ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ, 2020, том 54, № 1, с. 125–132

УДК 621.039.31

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА

© 2020 г. О. Е. Александров[a], *, В. Е. Атанов[a]

[a] *Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

**e-mail: aleks.o.e@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.07.2017 г.
После доработки 09.01.2018 г.
Принята к публикации 07.02.2018 г.

Проанализированы ошибки и рассмотрены исходные постулаты существующей теории потенциала для многокомпонентного разделения изотопов. Показано, что проблемы определения потенциала разделения многокомпонентной смеси вызваны отсутствием корректного определения ступени (разделительного элемента) для каскада. Приведены два варианта определения ступени и показана связь этих определений с выражением для разделительного потенциала многокомпонентной смеси.

Ключевые слова: разделение многокомпонентных смесей, разделительный элемент, функция ценности, разделительная способность, теория каскадов

DOI: 10.31857/S0040357119060022

ВВЕДЕНИЕ

Организация эффективного разделения многокомпонентных смесей требует теоретического осмысления процесса разделения и отыскания наиболее оптимальных способов его организации.

При современном развитии численных методов и вычислительной техники не составляет большого труда рассмотреть последовательно множество вариантов разделительного каскада для решения поставленной задачи и выбрать из них оптимальный. Но никакой уровень развития численных методов не способен ответить на два важных вопроса:

1) как далеки результаты численной оптимизации от идеала?

2) как объективно определить стоимость продукции или соотнести затраты на получение этой продукции для различных концентраций продукта и сырья?

Актуальность определения выражения для разделительного потенциала многокомпонентной смеси подтверждается и продолжающимися публикациями на эту тему [1, 2].

Интерес к проблемам разделения многокомпонентных смесей не снижается. Это относится, в частности, и к проблеме разделительного потенциала. Однако последние работы в этой области [1, 2] демонстрируют существенное непонимание природы потенциала и методов его определения. Работа [1] посвящена сравнению применимости различных вариантов определения потенциала для анализа эффективности разделительного каскада, а работа [2] — обзор современного состояния дел в области определения многокомпонентного разделительного потенциала.

Цель данной статьи — анализ проблем определения вида разделительного потенциала для многокомпонентных смесей и поиск путей решения этих проблем.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕОРИИ

Основные понятия. В теории каскадов для количественного описания процесса разделения [3–5] вводят понятие разделительного потенциала или функции ценности смеси $V(C)$, зависящей только от концентрации смеси C. Здесь $C = (C_1, C_2, \dots C_n)$, где $C_1, C_2, \dots C_n$ — концентрации всех n компонентов смеси.

С помощью разделительного потенциала вводят понятие разделительной мощности или работы разделения ΔU для разделительного элемента и каскада:

$$\Delta U = \sum_i G^{(i)} V(C^{(i)}) - G^{(0)} V(C^{(0)}), \qquad (1)$$

где $G^{(0)}$ — поток питания или масса разделяемой смеси, $C^{(0)}$ — концентрации компонентов в исходной смеси, $G^{(i)}$ — потоки или массы отбора i, $C^{(i)}$ — концентрации компонентов в отборе i. Для случая потоков ΔU — разделительная мощность, для случая массы ΔU — работа разделения. В случае бинарного разделения — минимальное количе-

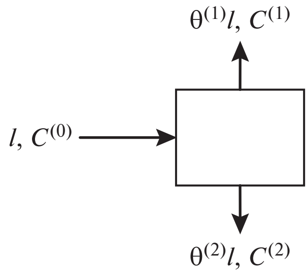

Рис. 1. Бинарный разделительный элемент: l – поток питания, $\theta^{(1)}l$ и $\theta^{(2)}l$ – потоки отбора, $C^{(0)}$, $C^{(1)}$ и $C^{(2)}$ – концентрация питания, первого и второго отбора соответственно.

ство потоков отбора два. В общем случае – число потоков отбора может быть больше двух.

Физический смысл ΔU – это минимальные затраты энергии на разделение или величина пропорциональная этим минимальным затратам. В каскаде разделительная мощность ΔU имеет наглядное представление – это минимальный суммарный поток внутри каскада или минимальное количество одинаковых разделительных элементов в каскаде для выполнения заданной программы разделения, т.е. при заданных внешних потоках отбора и питания, и заданных концентрациях во всех потоках.

