

*На правах рукописи*

**СМИРНОВ АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ**

**МОЛЕКУЛЯРНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ МАССОПЕРЕНОС  
КОМПОНЕНТОВ В ОРДИНАРНЫХ И МНОГОПОТОЧНЫХ  
КАСКАДАХ КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ  
РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ИЗОТОПНЫХ  
СМЕСЕЙ В ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ**

**Специальность 01.04.14 – Теплофизика  
и теоретическая теплотехника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Автор:**



**Москва 2013**

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете  
«МИФИ»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Сулаберидзе Г.А., НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Потанин Е.П., в.н.с.,  
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

кандидат технических наук,  
советник по научной работе Скорынин Г.М.,  
ОАО «ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск

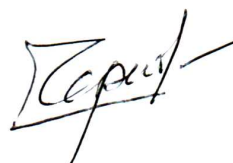
Ведущая организация: ЗАО «Центротех-СПб»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «27» ноября 2013 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 при НИЯУ МИФИ по адресу:  
115409, Москва, Каширское ш., 31, тел.(499)3248498

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.  
Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. ф.-м.н., профессор



Чернов И.И.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Все возрастающие потребности в получении разнообразных изотопомодифицированных материалов, широко применяемых в ядерной энергетике, медицине, фундаментальных исследованиях, биологии, геологии, промышленности и других приложениях, обуславливают интерес к теоретическим и практическим разработкам в области оптимизации процессов разделения, основанных на использовании существующих методов, а также разработке принципиально новых методов разделения.

В последние десятилетия интерес исследователей прикован к вопросам разделения многокомпонентных изотопных смесей в каскадах. Особую роль при проектировании и оптимизации каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей играют так называемые модельные каскады, поскольку они представляют собой удобный инструмент для исследования закономерностей молекулярно-селективного массопереноса в каскадах и получению оценок их оптимальных параметров не прибегая к трудоемким расчетным процедурам. В теории разделения многокомпонентных изотопных смесей используют два типа модельных каскада: для случая малых обогащений на ступенях (случай «слабого обогащения») –  $Q$ -каскад, и «квазиидеальный» каскад – для немалых коэффициентов разделения ступени.

Вместе с тем, в теории модельных каскадов для разделения многокомпонентных смесей остаются как неисследованные проблемы теоретического характера, так и вопросы, представляющие интерес для практики. К теоретическим проблемам относятся, например, остающийся открытым в теории  $Q$ -каскадов вопрос: какие физические условия (требования) определяют физико-математическую модель  $Q$ -каскада?

Среди практически значимых проблем теории каскадов для разделения многокомпонентных смесей можно выделить проблему получения высококонцентрированных промежуточных (по массовому числу) изотопов в одиночном разделительном каскаде. Решение подобной задачи является актуальным на фоне растущих потребностей в стабильных изотопах как для ядерной энергетике, например, для получения материалов с заданными физико-химическими свойствами, так и для других приложений. При этом значительное количество требуемых изотопов приходится именно на изотопы промежуточных массовых чисел.

Помимо этого, задачи моделирования молекулярно-селективного массопереноса в каскадах для разделения многокомпонентных изотопных смесей на основе теории модельных каскадов могут являться составной частью комплексных междисциплинарных исследований. Например, в контексте рассмотрения проблемы вовлечения выделенного из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) регенерированного урана в топливный цикл легководных реакторов, перед разделительной наукой возникает ряд нерешенных задач, например, таких, как поиск оптимального каскада для дообогащения регенерированного урана. Отдельного изучения требует влияние процессов разложения гексафторида регенерированного урана в разделительном каскаде под действием внутренних источников излучения, в результате чего в каскаде образуются но-

вые газовые компоненты. Учитывая принятые в атомной отрасли РФ стратегические решения на переход к замыканию топливного цикла легководных реакторов, решение перечисленных задач представляется актуальным для современной разделительной науки.

### **Цель работы**

Целью настоящей работы явилась разработка физико-математических моделей молекулярно-селективного массопереноса многокомпонентных смесей в каскадах для разделения изотопов, методик расчета их параметров и решение на их основе актуальных задач современной теории разделения многокомпонентных изотопных смесей. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

- Проанализирована модель молекулярно-селективного массопереноса в  $Q$ -каскадах и дана физическая интерпретация параметров, определяющих данную модель.
- Дано физическое обоснование принципов построения одиночных каскадов, имеющих разрыв потока («расширение» потока) на внутренних ступенях для выделения промежуточных компонентов. Разработаны модель и методика расчета параметров каскада с «расширением» потока. Выполнено сравнение эффективности разработанной схемы с ранее предложенными. Выявлены физические закономерности массопереноса промежуточных компонентов по длине каскада с «расширением» в зависимости от его ключевых параметров (величин внешних потоков, длин секций и т.д.). Продемонстрированы возможности практической реализации каскадов с «расширением» потока.
- Определены физические закономерности изменения изотопного состава регенерированного урана и параметров каскада для его дообогащения при многократном рецикле данного материала в топливе реакторов типа ВВЭР.
- Разработана физико-математическая модель молекулярно-селективного массопереноса в каскаде для разделения многокомпонентных изотопных смесей при одновременном учете влияния потерь рабочего вещества и образования примесей на ступенях каскада на массоперенос компонентов разделяемой смеси по его длине. Разработаны методика и алгоритм оценки параметров входящих и выходящих потоков «квазиидеального» каскада при учете указанных факторов. На примере дообогащения смеси регенерированного урана выявлены основные физические закономерности изменения внешних параметров такого «квазиидеального» каскада при различных величинах коэффициентов потерь.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- Выявлен физический смысл параметров, определяющих физико-математическую модель  $Q$ -каскада.
- Разработаны физические принципы построения одиночных разделительных каскадов, имеющих «скачок» (или «расширение») потока на внутренних ступенях, для

получения концентраций промежуточных компонентов, превышающих предельно достижимые концентрации данных компонентов в отборе ординарного каскада. Разработана физико-математическая модель, методика и алгоритм расчета параметров каскадной схемы с «расширением» потока.

