

УДК 54.058

О ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗДЕЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПАРЕНИЯ И СТЕПЕНИ ДИСТИЛЛЯЦИИ

© 2023 г. А. И. Кравченко¹, *, А. И. Жуков¹¹Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Национальной академии наук Украины, ул. Академическая, 1, Харьков, 61108 Украина

*e-mail: krwchnko@gmail.com

Поступила в редакцию 08.02.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 11.04.2023 г.

Установлена принципиальная возможность пошагового вычисления зависимостей эффективного коэффициента разделения β при дистилляции и сублимации от температуры испарения T и степени дистилляции g . Существование зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ рассматривается как следствие изменения распределения примеси в испаряющемся материале при изменении T и g . Расчеты зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ основаны на использовании уравнения Бартон–Прима–Слихтера и на расчетах распределения примеси в испаряющемся материале при заданных параметрах вещества и материала. Приведены результаты расчетов названных зависимостей на примере модельного материала на основе бериллия.

Ключевые слова: дистилляция, сублимация, рафинирование, коэффициент разделения, диффузионный слой, уравнение Бартон–Прима–Слихтера, число Пекле

DOI: 10.31857/S0002337X23080080, EDN: SHNYFM

ВВЕДЕНИЕ

Дистилляция и сублимация (как и кристаллизация) входят в перечень основных методов получения высокочистых веществ, в связи с чем проявляется интерес к теории испарительного рафинирования [1–9].

В общем случае рафинирование двухкомпонентного вещества в процессе испарения описывается системой уравнений с двумя параметрами: равновесным коэффициентом разделения β_0 и числом Пекле

$$Pe = wX/\rho D,$$

где w – скорость испарения вещества с единицы поверхности, ρ – плотность вещества, D – коэффициент диффузии примеси, X – начальный размерный фактор испаряемого материала (начальная толщина слоя жидкости в тигле при дистилляции; начальная толщина испаряемой пластины, плотно вложенной в тигель; начальный радиус шара при сублимации) [5, 6, 9]. Если контейнер, содержащий испаряемый материал, имеет простую форму (например, цилиндрическую), то линейная скорость движения поверхности испарения $v = w/\rho$, а $Pe = vX/D$. В силу сложности уравнений испарительного рафинирования нахождение их решений возможно только численными методами. Результатом вычислений могут быть распределения примесей и усредненные concentra-

ции примесей в конденсате и в остатке. По мере уменьшения Pe (с приближением β к β_0) все более обоснованным становится применение простого уравнения

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

где β – эффективный коэффициент разделения (отношение концентрации примеси в паре, покидающей поверхность испарения, к ее концентрации в веществе вблизи поверхности испарения), C – концентрация примеси в конденсате, C_0 – начальная концентрация, g – степень дистилляции [6, 9].

При разработке названной теории была рассмотрена температурная зависимость $Pe(T)$ как следствие температурных зависимостей $v(T)$ и $D(T)$ [7, 8]. Скорость w может быть найдена с помощью уравнения Ленгмюра в виде формулы для численных расчетов [10]:

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

где p – давление пара (мм рт. ст.) при температуре T (К), M – атомная (или молярная) масса пара вещества (а. е. м. или г/моль). Для простых веществ данные о давлении p могут быть взяты из монографии [11].

Установлена температурная зависимость $D(T)$ [7, 8]

$$D(T) = D_m \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2)$$

где T — температура процесса, T_m — температура плавления вещества, D_m — коэффициент диффузии примеси при температуре T_m , Q/R — отношение энергии активации диффузии примеси к универсальной газовой постоянной. (Для большинства примесей в простых веществах значения $Q/R = (0.5-3) \times 10^4$ К.)

Отмечено подобие уравнений дистилляции и направленной кристаллизации [3, 5]. В работах [5, 9] была отмечена возможность использования в расчетах испарительных процессов рафинирования уравнения Бартон—Прима—Слихтера (изначально выведенного при рассмотрении кристаллизации), которое связывает эффективный (β) и равновесный (β_0) коэффициенты разделения:

$$\beta = \beta_0 / [\beta_0 + (1 - \beta_0) \exp(-v\delta/D)], \quad (3)$$

где v — линейная скорость движения поверхности раздела фаз, δ — толщина пограничного слоя в кристаллизующем или испаряемом материале у поверхности раздела фаз (примесно обогащенного, если $\beta_0 < 1$ или примесно обедненного, если $\beta_0 > 1$), D — коэффициент диффузии примеси [12–14]. Уравнение Бартон—Прима—Слихтера дорабатывалось после его появления для учета конвекции в кристаллизующей жидкости [15–17].

