УДК 539.1.074.88

Маркина М. А. , Александров О. Е.
masha.markina12@gmail.com

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СХЕМЫ ИДЕАЛЬНОГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА ДЛЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

Аннотация. В работе рассмотрена схема каскада для разделения трехкомпонентной смеси изотопов. Предложено описание этой схемы, по аналогии с бинарными разделительными каскадами. В предложенном каскаде, возможно осуществить разделение без смешения по изотопам. Следовательно, это идеальный каскад. Получены уравнения для изменения концентраций изотопов внутри каскада. Получено, в случае слабого обогащения, дифференциальные уравнения для концентраций в трехкомпонентном каскаде. Получено оптимальное распределение потоков. Результаты работы могут быть использованы для практического проектирования разделительных каскадов.

Ключевые слова: идеальный каскад; трехкомпонентный каскад; оптимальное распределение потоков.

Abstract. The report describes the development of an ideal cascade scheme for a three-component mixture. A symmetric countercurrent scheme is considered. The possibility of immiscible separation of a three-component mixture in it is justified. The main characteristics of the cascade are calculated: the distribution of flows and concentrations, similar to the theory of an ideal binary cascade. The results of the work can be used for the practical design of separation cascades.

Keywords: ideal cascade; three-component cascade; optimal flow distribution.

Введение

Изотопами называются разновидности атомов какого-либо химического элемента, которые имеют одинаковый атомный (порядковый) номер, но при этом разную массу. Они обладают почти одними и теми же химическими свойствами, но разными физическими свойствами.

Разделение изотопов – это технологический процесс изменения изотопного состава вещества. Из исходной смеси изотопов в результате разделения на выходе процесса получают две части. Одна с повышенным содержанием требуемого изотопа (обогащенная смесь), другая с пониженным (обедненная смесь).

Изотопы различных элементов широко применяются в современных технологиях. Получение веществ с обогащением по нужному изотопу насущная практическая задача.

Разделение производят на специальных устройствах, такое устройство называют разделительной ячейкой или разделительным элементом.

Так как различия в свойствах изотопов настолько малы, за одну стадию разделения вещество обогащается на доли процента целевым изотопом, поэтому приходится повторять процесс разделения многократно. Технологически это осуществляется последовательным пропуском разделяемой смеси изотопов через однотипные ячейки. Совокупность разделительных ячеек называется каскадом.

Теория каскадов для разделения многокомпонентных смесей развита недостаточно, в основном исследования сосредоточены на численной оптимизации каскадов. Развитие аналитической теории многокомпонентных каскадов актуально и имеет важное практическое значение

Для поиска оптимального практического решения была разработана концепция идеального каскада – это схема соединения разделительных элементов, в которой выполняется условие несмешения потоков, т.е. в каждой точке такого каскада отсутствует смешение потоков с отличающимися концентрациями компонентов смеси, а значит, отсутствуют и потери работы разделения.

Существует несколько методов разделения изотопов, например, газовая диффузия, центробежный метод, лазерное или электромагнитное разделение и другие.

В настоящей работе развивается теория каскадов для трехкомпонентной смеси не привязываясь к какому-то конкретному методу.

Исторически разделение осуществлялось для бинарных смесей, например, для атомной или военной отрасли достаточно обогатить уран по одному из его изотопов. Однако, у большинства химических элементов изотопов более двух и современные нужды требуют разделения смесей, состоящих из трех и более изотопов.

Разделительный элемент с тремя отборами и его характеристики

Ученые изучали разделение многокомпонентных смесей в бинарных каскадах с двумя отборами. Конечно, бинарный каскад способен изменять концентрацию многокомпонентной смеси, но он не способен разделять её до произвольно заданных значений концентрации.

Суть в том, что идеальный каскад, рассматриваемый в теории разделения бинарных смесей, состоит из разделительных элементов с двумя отборами. И если мы хотим поставить задачу полного разделения бинарной смеси (т.е. выделить на каждом отборе каскада элементы только одного соответствующего ему компонента смеси) или разделения смеси до произвольных концентраций, то мы способны это осуществить в идеальном каскаде без каких-либо дополнительных стадий разделения. Нужно подчеркнуть важность этого свойства и выделить как одно из ключевых условий идеальности каскада.

Для многокомпонентной смеси в бинарном каскаде полное разделение принципиально невозможно. Все схемы разделения многокомпонентной смеси в бинарных каскадах требуют дополнительного отбора. Вследствие этого, можно утверждать, что при рассмотрении схемы идеального каскада для разделения многокомпонентных смесей важно помнить, что он должен иметь число отборов равное числу компонентов в разделяемой смеси.