- На основе анализа результатов серий численных экспериментов проведено сравнение эффективности каскадной схемы с «расширением» с другими ранее предложенными способами для решения проблемы получения высоких концентраций промежуточных компонентов.
- Обоснована возможность практического применения каскадов с «расширением» потока для выделения промежуточных компонентов из многокомпонентных изотопных смесей.
- Разработаны физико-математическая модель и методика расчета параметров «квазиидеального» каскада при учете потерь разделяемого вещества и образования примесного компонента на его ступенях. Выявлен характер влияния потерь рабочего вещества и образования примесей на ступенях каскада на физические закономерности молекулярно-селективного массопереноса компонентов по каскаду.

#### **Научная и практическая значимость работы**

- Проведенный анализ физико-математической модели  $Q$ -каскада выявил физический смысл определяющих данную каскадную модель параметров и позволяет определить ее место в ряду модельных каскадов, используемых в теории разделения многокомпонентных смесей.
- Анализ результатов расчетного моделирования молекулярно-селективного массопереноса в каскадах с «расширением» потока позволяет сделать вывод о возможности реализации подобных схем на практике и их использовании в качестве одного из способов получения высококонцентрированных промежуточных (по массовому числу) компонентов разделяемых многокомпонентных смесей стабильных изотопов.
- Анализ результатов исследования физических закономерностей изменения изотопного состава регенерированного урана при его многократном рецикле в топливном цикле легководных реакторов выявил, в том числе, и ряд закономерностей изменения параметров входящих и выходящих потоков каскада с двумя питаниями, который является оптимальным для дообогащения регенерированного урана. Полученные результаты оценки параметров входящих и выходящих потоков каскада с двумя питаниями и закономерностей их изменения при многократном рецикле регенерата урана могут быть использованы при оценке эффективности его многократного использования для производства уранового топлива реакторов типа ВВЭР.
- Предложенные физико-математическая модель и методика расчета параметров «квазиидеального» каскада при одновременном учете потерь рабочего вещества и образования примесного компонента на его ступенях дают возможность проанализировать физические закономерности изменения параметров входящих и выходящих

ших потоков в каскадах с немалыми обогащениями на ступени в зависимости от указанных выше факторов.

- Представленные в работе результаты могут быть использованы в расчетных группах на предприятиях и организациях, связанных как с проектированием и построением разделительных каскадов, так и непосредственным производством изотопной продукции (ОАО «Уральский электрохимический комбинат», Институт молекулярной физики НИЦ «Курчатовский институт», ОАО «Сибирский химический комбинат», ОАО «Восточно-Европейский головной научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий» и др.).

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- Результаты анализа физико-математической модели  $Q$ -каскада и физическая интерпретация определяющих данную модель параметров.
- Физико-математическую модель  $Q$ -каскада с «расширением» потока, обеспечивающую получение концентраций промежуточных компонентов, превышающих предельно достижимые концентрации данных компонентов в отборе ординарного каскада.
- Разработанную методику расчета параметров  $Q$ -каскада с «расширением» при заданных величинах концентраций целевого промежуточного компонента в потоках основного, дополнительного отборов и отношении величин потоков отбора друг к другу.
- Алгоритм оценки параметров  $Q$ -каскада с «расширением» при заданных величинах концентрации целевого промежуточного компонента в потоке дополнительного отбора, суммарного потока и отношении величин потоков отбора друг к другу.
- Модель и методику расчета параметров «квазиидеального» каскада при одновременном учете наличия потерь рабочего вещества и образования примесного компонента на его ступенях.
- Результаты анализа закономерностей изменения внешних параметров «квазиидеального» каскада при учете одновременного присутствия потерь рабочего вещества и образования примесей на его ступенях.

### **Достоверность результатов**

Надежность, достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертации, следует из корректности постановки задач, физической обоснованности применяемых приближений, использования в исследованиях методов, ранее примененных в аналогичных исследованиях, взаимной согласованности результатов исследования, а также из совпадения результатов численных экспериментов, полученных с помощью независимо разработанных методик как самим соискателем, так и другими исследователями.

## **Апробация работы**

Основные результаты, изложенные в диссертации, доложены и обсуждены на следующих конференциях и совещаниях: Научная сессия НИЯУ МИФИ (2012 и 2013 гг.); 24 и 25 Международная конференция по физико-химическим методам разделения смесей «Ars Separatoria» (International Symposium on Physico-chemical Methods of Mixture Separation «Ars Separatoria»), 2009 г., 2010 г., Poland; XV Международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», Звенигород, 2012 г.; Школа-конференция «Актуальные проблемы разработки и производства ядерного топлива», Звенигород, 2010 г.; Международная конференция «Global-2009», Paris, France, 2009 г.; 11 Совещание по разделительным явлениям в жидкостях и газах (11<sup>th</sup> Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases), Saint-Petersburg, Russia, 2010 г.; 1 Международная конференция по методам и материалам для разделительных процессов «Разделительная наука: теория и практика-2011» (1<sup>st</sup> International Conference on Methods and Materials for Separation Processes «Separation Science: Theory and Practice 2011»), Poland, 2011 г.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 99 источников. Общий объем работы составляет 131 страницу, содержащую 35 рисунков и 10 таблиц.

## **Основное содержание работы**

Во введении на основе обзора литературных источников обоснована актуальность разработки физико-математических моделей молекулярно-селективного массопереноса компонентов разделяемых многокомпонентных изотопных смесей в многопоточных каскадах, позволяющих решить ряд разделительных задач, в частности таких как получение высококонцентрированных промежуточных (по массовому числу) компонентов в одиночных каскадах и анализ физических закономерностей изменения изотопного состава регенерированного урана при его обогащении в разделительном каскаде для последующего производства топлива ВВЭР. Помимо этого во введении сформулирована цель, поставлены задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость выполненной работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных в работе результатов и представлены сведения об их апробации.

В первой главе даны краткие сведения из теории разделения многокомпонентных изотопных смесей в каскадах. Охарактеризовано понятие симметрично-

противоточного каскада. Приведены соотношения, связывающие внешние и внутренние параметры такой каскадной схемы. Описаны сложности, возникающие при решении в общем случае систем уравнений массопереноса в симметричной противоточной схеме. Описаны физико-математические модели ординарных «квазиидеального» каскада и  $Q$ -каскада.