Было отмечено, что экспериментально установлены порядки значений δ и D для процессов кристаллизации, т.е. при температуре плавления T_m ($\delta_m \sim 10^{-3}-10^{-2}$ см, $D_m \sim 10^{-5}$ см²/с в жидкости и $D_m \sim 10^{-6}$ см²/с в твердом теле [2, 3, 9, 12–14, 18]), однако неизвестна температурная зависимость $\delta(T)$ для процессов испарения [9]. Уравнение Бартон—Прима—Слихтера использовалось для рассмотрения процессов испарения при температурах, близких T_m — при $\delta \approx \delta_m$ и $D \approx D_m$ [9].

Пограничный слой в материалах был предметом рассмотрения в связи с изучением других фазовых превращений: толщина $\delta \sim 10^{-3}-10^{-2}$ см в процессах электролиза [19, 20]; $\delta < 2 \times 10^{-3}$ см в процессе сублимации магния при $T = T_m - (150 \pm 50)$ К [21].

Изменение распределения примеси в материале в процессе испарения может изучаться расчетными методами [6]. Существуют экспериментальные свидетельства зависимости $\beta(T)$, но без обсуждения причин. Коэффициент β приближается к единице при росте T [22]. (Такой же является и температурная зависимость идеального коэффициента разделения β_i как отношения давления пара чистых компонентов [11], причем если $0.1 < \beta_i < 10$, то расхождение между β и β_i невелико [22].) В отдельных случаях зависимость $\beta(T)$ имеет более

сложный характер — с максимумом [23]. Также отмечалась возможность существования зависимости $\beta(g)$ [24], но без учета числа Пекле в качестве фактора испарительного процесса.

Целью работы было рассмотрение причин существования зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ и изучение возможности вычисления этих зависимостей.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ $\beta(T, g)$

Технологический процесс испарительного рафинирования вещества можно считать состоящим из двух этапов: быстрого нагрева вещества от низкой (например, комнатной) температуры (при которой скорость испарения вещества незначительна) до температуры T_e при степени дистилляции g вблизи нуля и длительного испарения вещества при постоянной температуре T_e . Каждый этап может рассматриваться пошагово.

На первом этапе толщина диффузионного слоя в испаряющемся материале растет от нуля до значения δ_e , которое достигается в момент достижения температуры T_e . (Если $T_e > T_m$, то $\delta_e > \delta_m$.) При этом изменяются величины v , D и $v\delta/D$ и, как следствие, коэффициент β в уравнении (3). Величина v/D в уравнении (3) обычно увеличивается с ростом T , но иногда уменьшается — при различных значениях энергии активации диффузии примеси Q [7, 8].

На втором этапе (при постоянной температуре T_e) δ растет при постоянном значении v/D и, как следствие, β приближается к единице.

Существует принципиальная возможность вычисления зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ в процессе дистилляции вещества с известными значениями ρ и M при заданных значениях β_0 , D_m , Q , T и X и вычисленном, например с помощью формулы (1), значении v .

Процесс нагрева вещества от T_m до T_e может рассматриваться состоящим из N шагов, каждый n -й из которых характеризуется своими значениями температуры T_n , скорости испарения v_n , толщины диффузионного слоя δ_n , коэффициента диффузии примеси D_n , числа Пекле

$$Pe_n = v_n X / D_n$$

и эффективного коэффициента разделения β_n . При этом для каждого следующего шага с номером $n > 1$ при значениях Pe_n и β_{n-1} могут быть найдены распределение примеси в испаряющейся жидкости (например, с помощью методики, представленной в работе [6]) и значение δ_n .

В связи с тем, что концентрация примеси в материале изменяется монотонно с удалением от поверхности раздела фаз, величина δ должна опреде-

ляться условно — например, как расстояние, на котором концентрация примеси в веществе

$$C_{\delta} = \eta C_S, \quad (4)$$

где C_S — концентрация примеси на поверхности раздела фаз, а η — условно выбранное положительное число меньше единицы (например, 0.1 или 0.01).

После нахождения δ_n для шага с номером n значения v_n и D_n вместе с найденным значением δ_n должны быть подставлены в уравнение (3) для вычисления β_n . Для простоты расчетов на этапе нагрева вещества (первый этап рассмотрения) начальный размерный фактор X может считаться постоянным при всех значениях n .