Достаточно очевидно, что при отсутствии внутри каскада смешения потоков с разной концентрацией, его разделительная мощность ΔU есть сумма разделительных мощностей элементов

$$\Delta U = \sum_j \Delta U_j,$$

где ΔU_j – разделительная мощность j-го элемента каскада. Поскольку обычно каскад собирают из одинаковых разделительных элементов, то

$$\Delta U = N\delta U, \tag{2}$$

где N – число разделительных элементов в идеальном каскаде и δU – разделительная мощность одного элемента. Соотношение (2) позволяет оценить минимально необходимое количество разделительных элементов для заданной программы разделения.

Современное состояние теории потенциала. Как сказано в работе [2]: “попытки определения разделительного потенциала для многокомпонентных смесей предпринимаются давно”. За эти годы, как указано там же в [2], предложено несколько выражений для разделительного потенциала. К сожалению, вывод [2] “все известные на сегодняшний день потенциалы для многокомпонентных смесей носят частный характер, зависящий от вида разделяемой смеси, что не позволяет априори установить, какой из них является наилучшим для решения конкретной разделительной задачи” не может считаться обоснованным.

Цитируемый выше вывод [2] основывается на “отсутствии эталонного каскада, роль которого при разделении бинарных смесей играет идеальный каскад”. Это, на наш взгляд, основная ошибка большинства попыток определить разделительный потенциал для многокомпонентных смесей. Похожую ошибку допускают авторы работы [1], пытающиеся установить “правильный” потенциал, анализируя характеристики каскада.

Проблемы теории потенциала для многокомпонентного разделения, описанные в [2], вызваны отсутствием правильной постановки задачи. Аналитические и численные методы применяют для оптимизации “реальных” разделительных устройств, забывая, что важнейшие результаты теории бинарного разделения получены на базе “абстрактного” бинарного разделительного устройства. Более того, очевидно, что должна существовать нижняя граница для затрат энергии на разделение смеси и эта граница от конструкции разделительного устройства зависеть не может.

Для сокращения статьи, не приводятся существующие варианты определения многокомпонентного разделительного потенциала. Достаточно полный обзор приведен в [2].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В этом разделе приведена последовательная постановка задачи отыскания разделительного потенциала: от определения разделительного элемента и его свойств, до выражения для потенциала.

Разделительный элемент. Теория бинарного разделения начинается с постулирования существования разделительного элемента [4] с одним входом-питанием и двумя выходами-отборами, способного изменять концентрацию смеси в отборах, относительно концентрации смеси в питании, рис. 1.

Для разделительного элемента постулируется: а) независимость коэффициента разделения q,

$$q = \frac{C^{(1)}}{(1 - C^{(1)})}\frac{(1 - C^{(2)})}{C^{(2)}},$$

от концентрации в потоке питания и б) постоянство разделительной мощности δU,

$$\delta U = \frac{l}{8}[\ln(q)]^2,$$

где $C^{(1)}$ и $C^{(2)}$ – концентрация в первом и втором отборе соответственно; l – поток питания разделительного элемента; q – коэффициент разделения.

Таким образом, постулируется, хотя это не подчеркивается, прямая связь постоянства разделительной мощности и постоянства коэффициента разделения. Это важный момент, поскольку бинарный потенциал разделения может быть по-