Во второй главе дана физическая интерпретация параметров, определяющих модель  $Q$ -каскада. Впервые соотношения для связи внешних и внутренних параметров данной каскадной модели получены на основе подхода В.Я. Бирюкова, Р.Я. Кучерова и В.П. Миненко, заключающегося в замене переменных в системе дифференциальных уравнений, описывающих молекулярно-селективный массоперенос в каскаде для разделения многокомпонентных смесей, и переходу к интегральным уравнениям. Определяющими модель  $Q$ -каскада параметрами являются, в частности, набор констант  $Q_i$  и формально введенный параметр  $M$ , позволяющий рассчитать данные константы:

$$Q_i = \varepsilon_0 (M - M_i), \quad (1)$$

где  $M_i$  – массовое число компонента с номером  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ,  $m$  – число компонентов разделяемой смеси);  $\varepsilon_0$  – коэффициент обогащения при единичной разности массовых чисел разделяемых компонентов.

Однако до сих пор не изученным оставался вопрос о том, какой физический смысл имеют величины  $Q_i$  и  $M$ .

Как известно, в случае «слабого обогащения» массоперенос компонентов по длине каскада для разделения многокомпонентных смесей описывает система нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка, которая имеет следующий вид, например, для его отборной части:

$$\frac{dC_i}{dl} = -C_i \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} C_j + \frac{2P}{L(l)} (C_i^P - C_i), \quad (2)$$

$$0 \leq l \leq S_p, \quad i = 1, 2, \dots, m-1, \quad \sum_{j=1}^m C_j = 1,$$

где  $P$  – величина потока отбора каскада (в моль/с) с концентрацией  $i$ -го компонента  $C_i^P$ ;  $\varepsilon_{ij}$  – относительный коэффициент обогащения компонентов с номерами  $i$  и  $j$  ( $i, j = \overline{1, m}$ );  $L(l)$  и  $C_i(l)$  – полный поток вещества (в моль/с) и концентрация  $i$ -го компонента в нем для сечения каскада с координатой  $l$ ;  $S_p$  – длина отборной части каскада.

В соотношении (2) учтено, что отсчет ступеней  $l$  в обогатительной части ведут от конца каскада к ступени, на вход которой подают поток питания, а концентрации компонентов выражены в мольных долях.

Отметим, что на сегодняшний день в литературе предложен ряд методик численного расчета и оптимизации параметров каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей с использованием системы (2). Однако в рамках диссертационной работы рассмотрен способ аналитического решения данной системы, основанный на линеаризации входящих в нее уравнений. Найденное решение линеаризованной системы позволило путем более простых математических преобразований, по сравнению с подходом Бирюкова-Кучерова-Миненко, получить известные в литературе соотно-



шения, описывающие модель  $Q$ -каскада, и, одновременно, выявить физический смысл ключевых параметров данной модели, таких как константы  $Q_i$  и величина  $M$ .

Для линеаризации системы (2) достаточно, например, представить нелинейный член в виде:

$$C_i \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} C_j = Q'_i C_i, \quad (3)$$

где  $Q'_i$  – относящаяся к  $i$ -му компоненту константа, одинаковая для всех ступеней каскада ( $i = \overline{1, m}$ ). Причем, из условия аддитивности и антисимметричности относительных коэффициентов обогащения в случае «слабого обогащения» следует связь всех констант  $Q'_i$  друг с другом:

$$Q'_i - Q'_k = \varepsilon_{ik}, \quad i, k = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Для молекулярно-кинетических методов разделения выполняется соотношение (в первую очередь, для метода газовой центрифуги):

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 (M_j - M_i). \quad (5)$$

Учитывая выражение (5) можно записать:

$$Q'_i = \varepsilon_0 \left[ \sum_{j=1}^m M_j C_j - M_i \right], \quad (6)$$

Очевидно, что величина  $\overline{M} = \sum_{j=1}^m M_j C_j$  представляет собой среднее массовое число

$m$ -компонентной смеси. Таким образом, условию  $Q'_i = \text{const}$  ( $i = \overline{1, m}$ ) соответствует постоянство величины  $\overline{M}$  на всех ступенях каскада. При этом важно отметить, что условие линеаризации системы (2) выполняется с точностью до малых величин порядка  $\left[ \frac{\Delta M_{ij}}{\overline{M}} \right]^2$  ( $\Delta M_{ij} = M_i - M_j$ ). Данное условие подразумевает возможность выбора в качестве  $\overline{M}$  любого значения в диапазоне от  $M_1$  до  $M_m$ . Выбрав величину  $\overline{M}$  в указанном диапазоне, возможно определить все величины  $Q'_i$  и, соответственно, распределение потока по длине каскада. При этом в работе показано, что точность линейного приближения повышается с возрастанием величин массовых чисел компонентов разделяемой смеси.

Следует иметь в виду, что условию  $Q'_i = \text{const}$  эквивалентно условие постоянства срезов парциальных потоков  $\phi_i$  по ступеням каскада. Учитывая, что в случае «слабого обогащения» коэффициент деления потоков ступени  $\theta \cong 1/2$ , можно записать:

$$\phi_i = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} C_j \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{2} Q'_i \right]. \quad (7)$$

Линеаризованная система дифференциальных уравнений (2) записывается в виде:

$$\frac{dC_i}{dl} = -Q'_i C_i + \frac{2P}{L} (C_i^P - C_i). \quad (8)$$

Из уравнения (8) для компонента  $i$  последовательно вычтя уравнения для остальных компонентов и введя обозначение  $G_i(l) = L(l) \cdot C_i(l)$  после преобразований можно прийти к условию:

$$\frac{dG_i}{dl} + Q'_i G_i - 2PC_i^P = \text{const}, \quad \overline{i=1, m}. \quad (9)$$

Константа в правой части уравнения (9) без ограничения общности может быть приравнена нулю. В этом случае, с учетом граничного условия  $G_i(0) = 2PC_i^P$  и очевидного условия  $Q'_i \ll 1$ , решение уравнения (9) можно записать в виде:

$$G_i(l) = \frac{2PC_i^P}{Q'_i} [1 - \exp(-Q'_i l)]. \quad (10)$$

Полученное решение полностью совпадает с решением, известным для классической модели  $Q$ -каскада. Используя формулу (10), можно легко получить соотношения для расчета полного потока через ступень и распределения концентраций компонентов по длине отборной части каскада. Таким образом, показано, что введенные выше коэффициенты  $Q'_i$  тождественны константам  $Q_i$  в модели  $Q$ -каскада. Поясним физический смысл данных величин.