Рассмотрим разделительный элемент (РЭ) с питанием и тремя отборами, т.е. поток питания смеси делится в таком элементе на три выходящих потока отбора, каждый из которых обогащён по одному из компонентов смеси относительно потока питания. Соответственно, в каждом из этих потоков отбора идёт обеднение по двум другим компонентам смеси.

В разделительном элементе поток питания G_0 с концентрациями $\left(C_{01};C_{02};C_{03}\right)$ делится на три потока отбора $G_1=\theta_1 G_0$, $G_2=\theta_2 G_0$, $G_3=\theta_3 G_0$ с соответствующими концентрациями $\left(C_{11};C_{12};C_{13}\right)$, $\left(C_{21};C_{22};C_{23}\right)$, $\left(C_{31};C_{32};C_{33}\right)$, где $\left(\theta_1;\theta_2;\theta_3\right)$ – коэффициенты деления потоков отбора в РЭ; в обозначениях первый или единственный индекс соответствует номеру потока в РЭ, второй – номеру компонента смеси.

Наравне с концентрацией C_{MN} произвольного компонента смеси N в произвольном M-ом потоке, вводим характеристику под названием «относительная концентрация»:

$$R_{MN}=\frac{C_{MN}}{1-C_{MN}}. \qquad (1)$$

Величины α_{MN} будем называть коэффициентами разделения по N-му компоненту в M-м потоке отбора, которые удобно записать в виде матрицы A_{MN}:

$$A_{MN}=\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

Эти коэффициенты определяются отношением относительных концентраций произвольного изотопа N в M-м потоке отбора и в потоке питания РЭ:

$$\alpha_{MN} = \frac{R_{MN}}{R_{0N}} = \frac{\dfrac{C_{MN}}{1-C_{MN}}}{\dfrac{C_{0N}}{1-C_{0N}}}. \qquad (3)$$

Таким образом, в матрице A_{MN} по главной диагонали стоят коэффициенты разделения по обогащаемым компонентам в одноимённом потоке отбора; все остальные элементы – коэффициенты разделения по обедняемым компонентам.

По аналогии с бинарным каскадом, несколько разделительных элементов, соединённых параллельно, образуют разделительную ступень, с целью достижения необходимой производительности. Так же как и для бинарного каскада, стоит отметить, что понятия разделительный элемент и разделительная ступень являются аналогичными. Другими словами, разделительную ступень всегда можно представить в виде единичного разделительного элемента, обеспечивающего необходимый или оптимальный поток питания.

В основе схемы соединения разделительных элементов с тремя отборами в каскад лежит использование противоточной симметричной схемы соединения ступеней в каскад. Для бинарного случая, под противотоком подразумевается течение потоков отбора по разным компонентам смеси в противоположных направлениях. Симметричность характеризуется подачей потоков отбора на ближайшую последующую или предыдущую ступень.

Для случая разделения многокомпонентной смеси на разделительном элементе с числом отборов, равным числу компонентов смеси, противоточный симметричный принцип соединения ступеней можно сформулировать следующим образом.

Совершая последовательно разделение (обогащение) по каждому из компонентов смеси, начиная с произвольной ступени и в любой последовательности, последний поток отбора должен возвращаться на эту же ступень, не используя в течение этого процесса какую-либо ступень дважды.

Для того чтобы при смешении этих потоков отсутствовали бы потери работы разделения, относительные концентрации произвольного компонента смеси в любом потоке, приходящем на любую ступень, должны быть равны друг другу.

За прошедшее время так и не было предложено единой концепции идеального каскада для случая разделения многокомпонентной смеси.

Схема соединения идеального трехкомпонентного каскада

На данный момент времени существует очень мало схем соединения разделительных элементов в каскад для трехкомпонентных смесей. Воспользуемся одной из них (рисунок 1).

Для описания каскада удобно пользоваться понятием относительной концентрации:

$$R = \frac{\mathrm{N}}{1-\mathrm{N}}. \qquad (4)$$

На рисунке 1 видно что на (0, 0) ступень придут потоки отбора со следующими относительными концентрациями:

- поток отбора по 1-му компоненту со ступени (1, -1) с концентрациями R_{11} (1, -1), R_{12} (1,-1) и R_{13} (1, -1);
- поток отбора по 2-му компоненту со ступени (0, -1) с концентрациями R_{21} (-1, 0), R_{22} (-1, 0) и R_{23} (-1, 0);
- поток отбора по 3-му компоненту со ступени (-1, 0) с концентрациями R_{31} (-1, 0), R_{32} (-1, 0) и R_{33} (-1, 0).