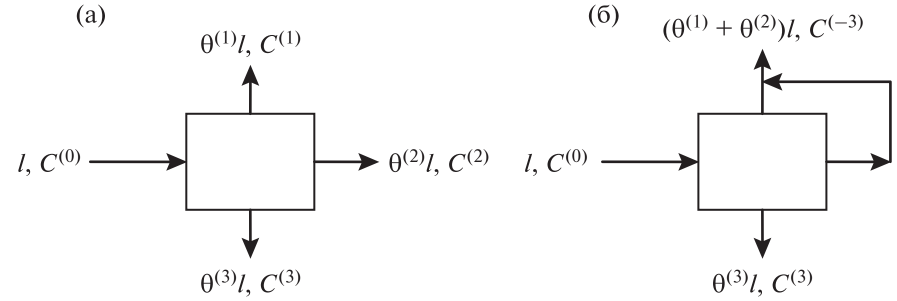

Рис. 2. Разделительный элемент: (а) – гипотетический трехкомпонентный, (б) – квазибинарный разделительный элемент для третьего компонента; l – поток питания разделительного элемента, $\theta^{(1)}l$, $\theta^{(2)}l$ и $\theta^{(3)}l$ – потоки отбора, $C^{(0)}$, $C^{(1)}$, $C^{(2)}$ и $C^{(3)}$ – концентрации питания, первого, второго и третьего отбора соответственно, $C_i^{(-3)} = \sum_{j\neq 3}\theta^{(j)}C_i^{(j)} \Big/ \sum_{j\neq 3}\theta^{(j)}$.

лучен без рассмотрения конкретной схемы каскада, а только из постулируемых свойств разделительного элемента [4].

Для получения аналогичных результатов в теории многокомпонентного разделения необходимо начать с определения разделительного элемента. Это определение, очевидным образом, будет содержать постулат о постоянстве разделительной мощности элемента.

Необходимо связать постоянную разделительную мощность элемента с другими характеристиками, необходимыми для построения каскада, – с характеристиками "степени обогащения" или чем-то, что должно заменить коэффициент разделения. Без задания этих характеристик и их связи с постоянной разделительной мощностью элемента построение каскада невозможно. Задание такой связи означает задание вида разделительного потенциала.

Еще одна проблема – выбор схемы разделительного элемента или выбор минимального числа отборов. Схема разделительного элемента должна допускать построение каскада, способного разделить исходную смесь до любых наперед заданных концентраций любого из компонентов. Это требование означает, что разделительный элемент должен осуществлять обогащение произвольного компонента смеси для любых концентраций этого компонента в смеси. Известно, что основная технология бинарного разделения – центрифуга – для компонента смеси, масса молекулы которого больше минимальной массы молекул смеси и меньше максимальной массы молекул смеси, не может обогащать смесь при произвольной концентрации. Или для этого требуется организация дополнительного отбора.

Можно принять в качестве элементарного разделительного элемента – элемент с одним входом-питанием и числом отборов, равным числу компонентов (см. рис. 2а). Без потери общности можно полагать, что в i-м отборе происходит обогащение по i-му компоненту.

В теории разделения компоненты смеси должны полагаться "равноправными", т.е. для каждого компонента смеси "абстрактный" разделительный элемент должен иметь идентичные характеристики. Тот факт, что самая массовая технология разделения – центрифуга – не может обеспечить этого свойства не должно останавливать. Имеется, по крайней мере, еще две технологии – электромагнитное разделение и лазерное разделение, где указанное свойство разделительного элемента может быть выполнено.

Единственной характеристикой, которой должен обладать разделительный элемент, является коэффициент разделения. Этот коэффициент должен быть "одинаковым" для всех компонентов смеси. Очевидным образом, его следует ввести как

$$q^{(i)} = \frac{R_i^{(i)}}{R_i^{(-i)}} = \frac{C_i^{(i)}}{(1-C_i^{(i)})}\frac{(1-C_i^{(-i)})}{C_i^{(-i)}}, \tag{3}$$

где $R_i^{(i)}$ – относительная концентрация i-го компонента в i-м отборе, $C_i^{(i)}$ – концентрация i-го компонента в i-м отборе, $R_i^{(-i)}$ – относительная средняя концентрация i-го компонента во всех отборах разделительного элемента, кроме i-го, $C_i^{(-i)}$ – средняя концентрация i-го компонента во всех отборах, кроме i-го $C_i^{(-i)} = \sum_{j\neq i}\theta^{(j)}C_i^{(j)} \Big/ \sum_{j\neq i}\theta^{(j)}$.

Выражение (3) следует из термодинамических соображений. Если все компоненты смеси равны, то обогащение по любому компоненту не должно зависеть от соотношения концентраций прочих компонентов.