Введем величины  $\delta_i$ ,  $\delta'_i$  и  $\delta''_i$ , определяющие, соответственно, полное приращение концентрации  $i$ -го компонента на ступени, и приращения его концентраций в потоках обогащенной и обедненной фракций:

$$\delta_i = C_i \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} C_j, \quad \delta'_i = C_i \sum_{j=1}^m \varepsilon'_{ij} C_j, \quad \delta''_i = C_i \sum_{j=1}^m \varepsilon''_{ij} C_j, \quad (11)$$

где  $\varepsilon'_{ij}$  – относительный коэффициент обогащения компонентов с номерами  $i$  и  $j$  в потоке обогащенной фракции ( $i, j = \overline{1, m}$ );  $\varepsilon''_{ij}$  – относительный коэффициент обогащения компонентов с номерами  $i$  и  $j$  в потоке обедненной фракции ( $i, j = \overline{1, m}$ ).

Используя соотношения (11) нетрудно показать, что:

$$\frac{\delta'_i}{C_i} = \frac{1}{2} \frac{\delta_i}{C_i} = \frac{1}{2} Q_i, \quad (12)$$

$$\frac{\delta''_i}{C_i} = \frac{1}{2} \frac{\delta_i}{C_i} = \frac{1}{2} Q_i. \quad (13)$$

Знак константы  $Q_i$ , в соответствии с соотношением (3), определяет направление обогащения  $i$ -го компонента. При этом, исходя из выражения (6), следует, что направление массопереноса компонентов по длине каскада фактически определяет величина  $\overline{M}$ .

Таким образом, показано, что константа  $Q_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) представляет собой относительное изменение концентрации  $i$ -го изотопа на ступени, которое является постоянным для каждой ступени. Величина  $M$  фактически представляет собой среднее массовое число компонентов разделяемой изотопной смеси и это условие выполняется тем точнее, чем больше массовые числа компонентов разделяемой смеси.

Условие (7) позволяет отнести  $Q$ -каскады к семейству «квазиидеальных» каскадов (каскадов с постоянными срезами парциальных потоков), что в совокупности с показанной ранее эквивалентностью соотношений для связи внешних и внутренних параметров обеих моделей, с уточнением лишь выбора параметров, позволяет сделать вывод о том, что для изучения закономерностей массопереноса в каскадах для разделения многокомпонентных смесей и для оценок внешних параметров таких схем возможно равноценное использование обеих моделей. Выбор же модели зависит, в основном, от удобства ее использования при решении конкретной задачи. Например, при моделировании массопереноса в каскадах из газовых центрифуг формально удобнее пользоваться дискретной моделью «квазиидеального» каскада.

Теория модельных каскадов и, в частности,  $Q$ -каскадов, применима для предварительного решения актуальных задач современной разделительной науки. Одной из таких задач, решение которых необходимо, например, для ядерной энергетики, медицины и других приложений, является получение высококонцентрированных промежуточных (по массовому числу) изотопов в одиночных разделительных каскадах. Решение данной задачи затруднено тем, что для любого промежуточного компонента всегда существует хотя бы по одному более легкому и более тяжелому компоненту, которые активнее обогащаются в направлениях от точки подачи питания к соответствующим концам каскада. Поэтому концентрации промежуточного компонента на любом из концов каскада всегда ограничены некоторыми предельными величинами.

Предложенные к настоящему моменту схемы основаны либо на обогащении исходной смеси целевым промежуточным компонентом за несколько этапов (например, в двойных каскадах), либо на свойстве «длинных» каскадов, в которых промежуточные компоненты имеют максимум распределения концентрации на внутренних ступенях. Во втором случае включение дополнительного потока отбора в области максимума обеспечивает получение продукта с содержанием данного компонента выше, чем в выходящих потоках на концах каскада. Двойные каскады, очевидно, являются более сложными в плане технологической реализации, чем одиночные. В случае применения одиночного каскада с дополнительным отбором, зачастую концентрация промежуточного компонента в указанном потоке оказывается недостаточной для конкретного приложения, в результате все равно требуется дообогащение полученной смеси целевым компонентом.

В связи с этим, практический и теоретический интерес представляет разработка каскадной схемы, позволяющей получать требуемые концентрации промежуточных компонентов в одиночных разделительных каскадах в рамках одной разделительной кампании.

Предложен подход для получения изотопного продукта с повышенным содержанием (относительно предельно достижимой концентрации в отборе ординарного каскада) целевого промежуточного компонента в одиночном каскаде за счет организации «расширения» потока (или его скачкообразного роста) в одном из промежуточных сечений обогатительной части каскада.

В рамках модели  $Q$ -каскада суть работы предложенной схемы описана ниже. Рассмотрим четырехпоточный  $Q$ -каскад: на его вход подают поток питания  $F$  с концентрациями компонентов  $C_i^F$ , а отбирают три потока: концевой отбор  $P$  с концентрациями компонентов  $C_i^P$ , дополнительный отбор  $E$  с концентрациями  $C_i^E$  из промежуточного сечения и отвал  $W$  с концентрациями  $C_i^W$  (рис. 1). Фактически схема на рис. 1 представляет собой качественный вид функции распределения потока питания ступеней  $Q$ -каскада с «расширением». Каскад состоит из обогатительной части длиной  $S_P$  и обеднительной части длиной  $S_W$ , длина участка каскада между основным и дополнительным отборами равна  $S_E$ .