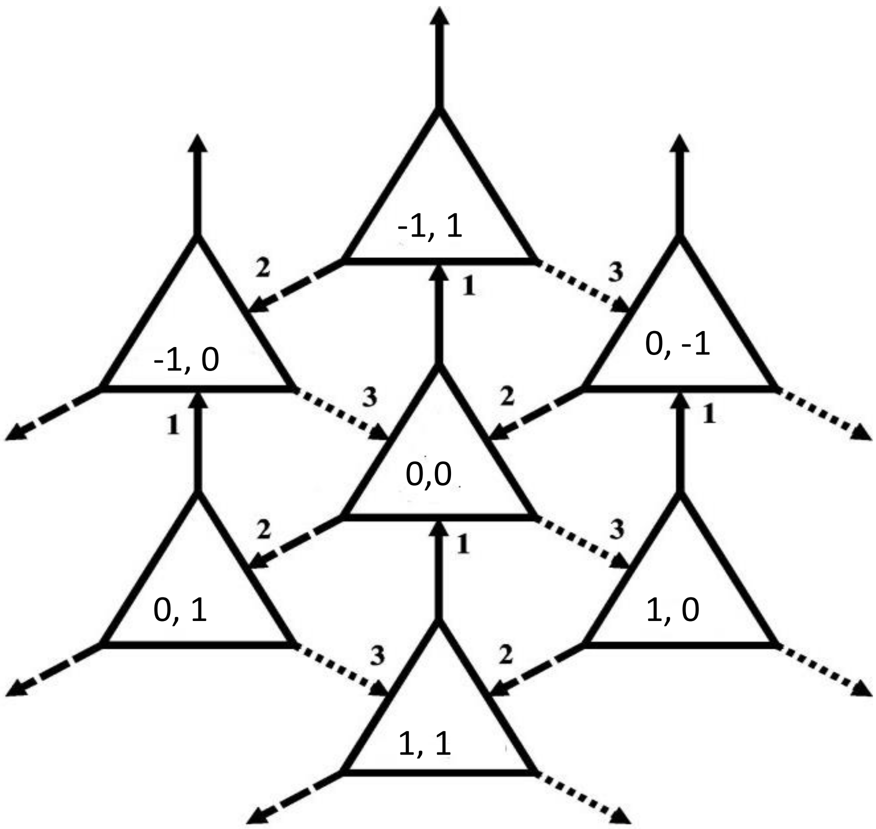


Рисунок 1 – Часть трехкомпонентного каскада

Запишем условия несмешения потоков с отличающимися концентрациями потоков в каскаде. Относительные концентрации произвольного компонента смеси в любом потоке, приходящем на (0, 0) ступень (в качестве ступени (0, 0) можно рассматривать любую ступень), должны быть равны друг другу:

$$R_{11}(1, -1)= R_{21}(0, -1)= R_{31}(-1,0)=\alpha_{11}\cdot \alpha_{21}\cdot \alpha_{31}\cdot R_{01}(0,0) = R_{01}(0,0),$$
$$R_{12}(1, -1)= R_{22}(0, -1)= R_{32}(-1, 0) =\alpha_{12}\cdot \alpha_{22}\cdot \alpha_{32}\cdot R_{02}(0,0) = R_{02}(0,0), \qquad (5)$$
$$R_{13}(1, -1)= R_{23}(0, -1)= R_{33}(-1, 0) =\alpha_{13}\cdot \alpha_{23}\cdot \alpha_{33}\cdot R_{03}(0,0) = R_{03}(0,0),$$

где $R_{0N}(0,0)$ – относительная концентрация N-го компонента в потоке питания ступени.

Собственно, выражения относительной концентрации представляют собой *условия несмешения потоков* с отличающимися концентрациями в каскаде, аналогично случаю разделения бинарной смеси. Чтобы обеспечить выполнение этих условий несмешения, необходимо, чтобы коэффициенты матрицы A_{MN} были связаны между собой следующим образом:

$$\alpha_{1N}\alpha_{2N}\alpha_{3N} = 1,\ N = \overline{1,3}. \qquad (6)$$

При расчете каскада с использованием схемы на рисунке 1, мы сталкиваемся невозможно составить дифференциальное уравнение. Так как каскад с треугольными разделительными элементами по виду напоминает трехмерный. Для упрощения задачи преобразуем схему трехкомпонентного каскада (рисунок 1) к ортогональной (рисунок 2). Каскад становится двумерным, т.е. в нем легко ввести нумерацию ступеней, но схема соединения в точности соответствует (рисунок 1).

Все треугольные элементы заменяются прямоугольными для удобства изображения. В остальном, каждый прямоугольный элемент соответствует треугольному элементу и имеет столько же потоков отбора и столько же потоков питания.