Подобным образом могут вычисляться и значения β при различных g на этапе испарения при постоянной температуре T_e (т.е. на основном этапе). В простом случае может рассматриваться материал в форме плоского слоя, который испаряется с поверхности. В момент достижения температуры T_e (при $g \approx 0$) материал характеризуется начальной толщиной H_1 , толщиной пограничного слоя δ_e , коэффициентом диффузии примеси D_e , эффективным коэффициентом разделения β_e и числом Пекле

$$Pe_1 = v_e H_1 / D_e.$$

Значения δ_e , β_e , D_e и v_e находятся в расчетах на первом этапе рафинирования. С этого момента рассмотрение испарения материала при постоянной температуре может быть разбито на K шагов с толщиной материала

$$H_k = [(K - k + 1)/K] H_1$$

в начале каждого шага (k — номер шага) и с коэффициентом разделения β_k .

Вычисление коэффициента β_k в зависимости от g на шаге с номером k может быть выполнено путем нахождения распределения примеси в материале толщиной H_k — например, с помощью названной методики расчета [6] с параметрами β_{k-1} и

$$Pe_k = v_e [(K - k + 1)/K] H_1 / D_e.$$

Так, для вычисления β_2 находится распределение примеси в материале толщиной

$$H_2 = [(K - 2 + 1)/K] H_1$$

при

$$Pe_2 = v_e [(K - 2 + 1)/K] H_1 / D_e.$$

С помощью найденного распределения примеси на шаге с номером k находится толщина δ_k диффузионного слоя на этом шаге при условно заданном значении η . Для вычисления β_k найденное значение δ_k может быть подставлено в уравнение (3) вместо δ при заданном β_0 и найденных значениях v_k и D_k вместо v и D соответственно. Таким

образом, для испарения материала с постоянной температурой T_e может быть выполнен расчет значений β при различных значениях доли остатка

$$g_r = H_n / H_1$$

или при различных значениях степени дистилляции $g = 1 - g_r = 1 - H_n / H_1$.

Полезно отметить, что уравнение Бартона—Прима—Слихтера (3) может быть приведено к виду, который дает лучшее представление о взаимосвязи β и β_0 :

$$\beta^{-1} - 1 = (\beta_0^{-1} - 1) \exp(-v\delta/D).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием уравнения Бартона—Прима—Слихтера выполнен анализ зависимости эффективного коэффициента разделения β в процессе дистилляции от температуры испарения T и степени дистилляции g . Отмечено, что существование этой зависимости является следствием зависимости параметров уравнения Бартона—Прима—Слихтера (v , δ и D) от T и g .

Показана принципиальная возможность пошагового вычисления зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$, основанная на использовании уравнения Бартона—Прима—Слихтера и расчетах распределения примеси в материале, при заданных параметрах вещества (β_0 , δ_m , D_m , Q , M , ρ), значениях давления пара основного компонента при выбранных значениях температуры на каждом шаге вычислений и начальной толщине H_1 испаряемого материала. Метод расчета применим и к сублимации.

В качестве примера применения разработанного метода вычисления зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ были выполнены расчеты этих зависимостей для модельного материала “бериллий—примесь” при $\beta_0 = 0.1$ и начальном значении размерного фактора $X = 10$ см. Значения D_m и Q/R выбраны характерными для примесей в веществах с простой основой на основе данных [7, 8]. Толщина δ определялась с помощью формулы (4) при $\eta = 0.1$.

Исходные данные для расчетов зависимости $\beta(T)$ приведены в табл. 1, а результаты этих расчетов даны в табл. 2. Изменение числа Pe в табл. 2 отражает изменение коэффициента D и скорости w (или v) почти без изменения размерного фактора X (при малых значениях $g \leq 1\%$).

Расчеты зависимости $\beta(g)$ выполнены при двух указанных температурах и начальном значении $X = 10$ см. Исходные данные для этих расчетов приведены в табл. 3, а результаты расчетов — в табл. 4. Изменение значения числа Pe в табл. 4 отражает изменение размерного фактора X без изменения коэффициента D и скорости w (или v).