В силу равноправности компонентов смеси все $q^{(i)}$ для разделительного элемента необходимо

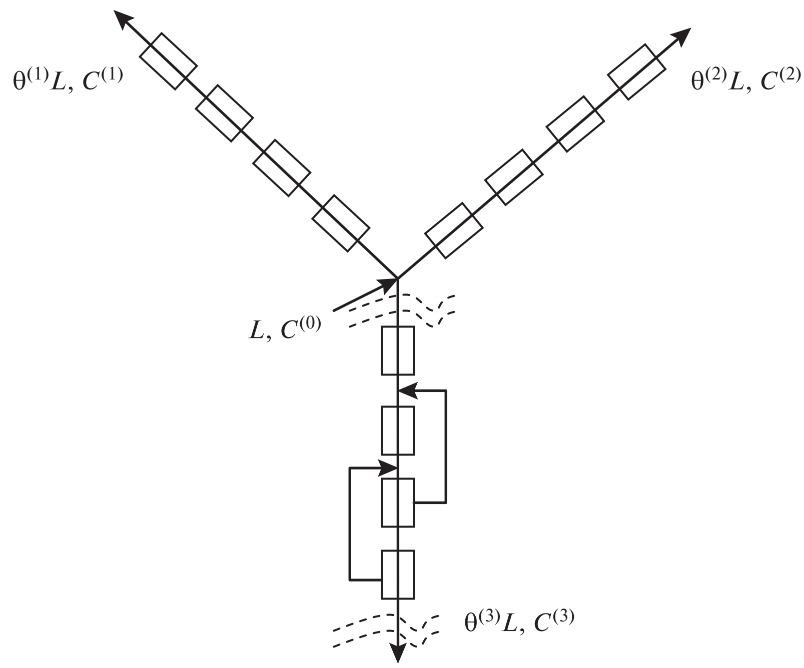

Рис. 3. Трехкомпонентный разделительный каскад: L – поток питания каскада, $\theta^{(1)}L$, $\theta^{(2)}L$ и $\theta^{(3)}L$ – потоки отбора, $C^{(0)}$, $C^{(1)}$, $C^{(2)}$ и $C^{(3)}$ – концентрации питания, первого, второго и третьего отбора соответственно.

объявить равными и не зависящими от концентрации потока питания.

Если предположить иное – это будет означать “неэквивалентность” компонентов смеси. Неэквивалентность компонентов смеси противоречит элементарным термодинамическим соображениям: нелогично утверждать, что отделение от идеальной газовой смеси молекулы некоего компонента требует больших или меньших затрат энергии, чем для молекул других компонентов.

Тот факт, что диффузионное разделение (центрифуга) не соответствует вышеприведенному утверждению, не означает ошибочности этого утверждения. Это означает только, что диффузионное разделение не самая эффективная технология для многокомпонентного разделения. Энергетические затраты бинарного разделения на основе диффузии тоже растут с уменьшением разницы массы молекул смеси, вплоть до бесконечности при разнице масс, стремящейся к нулю. Однако это никак не отражается на виде бинарного потенциала. Все эти отличия учитываются масштабным множителем – ценой единицы работы разделения для смеси конкретных изотопов.

Схема разделительного элемента для многокомпонентных смесей может быть проще. Достаточно конструкции, которая способна обогащать многокомпонентную смесь по любому из компонентов. Простейшим многокомпонентным разделительным элементом является не элемент, изображенный на рис. 2а, а “квазибинарный” элемент на рис. 2б. Такой элемент способен обогащать смесь по любому заданному компоненту смеси i и для любого компонента обеспечивает одинаковый, не зависящий от концентрации, коэффициент обогащения $q^{(i)} = q$. Элемент рис. 2а может быть преобразован к квазибинарному элементу рис. 2б простым объединением всех отборов, кроме избранного i. Коэффициент разделения такого “квазибинарного” элемента останется неизменным в соответствии с определением (3).

Квазибинарный разделительный элемент является, возможно, наиболее эффективным. Ведь в случае обогащения смеси по одному компоненту, не нужны другие отборы и нежелательно тратить энергию на обогащение по другим компонентам смеси. В таком случае, квазибинарный элемент является не просто “возможным вариантом” – он является наилучшим вариантом с точки зрения затрат энергии.

Идеальный каскад и идеальный разделительный процесс. Квазибинарный разделительный элемент позволяет построить несмешивающий каскад, способный разделить смесь произвольного количества компонентов до любых заданных концентраций (рис. 3). Каждая ветвь каскада представляет собой идеальный бинарный каскад, в котором происходит обогащение по одному из компонентов смеси. Обобщение рис. 3 на случай количества компонентов большего трех – очевидно.