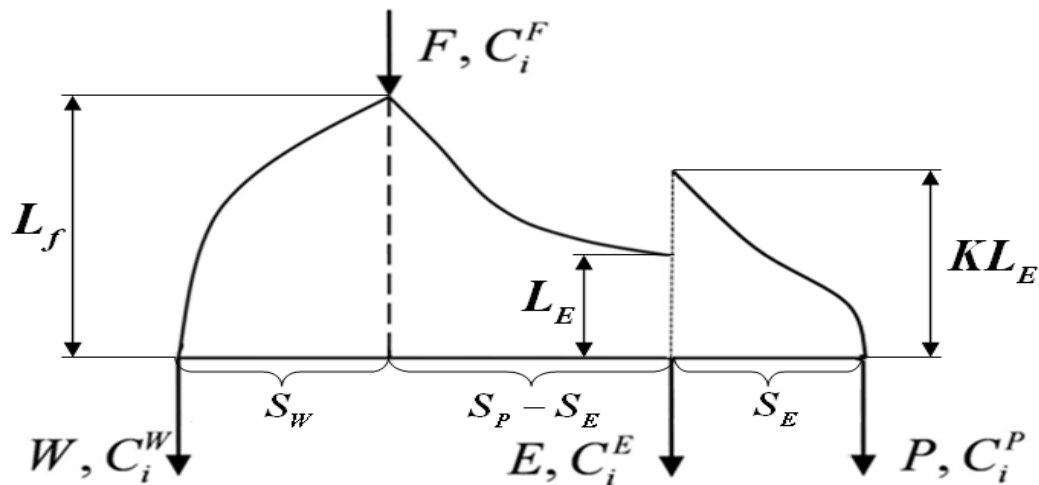


Рис. 1. Принципиальная схема  $Q$ -каскада с «расширением» потока

Пусть на участках каскада между потоками отвала и дополнительного отбора параметр  $M$  имеет значение  $M^I$ , а в конечной секции  $M$  принимает значение  $M^{II}$ . Причем,  $M_n < M^I$  и  $M_n > M^{II}$  ( $n$  – номер целевого компонента). В этом случае можно предположить, что в каскаде возникнет «запирание» (локализация)  $n$ -го компонента на внутренних ступенях, что приведет к увеличению его концентрации в области максимума по сравнению с «длинным»  $Q$ -каскадом, в котором величина параметра  $M$  не меняется по его длине. С физической точки зрения подобный характер задания величины  $M$  по каскаду обуславливает «разрыв» материального потока в сечении, отделяющем секции с различными величинами  $M$ , а также рост градиента потока в крайней секции каскада. Возникновение описанных выше особенностей в распределении потока по длине каскада обуславливает увеличение градиента концентрации целевого компонента вблизи границы двух секций обогатительной части каскада. Включение дополнительного отбора в этой области обеспечит получение изотопной смеси с концентрацией целевого промежуточного компонента, превышающей предельно достижимые концентрации данного компонента в концевых потоках каскада.

Для рассматриваемого  $Q$ -каскада с «расширением» получены соотношения для связи его внешних и внутренних параметров:

$$C_j^P = \frac{F}{P} \cdot \frac{C_j^F \cdot \frac{e^{Q_j^I S_W} - 1}{Q_j^I}}{\left[ \frac{1 - e^{-Q_j^H S_E}}{K \cdot Q_j^H \cdot e^{Q_j^I (S_P - S_E)}} + \frac{1 - e^{-Q_j^I (S_P - S_E)}}{Q_j^I} + \frac{e^{Q_j^I S_W} - 1}{Q_j^I} \right] + \frac{E}{P} \frac{C_j^E}{C_j^P} \cdot \left[ \frac{1 - e^{-Q_j^I (S_P - S_E)}}{Q_j^I} + \frac{e^{Q_j^I S_W} - 1}{Q_j^I} \right]}, \quad (14)$$

$$C_j^W = \frac{F}{W} \cdot \frac{C_j^F \cdot \left\{ \left[ \frac{1 - e^{-Q_j^H S_E}}{K \cdot Q_j^H \cdot e^{Q_j^I (S_P - S_E)}} + \frac{1 - e^{-Q_j^I (S_P - S_E)}}{Q_j^I} \right] + \frac{E}{P} \frac{C_j^E}{C_j^P} \cdot \frac{1 - e^{-Q_j^I (S_P - S_E)}}{Q_j^I} \right\}}{\left[ \frac{1 - e^{-Q_j^H S_E}}{K \cdot Q_j^H \cdot e^{Q_j^I (S_P - S_E)}} + \frac{1 - e^{-Q_j^I (S_P - S_E)}}{Q_j^I} + \frac{e^{Q_j^I S_W} - 1}{Q_j^I} \right] + \frac{E}{P} \frac{C_j^E}{C_j^P} \cdot \left[ \frac{1 - e^{-Q_j^I (S_P - S_E)}}{Q_j^I} + \frac{e^{Q_j^I S_W} - 1}{Q_j^I} \right]}, \quad (15)$$

$$C_j^E = \frac{C_j^P \cdot \frac{1 - e^{-Q_j^H S_E}}{Q_j^H}}{\sum_{i=1}^m \left( C_i^P \cdot \frac{1 - e^{-Q_i^H S_E}}{Q_i^H} \right)}, \quad (16)$$

$$\frac{C_j^E}{C_j^P} = \frac{C_n^E}{C_n^P} \cdot \frac{Q_n^H}{Q_i^H} \cdot \frac{1 - e^{-Q_i^H S_E}}{1 - e^{-Q_n^H S_E}}, \quad (17)$$

где  $K$  – параметр, определяющий величину изменения («скачка») потока на границе участков обогатительной части;  $Q_i^I, Q_i^H$  – константы  $Q_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ), соответствующие величинам  $M^I$  и  $M^H$ .

С использованием разработанной модели  $Q$ -каскада с «расширением» потока проведен цикл численных расчетов параметров данной каскадной схемы и выполнено сравнение оцененных значений ее параметров с параметрами  $Q$ -каскада, имеющего дополнительный поток питания, и монотонно уменьшающегося распределения потока питания ступеней от точки подачи питания к концам каскада (далее –  $Q$ -каскад монотонного профиля потока). Рассмотрено две постановки разделительных задач, в которых в качестве заданных параметров выступали либо величины концентраций целевого компонента во внешних потоках, либо величина суммарного потока каскада. Во всех случаях сравнение каскадных схем проводили на примере разделения смеси изотопов вольфрама природного состава (в виде гексафторида вольфрама –  $WF_6$ ). Целевым компонентом выбран  $^{183}W$  ( $n = 3$ ).