Вытекающие из разделительного элемента потоки в диагональном направлении, соответствуют третьему компоненту смеси, поскольку концентрация третьего компонента полностью определяется концентрациями двух первых компонентов, то нумерация по нему не нужна. Концентрация третьего компонента увеличивается в направлении диагональных стрелок.

Система ортогональна и по сути аналогична бинарному каскаду, следовательно, она допускает составление дифференциального уравнения для концентрации.

Введем нумерацию ступеней и обозначим поток питания и потоки отбора жирными линиями. Линией пунктира отделяем структурную ячейку каскада.

Предполагаем, что линии отбора расположены как на рисунке 2. Остальные так называемые свободные потоки считаем малыми и можем возвращать их обратно в ячейку.

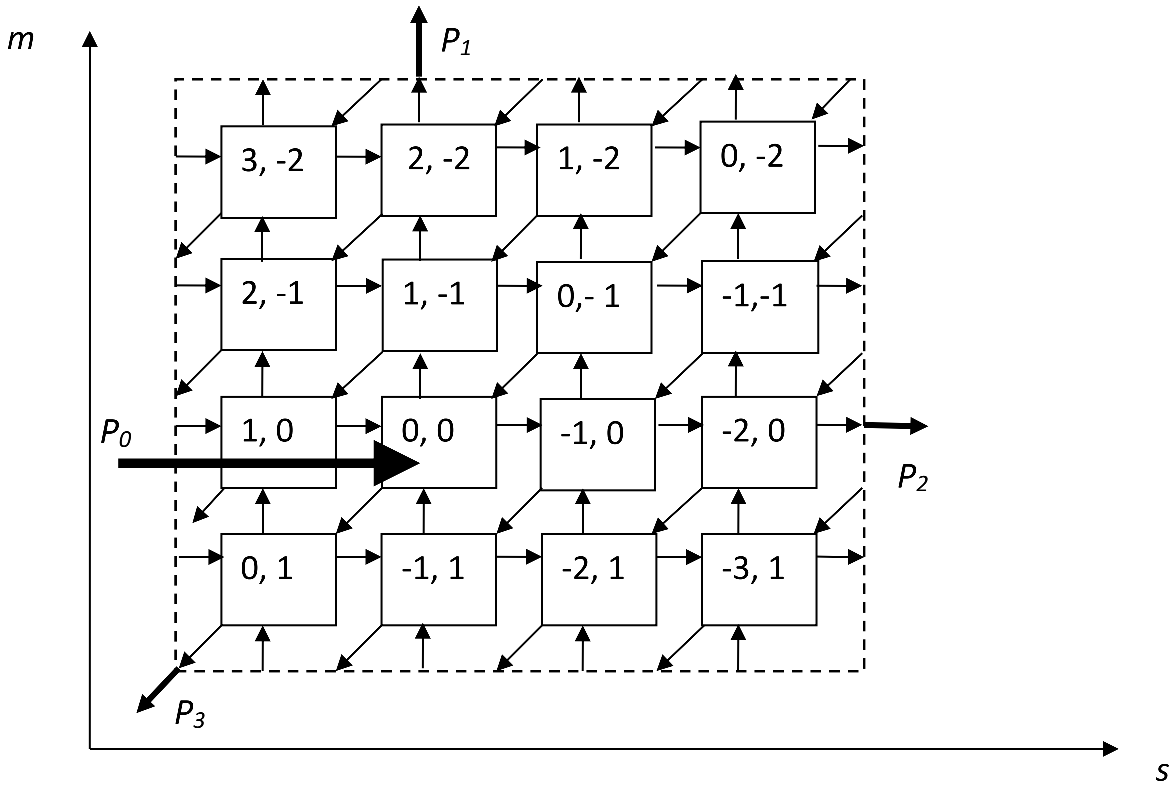


Рисунок 2- Ортогональная схема трехкомпонентного каскада
с нумерацией ступеней и внешними потоками питания и отборов

Такое предложение может быть сделано после рассмотрения профиля изменения межступенного потока в идеальном бинарном симметричном каскаде в зависимости от номера ступени.

Уравнения для симметричного трехкомпонентного каскада

Схема симметричного противоточного каскада является простейшим случаем. Каскад такого типа характеризуется тем, что на его вход подается питающая смесь P_0 с концентрациям компонентов C_{01}, C_{02}, C_{03}, которая потом разделяется на потоки отбора P_1 с концентрациями C_{11}, C_{12}, C_{13}; P_2 с концентрациями C_{21}, C_{22}, C_{23}; P_3 с концентрациями C_{31}, C_{32}, C_{33}. Такие параметры называются внешним параметрами каскада.