Таблица 1. Исходные данные для расчета зависимости $\beta(T)$

Величина	Символ	Размерность	Значение
Молекулярная масса основы	M	а. е. м.	9
Плотность	ρ	г/см ³	1.8
Температура плавления	T_m	К	1551
Равновесный коэффициент разделения	β_0	—	0.1
Начальная толщина материала	H_1	см	10
Коэффициент диффузии примеси при T_m	D_m	см ² /с	1×10^{-5}
Энергия активации диффузии примеси, отнесенная к газовой постоянной	Q/R	К	1×10^4
Константа в формуле (4)	η	—	0.1
Число этапов, на которое разбито рассмотрение процесса	N	—	5

Таблица 2. Расчеты коэффициента разделения β_n на разных этапах нагрева материала при расчетных данных, указанных в табл. 1 ($\beta_0 = 0.1$, $\eta = 0.1$, $H_1 = 10$ см; p_n — давление пара [11], w_n — скорость испарения с единицы поверхности, v_n — линейная скорость испарения, g — степень дистилляции, n — номер шага)

n	T_n , К	g	p_n , мм рт. ст.	$w_n \times 10^4$, г/(см ² с)	$v_n \times 10^4$, см/с	$D_n \times 10^5$, см ² /с	Pe_n	δ_n , см	$v_n \delta_n / D_n$	β_n
1	1551	0.002	0.03	1.3	0.7	1	70	0.0906	0.634	0.17
2	1600	0.004	0.06	2.6	1.5	1.22	120	0.0875	1.076	0.25
3	1700	0.006	0.24	10	6.0	1.77	340	0.0486	2.024	0.37
4	1800	0.008	0.80	33	18	2.44	740	0.0274	2.170	0.46
5	1900	0.010	2.32	93	51	3.29	1550	0.0142	2.206	0.49

Таблица 3. Исходные данные для расчета зависимости $\beta(g)$

Величина	Символ	Размерность	Значение
Молекулярная масса основы	M	а. е. м.	9
Плотность	ρ	г/см ³	1.8
Температура плавления	T_m	К	1551
Скорость испарения при T_m	v_m	см/с	7×10^{-5}
Коэффициент диффузии примеси при T_m	D_m	см ² /с	1×10^{-5}
Температура испарения	T_e	К	1700
Скорость испарения при T_e	v_e	см/с	6×10^{-4}
Коэффициент диффузии примеси при T_e	D_e	см ² /с	1.77×10^{-5}
Равновесный коэффициент разделения	β_0	—	0.1
Начальная толщина материала	H_1	см	10
Энергия активации диффузии примеси, отнесенная к газовой постоянной	Q/R	К	1×10^4
Константа в формуле (4)	η	—	0.1
Число этапов, на которое разбито рассмотрение процесса	K	—	10

Таблица 4. Расчеты эффективного коэффициента разделения β_k на k -м этапе рассмотрения в зависимости от степени дистилляции g в процессе испарения материала при $T_m = 1551$ К и $T_e = 1700$ К при расчетных данных, указанных в табл. 3 ($\beta_0 = 0.1$, $\eta = 0.1$, $H_1 = 10$ см, $v_m/D_m = 7.0$ см⁻¹, $v_e/D_e = 33.9$ см⁻¹); H_k , Pe_k , δ_k и β_k — толщина материала, число Пекле, толщина приграничного слоя и эффективный коэффициент разделения в начале шага с номером k соответственно, g_r — доля остатка

k	H_k , см	g_r	g	Pe_k	δ_k , см	$v_m \delta_k/D_m$	β_k	Pe_k	δ_k , см	$v_e \delta_k/D_e$	β_k
				при $T_m = 1551$ К				при $T_e = 1700$ К			
1	10	1	0	70	0	0	0.1	340	0	0	0.1
2	9	0.9	0.1	63	0.296	2.075	0.47	310	0.0673	2.281	0.52
3	8	0.8	0.2	56	0.317	2.216	0.51	270	0.0676	2.292	0.52
4	7	0.7	0.3	49	0.323	2.262	0.52	240	0.0677	2.295	0.52
5	6	0.6	0.4	42	0.326	2.283	0.52	200	0.0677	2.295	0.52
6	5	0.5	0.5	35	0.327	2.292	0.52	170	0.0677	2.295	0.52
7	4	0.4	0.6	28	0.328	2.297	0.53	140	0.0677	2.295	0.52
8	3	0.3	0.7	21	0.329	2.300	0.53	100	0.0677	2.295	0.53
9	2	0.2	0.8	14	0.329	2.301	0.53	70	0.0677	2.296	0.53
10	1	0.1	0.9	7	0.329	2.302	0.53	34	0.0677	2.296	0.53

Табл. 2 и 4 дают представление о характере зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ для рассматриваемого материала с заданными расчетными данными. Коэффициент β заметно изменяется с температурой. Расчеты зависимости $\beta(g)$ выполнялись не только при $H_1 = 10$ см (табл. 4), но и при $H_1 = 1$ см (не представлены). Коэффициент β очень быстро изменяется с ростом g от нуля и уже при $g \approx 0.1$ достигает постоянного значения почти вне зависимости от выбора T и H_1 .