Схема идеального многокомпонентного разделительного каскада (рис. 3), вместе с определе-

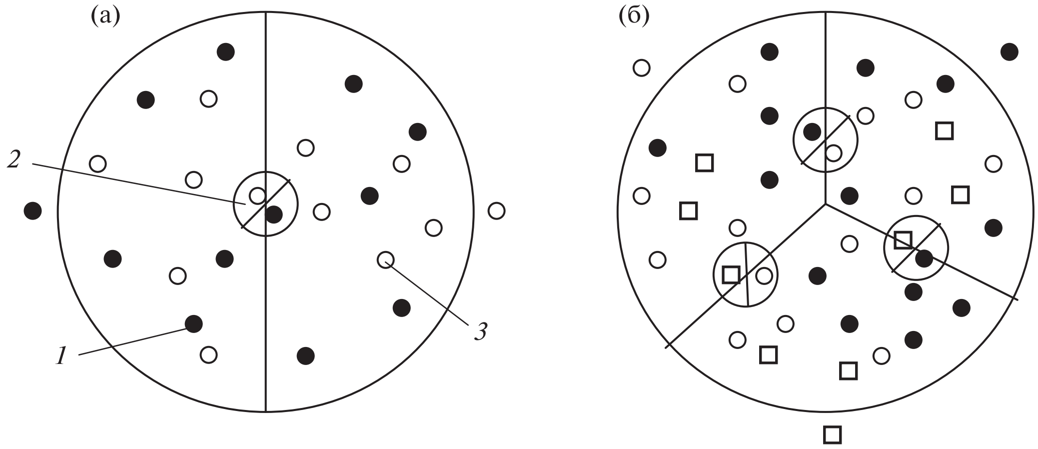

Рис. 4. Молекулярно-кинетическая модель процесса разделения: (а) – бинарное разделение; (б) – многокомпонентное разделение на примере трехкомпонентной смеси; *1* – объем для смеси обогащаемой "черными молекулами", *2* – устройство для парного обмена частицами, *3* – объем для смеси обогащаемой "белыми молекулами".

нием разделительного элемента хорошо иллюстрируют природу многокомпонентного разделительного потенциала, полученного в работе [6] – это сумма бинарных потенциалов для каждого из компонентов смеси

$$V(C) = \sum_{i=1}^{n} (2C_i - 1) \ln\left(\frac{C_i}{1 - C_i}\right). \quad (4)$$

Выражение (4) получено разложением уравнения (1) в ряд для случая малого изменения концентрации, аналогично тому, как это было сделано для бинарной смеси в [4]. Обоснование введения постоянного коэффициента разделения элемента для i-го компонента в форме (3) приведено выше.

Для лучшего понимания формулы (4) можно обратиться к другому способу ее вывода – элементарной молекулярно-кинетической модели процесса разделения, рассмотренной в статьях [7–9]. Процесс разделения рассматривался как последовательный обмен парами частиц между двумя (бинарная смесь) или более (многокомпонентная смесь) объемами, заполненными равновесной газовой смесью (рис. 4).

Устройства обмена (см. рис. 4) обеспечивают парный обмен молекулами нужных сортов между двумя соседними объемами смеси. Всего имеется столько устройств, сколько различных пар компонентов присутствует в смеси. Для бинарной смеси (рис. 4а) – одно, для тройной (рис. 4б) – три, для четырехкомпонентной – шесть и т.д. Обмен осуществляется так, чтобы в целевой объем попадает только нужная молекула. Тип накапливаемых в объемах молекул показан на рис. 4 рядом с объемами. При работе таких "устройств обмена" в каждом из объемов можно получить обогащение смеси целевыми молекулами и каждое срабатывание "устройства обмена" ведет к акту разделения. Эта модель способна разделить смесь до чистых компонент.

Схема (рис. 4б) возможна для произвольного числа компонентов смеси. Для числа компонент, большего трех, изображение схемы вызывает трудности, но помыслить такие парные соединения каждого объема с каждым можно для любого числа компонентов.