Внешние параметры каскада должны удовлетворять уравнениям материального баланса и баланса изотопа:

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3, \tag{7}$$

$$P_0\begin{pmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{pmatrix} = P_1\begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{pmatrix} + P_2\begin{pmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \end{pmatrix} + P_3\begin{pmatrix} C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{pmatrix}, \tag{8}$$

где P_0 – питающая смесь разделяется на потоки отбора P_1, P_2, P_3.

Внутренними параметрам называются поток питания и концентрации компонентов в питающей смеси, потоки отборов и концентрации компонентов в этих потоках, а также число ступеней в каскаде. Уравнения баланса массы и баланса изотопа выводятся для части каскада. Для того чтобы вывести такие уравнения изобразим ступень и потоки входящие в нее (рисунок 3). На схеме проведем пунктирной линией сечение и напишем материальный баланс или баланс изотопа проходящего через это сечение.

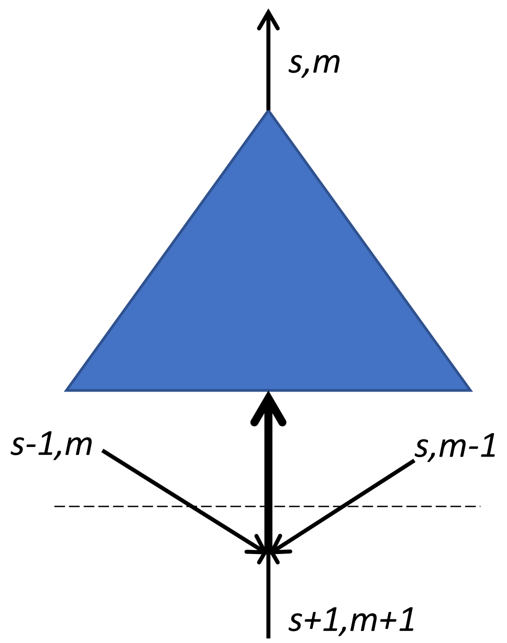


Рисунок 3 – Схема ступени и потоки входящие в нее

Для написания таких уравнений нам нужно ввести δ-функцию. Определение δ-функции:

$\delta(m)=1$, при $m=0$, $s>0$,

$\delta(s)=1$, при $s=0$, $m>1$,

$\delta(s-m)=1$, при $s=m$, $s-m>0$.

Запишем уравнения материального баланса и баланса изотопа для ступени:

$$\theta_1 L^{s,m} = \theta_2 L^{s,m-1} + \theta_3 L^{s+1,m+1} + P_1 \delta(m), \quad (9)$$
$$\theta_2 L^{s,m} = \theta_3 L^{s+1,m+1} + \theta_1 L^{s-1,m} + P_2 \delta(s), \quad (10)$$
$$\theta_3 L^{s,m} = \theta_1 L^{s-1,m} + \theta_2 L^{s,m-1} + P_3 \delta(s-m), \quad (11)$$
$$\theta_1 L^{s,m} \begin{pmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{pmatrix} = \theta_2 L^{s,m-1} \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{pmatrix} + \theta_3 L^{s+1,m+1} \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{pmatrix} + P_1 \delta(m) \begin{pmatrix} C_{p1} \\ C_{p2} \\ C_{p3} \end{pmatrix}, \quad (12)$$
$$\theta_2 L^{s,m} \begin{pmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{pmatrix} = \theta_3 L^{s+1,m+1} \begin{pmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \end{pmatrix} + \theta_1 L^{s-1,m} \begin{pmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \end{pmatrix} + P_2 \delta(s) \begin{pmatrix} C_{p1} \\ C_{p2} \\ C_{p3} \end{pmatrix}, \quad (13)$$
$$\theta_3 L^{s,m} \begin{pmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{pmatrix} = \theta_1 L^{s-1,m} \begin{pmatrix} C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{pmatrix} + \theta_2 L^{s,m-1} \begin{pmatrix} C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{pmatrix} + P_3 \delta(s-m) \begin{pmatrix} C_{p1} \\ C_{p2} \\ C_{p3} \end{pmatrix}. (14)$$

Для удобства запишем концентрации компонентов в виде:

$$\begin{pmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{pmatrix} = C_0, \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{pmatrix} = C_1, \begin{pmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \end{pmatrix} = C_2, \begin{pmatrix} C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{pmatrix} = C_3.$$