Рассмотрим задачу 1-го типа. Предполагали, что для обеих схем длина отвальной части была одинаковой, и ее величина, выраженная в относительных единицах, составляла  $\epsilon_0 S_W = 5,94$ . Для каждой из схем, на основе предварительных расчетов, были заданы следующие параметры.

Каскад монотонного профиля:  $C_n^E = 43\%$ ,  $C_n^P = 32\%$ .

Каскад с «расширением» потока:  $C_n^E = 57\%$ ,  $C_n^P = 32\%$ ,  $K = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ .

При проведении расчетов величину  $E/P$  варьировали в пределах от 0 до 1.

Сравнение величин внешних параметров обеих каскадных схем, обеспечивающих получение заданных концентраций  $C_n^E$ ,  $C_n^P$  в соответствующих потоках, подтвердило преимущество каскада с «расширением» в величине концентрации целевого компонента в потоке дополнительного отбора. Однако при заданной концентрации целевого компонента в конечном отборе каскада (например, 32,0%) количество продукта, нарабатываемого в дополнительном отборе каскада с «расширением», в  $\sim 1,5-2$  и более раз меньше, чем в соответствующем потоке  $Q$ -каскада монотонного профиля, при равном значении величины  $P/F$ .

На рис. 2 и 3 представлены зависимости величин приведенного суммарного потока от величины  $E/P$  для  $Q$ -каскада с «расширением» и  $Q$ -каскада монотонного профиля потока.

Из анализа полученных кривых следует, что для обеих каскадных схем параметр  $E/P$  (при заданных  $C_n^E$ ,  $C_n^P$ ) имеет узкую область допустимых значений. С физической точки зрения границы области изменения  $E/P$  могут быть объяснены следующим образом: при увеличении  $E/P$  все большее количество смеси, обогащенной целевым компонентом, отбирается из каскада в промежуточном сечении, что приводит к возрастанию суммарного потока в каскаде и увеличению длины обогатительной секции с тем, чтобы на конце каскада было возможно получение заданной концентрации  $C_n^P$ . Однако при достижении величиной  $E/P$  некоего критического значения извлечение целевого компонента в промежуточном отборе становится настолько существенным, что делает невозможным получение заданной концентрации  $C_n^P$  в отборе на конце каскада.

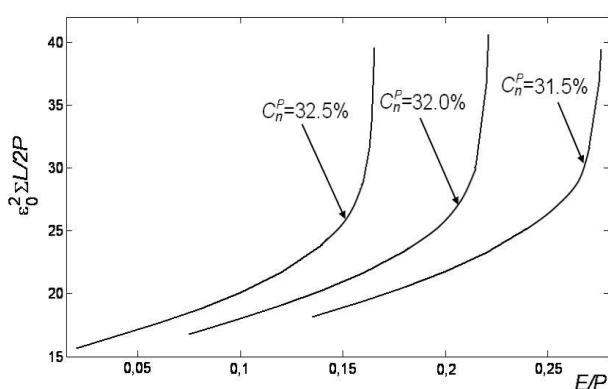


Рис. 2. Зависимость приведенного суммарного потока  $\epsilon_0^2 \sum L/2P$  в  $Q$ -каскаде монотонного профиля потока от величины  $E/P$  при различных концентрациях целевого компонента в потоке конечного отбора ( $C_n^E = 43\%$ ,  $n = 3$ )

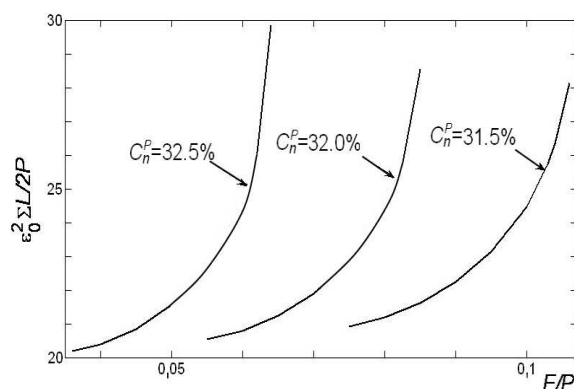


Рис. 3. Зависимость приведенного суммарного потока  $\epsilon_0^2 \sum L/2P$  в  $Q$ -каскаде с «расширением» от величины  $E/P$  при различных концентрациях целевого компонента в потоке конечного отбора ( $C_n^E = 57\%$ ,  $K = 1,5$ ,  $n = 3$ )

Наличие нижней границы у величины  $E/P$  обусловлено обратным процессом. Данные выводы подтверждают дополнительные численные исследования, проведенные для других значений концентрации  $C_n^P$ . Показано, что относительно малое изменение  $C_n^P$  (на 0,5% абс.) в обеих каскадных схемах приводит к смещению рассматриваемых кривых в сторону больших или меньших значений  $E/P$  при уменьшении и увеличении концентрации целевого компонента в отборе на конце каскада, соответственно (см. рис. 2 и 3).

Отдельно рассмотрена задача, когда заданной величиной являлся суммарный поток каскада. Концентрация целевого компонента в потоке дополнительного отбора для обеих схем задана и составляла 44% для каскада монотонного профиля и 57% для каскада с «расширением». Кроме того заданы: длина обеднительной части (в отн. ед.)  $\epsilon_0 S_w = 5,94$ , длина обогатительной части  $\epsilon_0 S_p = 7,25$ , величина приведенного суммарного потока  $\epsilon_0^2 \sum L/2P = 21,0$ , величина  $K$  для каскада с «расширением» равна 1,5.

Распределения потока питания ступеней и концентрации целевого компонента в сравниваемых каскадных схемах представлены на рис. 4 и 5. Анализируя данные рисунки, можно заметить, что различие в характере распределения потока в сравниваемых каскадах обуславливает изменение и в распределении концентрации целевого компонента, которое также меняется: область максимума сужается, а величина самого максимума растет. Иными словами, при одинаковых величинах суммарного потока в сравниваемых каскадных схемах,  $Q$ -каскад с «расширением» обеспечивает получение концентрации целевого компонента ( $^{183}\text{W}$ ) в дополнительном отборе заметно выше, чем в соответствующем потоке  $Q$ -каскада монотонного профиля (57% против 44%). При этом количество нарабатываемого дополнительного продукта в каскаде с «расширением» в несколько раз меньше, чем в соответствующем потоке каскада монотонного профиля, а концентрации целевого компонента на концах каскада строго не равны, но остаются близкими по величине (см. рис. 5).