Поскольку в схеме рис. 4. не выполняется никаких "лишних" операций, компоненты смеси абсолютно равноправны и каждое срабатывание разделительного устройства ведет к изменению концентрации смеси, то минимальная работа разделения будет пропорциональна числу элементарных актов взаимодействия с молекулами смеси, необходимых для работы устройств обмена. Обмен парой частиц состоит из 1) поиска нужной пары частиц и 2) обмена частицами между объемами. Если подсчитать [8] число необходимых элементарных актов "выборка одной молекулы из объема", необходимых для отыскания подходящей пары молекул в равновесной смеси, и считать энергетические затраты на один элементарный акт одинаковыми, пропорциональными kT, – полные затраты энергии выражаются в форме (1), где вид функции $V(C)$ практически совпадает с (4):

$$V(C) = \sum_{i=1}^{n} (C_i - 1) \ln\left(\frac{C_i}{1 - C_i}\right). \quad (5)$$

Молекулярно-кинетическая модель разделительного процесса рис. 4 демонстрирует, что идеальное многокомпонентное разделение сводится к бинарному разделению. Но вместо одного бинарного разделителя, в общем случае, будет задействовано столько бинарных разделителей, сколько уникальных пар компонентов в смеси.

Интересным является небольшое отличие потенциала (4) от (5). Потенциал для молекулярно-кинетической модели рис. 4 дает меньшую оценку минимально-необходимых затрат энергии, т.е. каскад рис. 3 не является абсолютно идеальным, хотя он “несмешивающий”.

Сравнение схем рис. 3 и 4 позволяет понять причину этого. Схема рис. 3 отделяет от потока смеси один компонент в каждой из ветвей каскада, т.е. использует разделительный элемент рис. 2б. Схема рис. 4 отделяет сразу два компонента в каждом из объемов, т.е. использует разделительный элемент рис. 2а и затрачивает меньше энергии на разделение смеси.

Для бинарной смеси – (4) и (5) сводятся к классическому бинарному потенциалу с точностью до постоянного множителя.

Работа [2] путает проблему построения оптимального разделительного каскада центрифуг для многокомпонентной смеси и проблему вычисления многокомпонентного разделительного потенциала. Для отыскания потенциала каскад не нужен. Бинарный разделительный потенциал выводится только из свойств разделительного элемента. Точно также, для вывода многокомпонентного разделительного потенциала достаточно дать определение свойств разделительного элемента.

Разделительный потенциал и каскад. Вопрос “можно ли построить несмешивающий разделительный каскад для многокомпонентной смеси?” остается открытым. Как показано выше, для квазибинарного разделительного элемента такой каскад существует. Реальные разделительные элементы ближе к варианту рис. 2а – разделительный элемент с тремя и более отборами, в каждом из которых происходит обогащение смеси по одному из компонентов. Возможные схемы построения несмешивающих каскадов для таких разделительных элементов рассмотрены в работах [10, 11], но эта проблема пока далека от окончательного решения.

Вернемся к работе [1]. Эта работа не единична, библиография аналогичных работ приведена в [1] и [2]. В ней сделана попытка оценить “правильность” того или иного выражения для разделительного потенциала путем численного расчета “почти не смешивающего” каскада и вычисления для него двух параметров: коэффициента полезного действия η и коэффициента использования разделительной мощности μ. Степень “правильности” потенциала предлагается оценивать по степени близости значений этих параметров к единице.

Коэффициент полезного действия η определяется [1] как отношение разделительной мощности каскада ΔU к сумме разделительных мощностей всех разделительных элементов каскада ΔU_j:

$$\eta = \frac{\Delta U}{\sum_j \Delta U_j}.$$

Коэффициент использования разделительной мощности μ определяется [1] как отношение разделительной мощности каскада ΔU к максимально возможной разделительной способности каскада, “которую находили умножением суммарного потока ступеней $\sum_j L_j$ на максимальную удельную разделительную способность ступени $\Delta U_j / L_j$”

$$\mu = \frac{\Delta U}{\left(\Delta U_j / L_j\right) \sum_j L_j}.$$

Для несмешивающего каскада эти два параметра – суть, одно и то же и равны единице для любого вида разделительного потенциала $V(C)$, т.е. не могут являться критерием оценки “правильности” того или иного вида $V(C)$.

