7	1.9	1.9	10	87	400	11	0.9	0.07			
Be	1551	1700	1.1	0.24	0.001	0.0006	1.0	1.1	1.1	2	2	2	4.4	3.5	2.0			
Mg	923	1000	1.1	10.7	0.010	0.0566	9.7	74	222	10	100	1000	510	220	100			
Tb	1629	2100	1.2	0.9	0.004	0.0005	1.1	1.1	1.2	3	4	4	550	150	40			

на эффективность рафинирования веществ в испарительных процессах. Также ставилась задача вычислить значения  $Pe$  в процессах кристаллизации.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ

**Вычисление числа  $Pe$  в процессах нормальной направленной кристаллизации.** В этих процессах  $Pe = vX/D$ , где  $v$  – скорость кристаллизации,  $D$  – коэффициент диффузии примеси,  $X$  – длина горизонтального контейнера или толщина слоя расплава в тигле.

**Коэффициент  $\beta$  и число  $Pe$  в процессах дистилляции и сублимации.** Рассматривалось испарение веществ с простой основой, для которых дистилляция и сублимация как процессы рафинирования имеют практический смысл [14–16].

Для расчетов  $\beta/\beta_0$  использовалось уравнение (1) (с заменой  $k_0$  и  $k$  на  $\beta_0$  и  $\beta$  соответственно) при значениях  $\delta/D = 100$  и  $1000$  с/см (как для процессов кристаллизации [8, 9]). Для простоты расчетов считалось, что материал и контейнер имеют простые формы, при которых  $v = w/\rho$ . Скорость  $w$  [г/(см<sup>2</sup> с)] вычислялась по уравнению Ленгмюра с помощью известной формулы для числовых расчетов [17]

$$w = 0.058p \left( \frac{M}{T} \right)^{1/2},$$

где  $p$  – давление пара [мм рт. ст.] при температуре  $T$  [К],  $M$  – атомная (или молярная) масса пара вещества [а.е.м. или г/моль].

Справочные данные о давлении  $p$  почти всех веществ брали из монографии Несмеянова [18] (для  $Te$  учитывалась особенность испаряться в виде молекул  $Te_4$ ), а данные о давлении  $p$  для  $Tb$  – из [16].

Рассматривалось испарение веществ при  $T_m$  и  $T \neq T_m$  при не слишком большом отклонении  $T$  от  $T_m$ . Поскольку повышение (понижение) температуры процесса увеличивает (уменьшает) одновременно как  $\delta$ , так и  $D$ , предполагалось, что отклонение  $T$  от  $T_m$  не отражается существенно на значении  $\delta/D$ . Для вычислений числа Пекле использовалась формула [6, 7]

$$Pe(T) = \frac{w(T)X}{\rho D(T)} = \frac{0.058p \left( \frac{M}{T} \right)^{1/2} X}{\rho D_m \exp \left[ \frac{Q}{R} \left( \frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right]},$$

где  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>;  $Q/R$  – отношение энергии активации диффузии примеси к универсальной газовой постоянной, К;  $D_m$  – коэффициент диффузии примеси в веществе при температуре вблизи  $T_m$ , см<sup>2</sup>/с. В выполняемых расчетах использовалось значение  $D_m = 5 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с для жидкости и  $D_m = 5 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с для твердого тела. Как и в работах [6, 7], расчеты выполнялись при

трех значениях  $Q$  и одном (для сопоставимости результатов) значении  $X = 1$  см.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Число  $Pe$  в процессах направленной кристаллизации.** При обычных значениях  $v < 10$  см/ч =  $3 \times 10^{-5}$  м/с,  $L \sim 0.1$  м и  $D \sim 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с [3, 8, 9] вычисленное значение  $Pe < 0.1$ . При этом изменение  $v$  в интервале от 0 до 10 см/ч сопровождается изменением  $k$  от  $k_0$  до  $k = 1$ . Таким образом, в кристаллизационных процессах рафинирования учет числа  $Pe$  не имеет смысла, при этом (как известно [3, 8, 9]) имеет смысл учет зависимости  $k$  от скорости кристаллизации.

**Коэффициент  $\beta$  и число  $Pe$  в процессах дистилляции и сублимации.** Результаты вычислений  $\beta$ , отношения  $\beta/\beta_0$  и числа Пекле при указанных температурах,  $\delta/D$  и  $\beta_0 < 1$  приведены в табл. 1 и 2. Обращает на себя внимание то, что в отдельных случаях  $\beta/\beta_0$  сильно зависит от выбора значения  $\delta/D$  (100 или 1000 с/см). Сопоставление табл. 1 и 2 позволяет оценить влияние температуры на  $\beta/\beta_0$  и  $Pe$  (при заданном значении  $X$ ) того или иного вещества, т.е. выяснить роль температуры в процессе его очистки.

Снижение  $T$  по отношению к  $T_m$  при сублимации  $Sm$ ,  $Yb$ ,  $Mg$ ,  $Eu$  заметно понижает  $\beta/\beta_0$ , увеличивая или уменьшая  $Pe$  (по сравнению со значениями этих величин при  $T = T_m$ ) в зависимости от  $Q$ . Повышение  $T$  по отношению к  $T_m$  при дистилляции  $Te$ ,  $Zn$ ,  $Cd$  несколько повышает  $\beta/\beta_0$ , увеличивая или уменьшая  $Pe$  в зависимости от  $Q$ . Такое же изменение температуры процесса при дистилляции  $Ve$  и  $Tb$  почти не изменяет  $\beta/\beta_0$ , но заметно увеличивает  $Pe$ . Влияние коэффициента  $\beta$  и числа  $Pe$  на рафинирование того или иного вещества зависит от природы вещества.