Объединяя уравнения баланса массы (9) и баланса изотопа(12) получим:

$$(\theta_2 L^{s,m-1} + \theta_3 L^{s+1,m+1} + P_1 \delta(m))\, C_0 = \theta_2 L^{s,m-1} C_1 + \theta_3 L^{s+1,m+1} C_1 = P_1 \delta(m), \quad (15)$$
$$\theta_2 L^{s,m-1} C_0 - \theta_2 L^{s,m-1} C_1 + \theta_3 L^{s+1,m+1} C_0 - \theta_3 L^{s+1,m+1} C_1 = P_1 \delta(m) C_{1\mathrm{p}} - P_1 \delta(m) C_0, \quad (16)$$
$$\theta_2 L^{s,m-1} \left(C_0^{s,m} - C_1^{s,m-1} \right) + \theta_3 L^{s+1,m+1} \left(C_0^{s,m} - C_1^{s+1,m+1} \right) = P_1 \delta(m) \left(C_{1p} - C_0^{s,m} \right). \quad (17)$$

Аналогично выводим для двух других случаях:

$$\theta_3 L^{s+1,m+1} \left(C_0^{s,m} - C_2^{s+1,m+1} \right) + \theta_1 L^{s-1,m} \left(C_0^{s,m} - C_2^{s-1,m} \right) = P_2 \delta(s) \left(C_{2p} - -C_0^{s,m} \right), \quad (18)$$
$$\theta_1 L^{s-1,m} \left(C_0^{s,m} - C_3^{s-1,m} \right) + \theta_2 L^{s,m-1} \left(C_0^{s,m} - C_3^{s,m-1} \right) = P_3 \delta(s-m) \left(C_{3p} - -C_0^{s,m} \right). \quad (19)$$

Так как мы предполагаем, что в нашем идеальном каскаде происходит несмешение, можно записать: $C_1^{s,m-1} = C_1^{s+1,m+1}$.

Тогда из уравнения (17) выразим $C_0^{s,m} - C_1^{s,m-1}$:

$$C_0^{s,m} - C_1^{s,m-1} = \frac{P_1 \delta(m) \left(C_{1p} - C_0^{s,m} \right)}{\theta_2 L^{s,m-1} + \theta_3 L^{s+1,m+1}}. \quad (20)$$

Используя уравнение (3) можно вывести уравнение для концентрации. Оно примет вид:

$$\mathrm{C} = \frac{\mathrm{C}_0\alpha}{1+(\alpha-1)\mathrm{C}_0}. \quad (21)$$

Запишем концентрацию для первого отбора ступени (s, m):

$$C_1^{s,m} = \frac{C_0^{s,m}\alpha}{1+(\alpha-1)C_0^{s,m}}. \quad (22)$$

Вычтем из выражения (23) концентрацию $C_0^{s,m}$, получим:

$$C_0^{s,m} - C_1^{s,m} = \frac{C_0^{s,m}\left(1-\alpha+(\alpha-1)C_0^{s,m}\right)}{1+(\alpha-1)C_0^{s,m}}. \quad (23)$$

Из уравнения (23) вычтем уравнение (20), заменим $\alpha = 1+\varepsilon,$ получим:

$$C_1^{s,m} - C_1^{s,m-1} = \frac{C_0^{s,m}\varepsilon\left(1-C_0^{s,m}\right)}{1+\varepsilon C_0^{s,m}} - \frac{P_1\delta(m)\left(C_{1p}-C_0^{s,m}\right)}{\theta_2 L^{s,m-1}+\theta_3 L^{s+1,m+1}}. \quad (24)$$

В случае малых коэффициентов обогащения уравнение (24) для любых значений концентраций примет вид:

$$C_1^{s,m} - C_1^{s,m-1} = C_0^{s,m}\varepsilon\left(1-C_0^{s,m}\right) - \frac{P_1\delta(m)\left(C_{1p}-C_0^{s,m}\right)}{\theta_2 L^{s,m-1}+\theta_3 L^{s+1,m+1}}. \quad (25)$$

Поскольку при переходе от ступени к ступени каскада обогащение меняется довольно плавно величины концентрации C, номера ступеней s и m можно рассматривать как непрерывные. Уравнение (25) в конечных разностях допустимо аппроксимировать дифференциальным уравнением.

$$\frac{dC_1^s}{dm} = \varepsilon C_0^s\left(1-C_0^s\right) - \frac{P_1\delta(m)\left(C_{1p}-C_0^s\right)}{\theta_2 L^s+\theta_3 L^s}. \quad (26)$$

При $P_1\delta(m) = 0$ градиент концентрации принимает максимальное значение

$$\frac{dC_1^s}{dm} = \varepsilon C_0^s\left(1-C_0^s\right). \quad (27)$$

Это соответствует безотборному режиму (без выдачи продукта).

Для того что бы работа разделения была максимальной нужно чтобы суммарный поток был минимален.