Поскольку каскад собирается из одинаковых разделительных устройств, то $\sum_j L_j = lN$, где N – количество разделительных устройств в каскаде, l – поток питания одного разделительного устройства. Тогда $\left(\Delta U_j / L_j\right) \sum_j L_j = N\delta U = \Delta U$, где δU – разделительная мощность одного устройства. Получается, что в несмешивающем каскаде μ = 1, независимо от вида $V(C)$.

Аналогично для η: $\Delta U_j = \left(\sum_i G^{(i)} V\left(C^{(i)}\right) - G^{(0)} V\left(C^{(0)}\right)\right)_j$, $\sum_j \Delta U_j = \sum_j \left(\sum_i G^{(i)} V(C^{(i)}) - G^{(0)} V(C^{(0)})\right)$. Все потоки $G_j^{(i)}$ из этой формулы можно разбить на две группы: а) потоки, втекающие и вытекающие в/из каскада (питание и отборы каскада); б) внутренние потоки каскада.

Тогда $\sum_j \Delta U_j = \left[\sum_k G^{(k)} V(C^{(k)})\right] + \left[\sum_n G^{(n)} V(C^{(n)})\right]$, здесь первая сумма – внешние потоки каскада, вторая сумма – внутренние потоки каскада и для потоков питания $G^{(0)}$ знак минус “учтен” в величине потока. Внутренние потоки каскада, так или иначе, соединяются между собой в узлах. Для внутренних потоков $\sum_n G^{(n)} V(C^{(n)}) = \sum_s \left(\sum_m G^{(m)} V(C^{(m)})\right)_s$, здесь s – номер внутреннего узла, ${G^{(m)}}_s$ – потоки, втекающие и вытекающие в/из этого узла. В каждом узле масса втекающего газа в точности равна массе вытекающего, т.е. сумма $\sum_m G^{(m)} = 0$. Поскольку каскад несмешивающий, то все концентрации $C^{(m)}{}_s$ для узла s – одинаковые, следовательно, $V(C^{(m)})_s$ – одинаковая. Таким образом,

$$\sum_m G^{(m)} V\left(C^{(m)}\right) = 0$$

и

$$\sum_j \Delta U_j = \left[\sum_k G^{(k)} V(C^{(k)})\right] + \\ + \left[\sum_n G^{(n)} V(C^{(n)})\right] = \sum_k G^{(k)} V(C^{(k)}).$$

Тогда $\sum_j \Delta U_j = \Delta U$ и $\eta = 1$. Иными словами, независимо от вида $V(C)$, η равен единице для несмешивающего каскада.

Следовательно, невозможно по критериям η и μ делать какие-либо выводы о “правильности” или “неправильности” того или иного выражения для потенциала.

Оценка потенциала разделения с помощью расчета каскада возможна только для несмешивающего каскада и должна производиться сравнением отношения суммарных потоков внутри каскада при нескольких разных программах разделения с отношением работы разделения для этих же программ, вычисленной по формуле (1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирована основная ошибка в подходах к вычислению разделительного потенциала для многокомпонентных смесей. Показано, что основным препятствием на пути определения разделительного потенциала многокомпонентной смеси является отсутствие определения элементарного многокомпонентного разделительного устройства и его свойств.

Большинство известных на сегодняшний день потенциалов для многокомпонентных смесей носят частный характер, вследствие попыток вывести их для центрифуги в бинарном противоточном каскаде, что принципиально не позволяет установить реальный вид потенциала.

Существование универсального разделительного потенциала для многокомпонентного случая следует из очевидного существования минимальной оценки затрат энергии на разделение такой смеси.

Отсутствие “эталонного” или “идеального” каскада несущественно. Подобно бинарному потенциалу разделения, многокомпонентный потенциал может быть получен только из свойств разделительного элемента.

Показано, что идеальное многокомпонентное разделение сводится к бинарному разделению и универсальный разделительный потенциал для многокомпонентного случая может быть получен аналитически и вполне однозначно.

Универсальный многокомпонентный разделительный потенциал позволяет

– оценивать степень оптимизации разделительных каскадов для многокомпонентных смесей;

– сравнивать затраты на производство многокомпонентных смесей, обогащенных по избранному компоненту или компонентам.