Несмотря на отсутствие в литературе надежных данных о  $Q$  и  $D_m$  для той или иной системы “основа–примесь”, выполненные расчеты дают представление о влиянии температуры на эффективность рафинирования веществ в испарительных процессах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективный коэффициент разделения и число Пекле рассматриваются как два параметра процессов рафинирования веществ кристаллизацией, дистилляцией и сублимацией. Показано, что в кристаллизационных процессах рафинирования число  $Pe$  малó и основным параметром является коэффициент разделения (для которого известна зависимость от скорости кристаллизации: уравнение Бартона-Прима-Слихтера с известными значениями  $\delta/D$ ). Для дистилляции и сублимации

рассматривались коэффициент разделения и число  $Pe$  при температурах испарения, не слишком отличающихся от температур плавления вещества (т.е. при тех же значениях  $\delta/D$ , что и при кристаллизации).

С помощью названного уравнения при  $\delta/D = 100$  и  $1000$  с/см для ряда веществ с простой основой (Sm, Yb, Mg, Eu, Te, Zn, Cd, Be, Tb) сделано сравнение эффективного ( $\beta$ ) и равновесного ( $\beta_0$ ) коэффициентов разделения при температурах испарения  $T = (0.9-1.2)T_m$ , а отдельно вычислены значения числа  $Pe = vX/D$  при  $X = 1$  см и тех же температурах.

Показано, что повышение  $T$  может ухудшать дистилляционное и сублимационное рафинирование рассмотренных веществ как вследствие увеличения расхождения между  $\beta$  и  $\beta_0$ , так и вследствие увеличения  $Pe$  (при заданном  $X$  и  $\beta < 1$ ), при этом раздельное влияние коэффициента  $\beta$  и числа  $Pe$  на процессы рафинирования различных веществ различно.

Выполненные расчеты дают качественное представление о влиянии температуры на эффективность рафинирования веществ в испарительных процессах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Девярых Г.Г., Еллиев Ю.Е.* Глубокая очистки веществ. М.: Высшая школа, 1990. 192 с.
2. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 2. В 2 кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 368 с.
3. Кристаллизация из расплавов: Справочное изд. Пер. с нем. Бартел И. и др. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
4. *Кириллов Ю.П., Кузнецов Л.А., Шапошников В.А., Чурбанов М.Ф.* Влияние диффузии на глубину очистки веществ дистилляцией // Неорганические материалы. 2015. Т. 51. № 11. С. 1177–1182. <https://doi.org/10.7868/S002337X15100085>
5. *Жуков А.И., Кравченко А.И.* Расчет сублимации с учетом диффузии примеси // Неорганические материалы. 2017. Т. 53. № 6. С. 662–668. <https://doi.org/10.1134/S0020168517060161>
6. *Кравченко А.И., Жуков А.И.* Температурная зависимость диффузионного числа Пекле в процессах сублимации некоторых простых веществ // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 7. С. 789–795. <https://doi.org/10.1134/S0020168521070101>
7. *Kravchenko A.I., Zhukov A.I., Datsenko O.A.* Temperature Dependences of the Peclet Number in Sublimation Processes of Simple Substances // Probl. At. Sci. Technol. 2022. № 1. P. 13–16. <https://vant.kipt.kharkov.ua/>
8. *Burton J.A., Prim R.C., Slichter W.P.* The Distribution of Solute in Crystals Growth from the Melt. 1. Theoretical // J. Chem. Phys. 1953. V. 21. № 11. P. 1987–1991.
9. *Бартон Дж.А., Прим Р.К., Сликтер В.Р.* Распределение примесей в кристаллах, выращенных из расплава. Ч. 1. Теория // Германий / Под ред. Петрова Д.А. М.: Иностранная литература, 1955. С. 74–81.
10. *Нисельсон Л.А., Ярошевский А.Г.* Межфазовые коэффициенты распределения. Равновесия кристалл–жидкость и жидкость–пар. М.: Наука, 1992. 399 с.
11. *Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б.* Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСиС, 2005. 362 с.
12. *Бокштейн Б.С.* Атомы блуждают по кристаллу. М.: Наука, 1984. 208 с.
13. *Kravchenko A.I.* Simple Substances Refining: Efficiency of Distillation Methods // Funct. Mater. 2000. V. 7. № 2. P. 315–318.
14. *Кравченко А.И.* Уравнение распределение примеси в твердом дистилляте // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 8. С. 1021–1022.
15. *Кравченко А.И.* Соотношение между эффективным и идеальным коэффициентами разделения при дистилляции и сублимации // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. № 4. С. 423–430. <https://doi.org/10.1134/S0020168516040096>
16. *Ke L., Zhang L., Zhang X., Li Z., Wang Z., Chen D., Zhou L., Chen S., Zheng L., Zhou X.* Medium-Volatile Impurity Distribution in Purification of Terbium Metal by Vacuum Distillation // Sep. and Purif. Technol. 2021. V. 266. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118566>
17. *Пазухин В.А., Фишер А.Я.* Разделение и рафинирование металлов в вакууме. М.: Металлургия, 1969. 204 с.
18. *Несмеянов А.Н.* Давление пара химических элементов. М.: Из-во АН СССР, 1961. 396 с.