Суммарный поток вещества – это общее количество вещества, проходящее через каскад и обрабатываемое всеми ступенями, требуемое для производства необходимого количества и уровня обогащения желаемого компонента; он является показателем размера разделительного производства, необходимого для достижения заданного уровня обогащения.

Суммарный поток минимален в том случае, когда отношение $(dC_0^s/dm)/L$ максимально относительно L. Оптимальное значение потока L_{opt} в любой точке каскада как функцию концентрации можно определить из условия

$$\frac{d}{dL}\left[\frac{\varepsilon C_0^s(1-C_0^s)}{L}-\frac{P_1\delta(m)\left(C_{1p}-C_0^s\right)}{(\theta_2+\theta_3)L^{s^2}}\right]=-\frac{\varepsilon C_0^s(1-C_0^s)}{L^2}+\frac{2P_1\delta(m)\left(C_{1p}-C_0^s\right)}{(\theta_2+\theta_3)L^{s^3}}=0. \qquad (28)$$

Из уравнения можно вывести L_{opt} :

$$L_{opt}=\frac{2P_1\delta(m)\left(C_{1p}-C_0^s\right)}{(\theta_2+\theta_3)\varepsilon C_0^s\left(1-C_0^s\right)}. \qquad (29)$$

Если подставить уравнение (29) в уравнение (26) в результате получим оптимальное значение градиента концентрации

$$\left(\frac{dC_0^s}{dm}\right)_{opt}=\frac{1}{2}\varepsilon C_0^s(1-C_0^s). \qquad (30)$$

Сравнение уравнений (27) и (30) показывает, что оптимальное значение градиента концентрации равно половине максимального значения градиента, соответствующего безотборному режиму.

Можно заметить, что часть разделительных элементов имеет распределение концентрации соответствующее уравнению (27). Это такие элементы, в которых выполняется условие $P_1\delta(m)=0$. В остальных элементах распределение концентрации соответствует уравнению (30). Таким образом, каскад состоит из разделительных элементов двух типов. Чтобы концентрация изменялась одинаково, нужно в разделительных элементах второго типа создать условие $\frac{1}{2}\varepsilon$. Это не налагает существенных ограничений, поскольку очевидно, что сделать разделительный элемент с меньшим коэффициентом обогащения можно. В таком случае можно избавиться от смешения концентраций в потоках каскада и получить не смешивающий, т.е. идеальный каскад.

Что бы построить график профиля изменения межступенного потока в идеальном трехкомпонентном каскаде в зависимости от номера ступени (рисунок 4), необходимо решить уравнение (31) и подставить решение в уравнение (30).

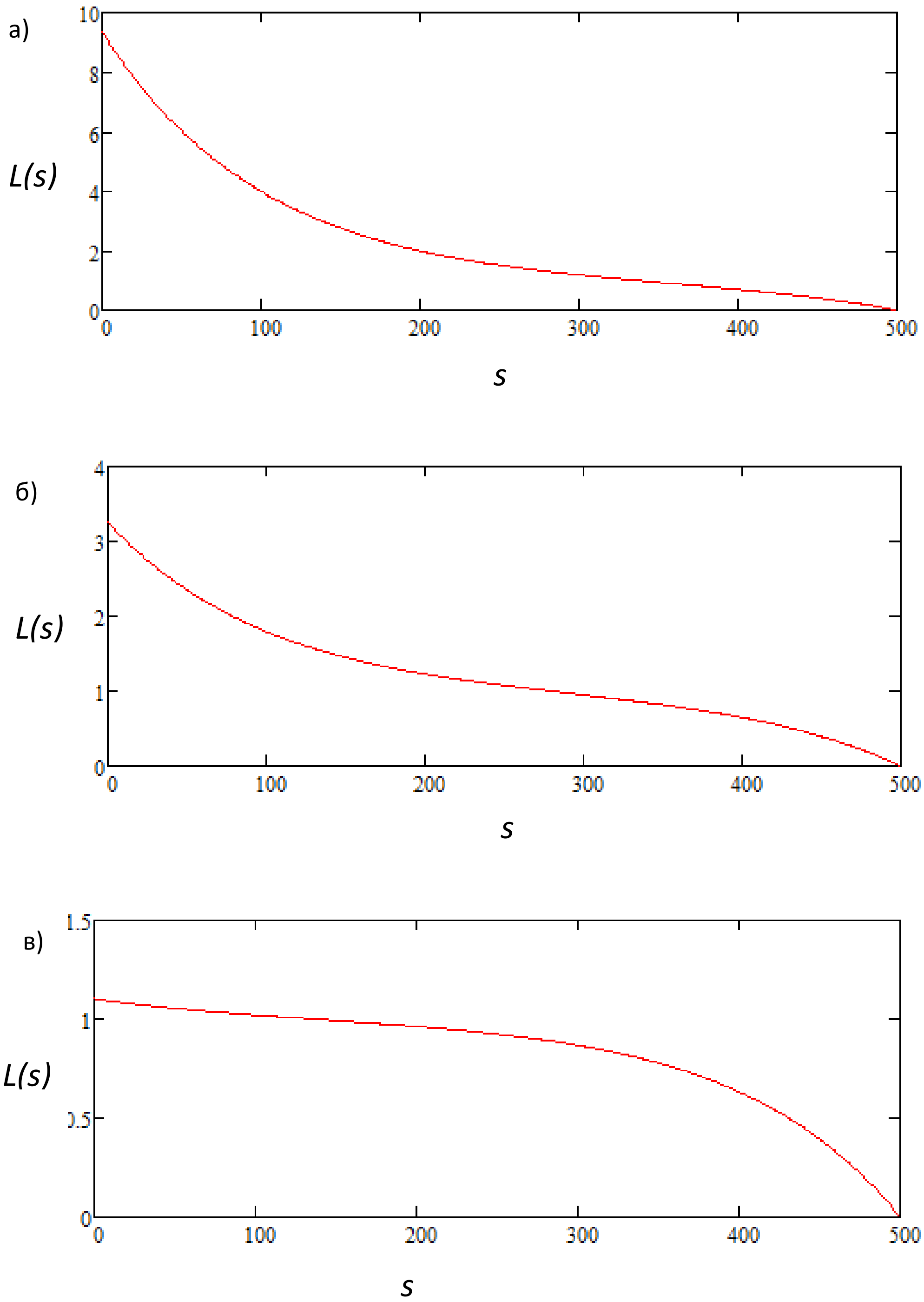
Решение уравнения (31)