Рассмотренный в работе алгоритм получения универсального разделительного потенциала позволяет ввести понятие “частного потенциала” для конкретного типа разделительного устройства, в котором не выполняется требование независимости коэффициента разделения от концентрации, например, для центрифуги.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C	безразмерные концентрации всех компонентов смеси
$C^{(0)}$	безразмерные концентрации компонентов в исходной смеси
$C^{(i)}$	безразмерные концентрации компонентов в отборе i
$C_1, C_2, \ldots C_n$	безразмерная концентрация 1, 2... n компонента смеси
$C_i^{(-i)}$	безразмерная средняя концентрация i-го компонента во всех отборах разделительного элемента, кроме i-го
$G^{(0)}$	поток питания или масса разделяемой смеси, соответственно кг/с или кг
$G^{(i)}$	потоки отбора или массы отбора, соответственно кг/с или кг
k	постоянная Больцмана, Дж/К
L	поток питания каскада, кг/с
l	поток питания разделительного элемента, кг/с
N	число разделительных элементов в идеальном каскаде
n	количество компонентов смеси
q	коэффициент разделения
$q^{(i)}$	коэффициент разделения для i-го отбора
R	относительная концентрация
$R_i^{(i)}$	относительная концентрация i-го компонента в i-м отборе
$R_i^{(-i)}$	относительная средняя концентрация i-го компонента во всех отборах разделительного элемента, кроме i-го
T	температура, К

δU	разделительная мощность одного разделительного элемента, (кг ЕРР)/с
ΔU	разделительная мощность или работа разделения, соответственно (кг ЕРР)/с или кг ЕРР
ΔU_j	разделительная мощность j-го элемента каскада, (кг ЕРР)/с
$V(C)$	разделительный потенциал или функция ценности смеси, ЕРР
η	коэффициент полезного действия каскада
$\theta^{(i)}$	коэффициент деления потока для i-го отбора разделительного элемента или каскада
μ	коэффициент использования разделительной мощности каскада

ИНДЕКСЫ

(0)	значение величины для питания разделительного элемента
(i)	значение величины для i-го отбора разделительного элемента
($-i$)	значение величины для всех отборов, кроме i-го отбора разделительного элемента
i, j, k, m, s	номер элемента в каскаде или номер компонента смеси

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Палкин В.А., Игошин И.С.* Применимость потенциалов разделения для определения параметров эффективности каскада при обогащении трехкомпонентной смеси // Инж.-физ. ж. 2017. Т. 90. № 1. С. 3.
2. *Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Смирнов А.Ю.* Разделительный потенциал для многокомпонентных смесей: состояние проблемы // Инж.-физ. ж. 2017. Т. 90. № 2. С. 271.
3. *Cohen K.* The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of ^{235}U. New York: McGraw-Hill, 1951.
4. Обогащение урана / Под ред. Виллани С. М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. *Сазыкин А.А.* Термодинамический подход к разделению изотопов // Изотопы: свойства, получение применение / Под ред. Баранова В.Ю. М.: ИздАТ, 2000. С. 72.
6. *Палкин В. А., Гадельшин В. М., Александров О.Е., Селезнев В.Д.* Многокомпонентный разделительный потенциал. Обобщение теории Дирака // Инж.-физ. ж. 2014. Т. 87. № 3. С. 501.
7. *Александров О.Е.* Молекулярно-кинетические основы разделительного потенциала // Ат. энерг. 2003. Т. 94. № 6. С. 411.
8. *Александров О.Е., Гадельшин В.М.* Многокомпонентный разделительный потенциал. Элементарная кинетическая теория // Инж.-физ. ж. 2013. Т. 86. № 5. С. 1140.
9. *Aleksandrov O.E., Gadelshin V.M.* Theory of multicomponent separation potential // Curr. Chromatogr. 2015. V. 2. P. 72.
10. *Александров О.Е., Гадельшин В.М., Шульгин Б.В.* Разработка квазиидеального каскада разделительных элементов с тремя отборами // Перспект. матер. 2013. № 14. С. 65.
11. *Александров О.Е., Гадельшин В.М., Селезнёв В.Д.* Анализ перспективных каскадных схем соединения четырехпоточных элементов с тремя отборами // Альтерн. энерг. экол. 2015. № 23(187). С. 26.