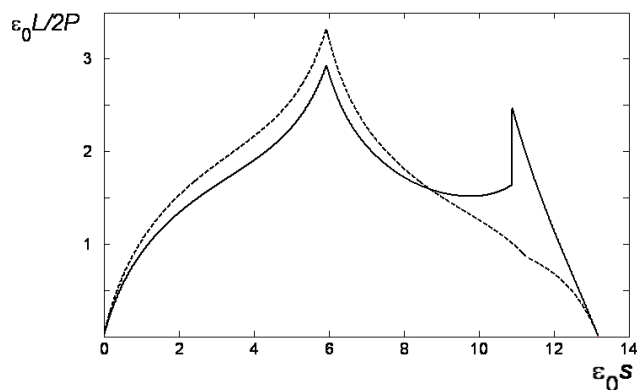


Рис. 4. Распределения потока в  $Q$ -каскаде монотонного профиля потока (пунктирная кривая) и  $Q$ -каскаде с «расширением» (сплошная кривая) при одинаковых длинах секций и величине суммарного потока

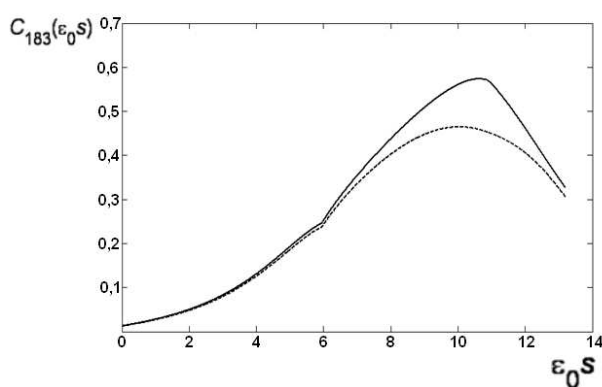


Рис. 5. Распределения концентрации изотопа  $^{183}\text{W}$  в  $Q$ -каскаде монотонного профиля потока (пунктирная кривая) и  $Q$ -каскаде с «расширением» (сплошная кривая) при одинаковых длинах секций и величине суммарного потока

Получены асимптотические формулы для оценки максимально возможной концентрации целевого промежуточного компонента в потоке конечного отбора каскада с «расширением», при условии малости величины  $E/P$  ( $E/P \ll 1$ ). Построены зависимости максимально возможной концентрации целевого компонента в потоке конечного отбора  $Q$ -каскада с «расширением», максимально достижимой концентрации целевого компонента внутри данного каскада и величины его суммарного потока от длины крайней секции ( $\varepsilon_0 S_E$ ). Сопоставление построенных зависимостей позволяет приближенно определить оптимальное значение параметра  $\varepsilon_0 S_E$  при заданных величинах концентраций целевого компонента в одном из отборов каскада. Найденную таким образом величину  $\varepsilon_0 S_E$  целесообразно использовать в качестве начального приближения для данного параметра при строгом решении задачи оптимизации  $Q$ -каскада с «расширением». Приближенно найденные для данной величины  $\varepsilon_0 S_E$  значения оптимальных параметров каскада (величина суммарного потока, соотношения между внешними потоками каскада и др.) могут быть использованы при проведении оценочных расчетов, например, по определению удельных затрат на получение изотопного продукта в каскаде с «расширением».

Продемонстрирована принципиальная возможность построения каскадов с «расширением» из участков прямоугольного профиля потока. Такие каскады, по существу, являются аппроксимацией профиля потока  $Q$ -каскада с «расширением» и могут быть реализованы на практике. Принципиальная схема простейшего варианта подобного каскада представлена на рис. 6. Возникновения расширения в таком каскаде можно добиться за счет организации «закрутки» потока, которая используется при построении прямоугольных и прямоугольно-секционированных каскадов (ПК и ПСК, соответственно).

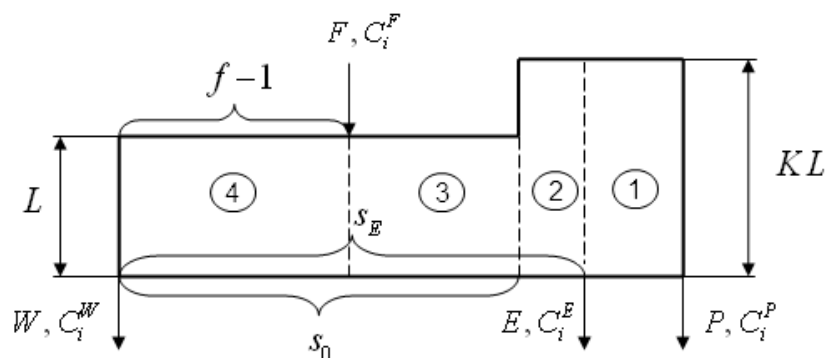


Рис. 6. Схема каскада с «расширением» потока, состоящего из участков прямоугольного профиля

Разработан алгоритм последовательного расчета параметров такого каскада от его концов к точке подачи питания при условии «немалости» коэффициентов разделения ступени с тем, чтобы полученные результаты являлись справедливыми для метода газовой центрифуги. Разработанный алгоритм базируется на использовании описанного



в литературе метода поверочного расчета ПК и ПСК, основанного на приближении фактора разделения каскада.

Сравнение каскада с «расширением» проводили с двумя вариантами ПК: 1 – ПК-1, в котором отношение потока отбора к потоку питания ступеней совпадает с таковым для обеднительной секции каскада с «расширением» (рис. 7); 2 – ПК-2, имеющий одинаковый относительный суммарный поток с каскадом с «расширением» (рис. 8). Конфигурации каскадов, внешние потоки и потоки питания ступеней выбраны с использованием данных, полученных при расчете соответствующих  $Q$ -каскадов для разделения изотопов вольфрама. Целевой компонент –  $^{183}\text{W}$ . Соотношение между потоками основного и промежуточного отборов для всех каскадов одинаково и равно 0,06. Число ступеней в сравниваемых каскадах было равно 80, внешнее питание подавали на 32-ю ступень, величина коэффициента разделения, приходящегося на единичную разность массовых чисел равна  $q_0=1,163$ .