Полезно сделать следующее замечание. Можно ожидать, что результаты вычисления зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ будут другими численно, (но не по характеру), если вычисления будут проводиться с другими методами — например, с использованием усовершенствованных уравнений, предложенных вместо уравнения Бартона—Прима—Слихтера [15–17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена принципиальная возможность пошагового вычисления зависимостей эффективного коэффициента разделения β при дистилляции и сублимации от температуры испарения T и степени дистилляции g . Существование зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ рассматривается как следствие изменения распределения примеси в испаряющемся материале при изменении T и g . Расчеты зависимостей $\beta(T)$ и $\beta(g)$ основаны на использовании уравнения Бартона—Прима—Слихтера и на расчетах распределения примеси в испаряющемся материале при заданных параметрах вещества и материала. Приведены примеры расчетов названных зависимостей для модельного материала на

основе бериллия со значением равновесного коэффициента разделения $\beta_0 = 0.1$. Установлен характер названных зависимостей.

Результаты выполненной работы способствуют лучшему пониманию особенностей испарительных процессов рафинирования веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King C.J. Separation processes. Second edition. N.Y.: Dover Publication, 2013.
2. Девярых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Глубокая очистки веществ. М.: Высшая школа, 1990. 192 с.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 2. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 368 с.
4. Нисельсон Л.А., Ярошевский А.Г. Межфазовые коэффициенты распределения. Равновесия кристалл — жидкость и жидкость — пар. М.: Наука, 1992. 399 с.
5. 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>
6. 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>
7. 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>
8. 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/>
9. Кравченко А.И., Жуков А.И. Коэффициенты разделения и числа Пекле в испарительных процессах рафинирования веществ с простой основой при температурах вблизи от температур плавления // *Неорган. материалы.* 2022. Т. 58. № 8. С. 891–897. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22080073>
 10. Пазухин В.А., Фишер А.Я. Разделение и рафинирование металлов в вакууме. М.: Металлургия, 1969. 204 с.
 11. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. М.: Из-во АН СССР, 1961. 396 с.
 12. Кристаллизация из расплавов: Справочное изд. Пер. с нем. / Под ред. Бартел И., Буриг Э., Хайн К., Кухарж Л. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
 13. 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.
 14. 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 лит., 1955. С. 74–81.
 15. Ostrogorsky A.G. Film Thickness and Convection Coefficient Formulations of k_{eff} // *J. Serbian Soc. Comput. Mech.* 2012. V. 6. № 1. P. 97–107. http://www.ss-cm.kg.ac.rs/jsscm/downloads/Vol6No1/Vol6No1_07.pdf
 16. Ostrogorsky A.G. Empirical Correlations for Natural Convection, Δ and k_{eff} // *J. Cryst. Growth.* 2015. V. 426. P. 38–48.
 17. Voloshin A.E., Prostomolotov A.I., Verezub N.A. On the Accuracy of Analytical Models of Impurity Segregation during Directional Melt Crystallization and Their Applicability for Quantitative Calculations // *J. Cryst. Growth.* 2016. V. 453. P. 188–197.
 18. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСиС, 2005. 362 с.
 19. Багоцкий В.С. Диффузионный слой // *Физический энциклопедический словарь* (в 5 томах). М.: Сов. энциклопедия, 1960. Т. 1. С. 621.
 20. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
 21. Papirov I.I., Kravchenko A.I., Mazin A.I., Shiyan A.V., Virich V.D. Impurity distributions in a Magnesium Sublimates // *Probl. At. Sci. Technol.* 2016. № 1. P. 21–22. <https://vant.kipt.kharkov.ua/>
 22. Кравченко А.И. Соотношение между эффективным и идеальным коэффициентами разделения при дистилляции и сублимации // *Неорган. материалы.* 2016. Т. 52. № 4. С. 423–430. <https://doi.org/10.7868/S0002337X16040096>
 23. Воротынец В.М., Мочалов Г.М., Трубянов М.М., Шабыкин Д.Н. Температурная зависимость коэффициента разделения в прерывистой дистилляции аммония в температурном интервале между нормальной температурой кипения и критической температурой // *ТОХТ.* 2014. Т. 48. № 1. С. 60–65. <https://doi.org/10.7868/S0040357114010151>
 24. Кравченко А.И. Зависимость эффективного коэффициента разделения в некоторых металлических системах основа–примесь от степени перегонки // *Неорган. материалы.* 2015. Т. 51. № 2. С. 146–147. <https://doi.org/10.1134/S0020168515010091>