$$\mathrm{C}=\frac{C_0^s}{1-C_0^s}e^{\frac{s\varepsilon}{2}}\Big/\left(\frac{C_0^p}{1-C_0^p}e^{\frac{s\varepsilon}{2}}+1\right), \qquad (31)$$

$$L(s)=\frac{C_p-C}{C(1-C)}. \qquad (32)$$

Профиль изменения межступенного потока для трехкомпонентного каскада получился аналогичным профилю изменения межступенного потока для идеального бинарного каскада.

Можно утверждать, что бинарное разделение является частным случаем многокомпонентного разделения



а) s=500, ε =0.02, C_p=0.943, C=0.1; б) s=500, ε =0.02, C_p=0.985, C=0.3;
в) s=500, ε =0.02, C_p=0.999, C=0.9

Рисунок 4 – Профиль изменения межступенного потока в идеальном трехкомпонентном каскаде в зависимости от номера ступени

Заключение

В ходе написания данной работы был рассмотрен каскад для разделения многокомпонентной смеси, позволяющий обогащать три компонента вещества.

Данная модель является теоретической, но может быть использована на практике. Такие разработки будут очень перспективны, если будут реализованы в жизни.

В работе была использована известная из литературных источников схема соединения элементов в каскад.

В предложенном каскаде, возможно осуществить разделение без смешения по изотопов. Следовательно, это идеальный каскад.

Новые результаты:

– предложена новая методика нумерации разделительных элементов каскада;
– получены разностные уравнения для изменения концентраций в трехкомпонентном каскаде и дифференциальные уравнения изменения концентрации для случая малого обогащения;
– решены полученные дифференциальные уравнения и получено распределение потоков для идеального (несмешивающего) каскада.

Библиографический список

1. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of U-235 / K. Cohen ; Ed. G. M. Murphy. – New York : McGraw-Hill Book Company, 1951. – 183 p.
2. Wolfsberg M. Isotope Effects: in the chemical, geological and bio sciences / W. A.van Hook, P. Paneth with contributions from L. P. N. Rebelo. – Netherlands : Springer Science : Business Media B. V., 2009. – 466 p.
3. Виллани С. Обогащение урана / С. Виллани ; пер. с англ. под ред. И. К. Кикоина. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. Гадельшин В. М. Структурные особенности квазиидеальных каскадов разделительных элементов с тремя отборами / В. М. Гадельшин, В. Д. Селезнёв, О. Е. Александров // Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли : сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. (15–19 окт. 2012 г.). – Новоуральск : Форт-Диалог, 2012. – С. 157–159.
5. Herbst R. S. No-Mix and Ideal Separation Cascades / R. S. Herbst, F. P. McCandless // Separation Science and Technology. – 1999. – Vol. 34, Is. 3. – P. 343-357.