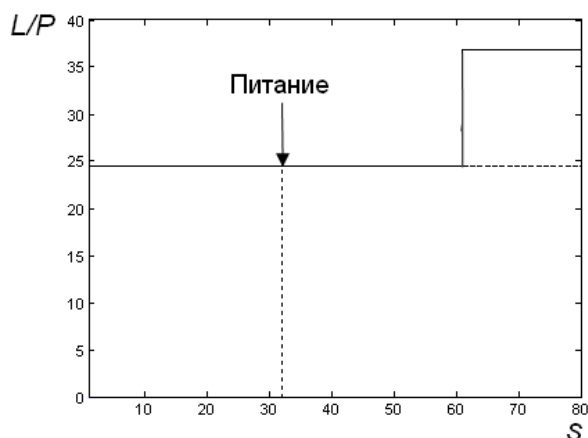


Рис. 7. Распределения потока по длине каскада с «расширением» (сплошная линия) и ПК-1 (горизонтальная пунктирная линия)

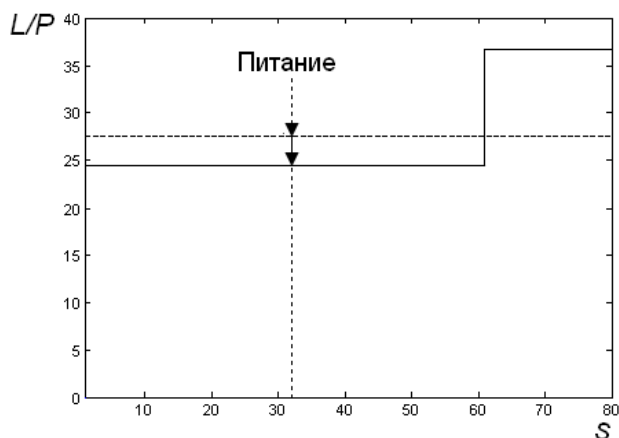


Рис. 8. Распределения потока по длине каскада с «расширением» (сплошная линия) и соответствующего ему по суммарному потоку ПК-2 (горизонтальная пунктирная линия)

На рис. 9 представлены кривые распределений концентрации целевого компонента в сравниваемых каскадах. Как следует из анализа рис. 9, каскад с «расширением», состоящий из участков прямоугольного профиля, обеспечивает преимущество по величине концентрации целевого промежуточного отбора каскада по сравнению с двумя рассмотренными вариантами ПК. При этом концентрации целевого компонента в концевых потоках отбора всех каскадов лежали в диапазоне  $32,0 \pm 0,5\%$ . Однако концентрация  $^{183}\text{W}$  в концевом отборе каскада с «расширением» была наименьшей и составила величину  $\sim 31,8\%$ .

Полученные результаты подтверждают сохранение закономерностей массопереноса промежуточных компонентов, характерные для  $Q$ -каскадов с «расширением», в каскадах из прямоугольных участков, имеющих аналогичную особенность в распределении потока. Данный факт свидетельствует о возможности практической реализа-

ции каскадной схемы с «расширением» для получения в потоке дополнительного отбора высококонцентрированных промежуточных изотопов многокомпонентных смесей (с концентрацией выше, чем предельно достижимая концентрация данного изотопа на конце каскада) в небольших количествах, по сравнению с нарабатываемым на конце каскада основным продуктом.

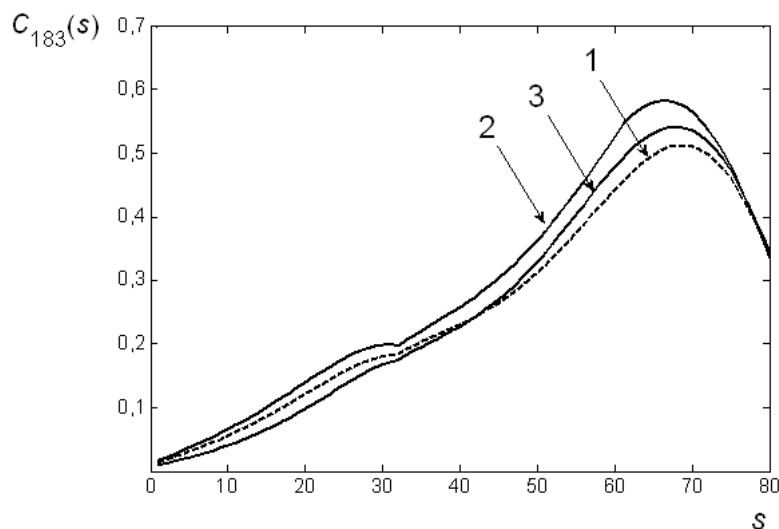


Рис. 9. Распределения концентрации компонента  $^{183}\text{W}$  по ПК-1 (кривая 1), каскаду с «расширением» (кривая 2) и ПК-2 (кривая 3)

Разработана модель  $Q$ -каскада с потерями рабочего вещества на его ступенях. Рассмотрен классический случай, когда потери рабочего вещества на ступени пропорциональны потоку на ее входе.

Получены соотношения для расчета внешних параметров такого каскада и распределений потоков и концентраций по его длине. Проведены численные исследования, выявившие зависимости параметров каскада от величины безразмерного коэффициента потерь  $\delta y/\epsilon_0^2$  ( $y$  – абсолютная величина коэффициента потерь, одинаковая для всех ступеней каскада). Расчеты выполнены на примере обогащения смеси изотопов цинка природного состава. В качестве целевого компонента был выбран изотоп  $^{66}\text{Zn}$ , который обогащался на «тяжелом» конце каскада, где концентрируются компоненты разделяемой смеси, имеющие наибольшие массовые числа.

На рис. 10 и 11 приведены зависимости относительного изменения суммарного потока и величины  $F/W$  от величины безразмерного коэффициента потерь  $\delta y/\epsilon_0^2$ . Анализ полученных зависимостей показывает, что с ростом потерь суммарный поток в каскаде и величина потока питания также начинают возрастать. Например, при максимальном значении  $\delta y/\epsilon_0^2 \approx 0,2$  относительное увеличение суммарного потока в каскаде по сравнению со случаем отсутствия потерь составляет примерно 19%, а величины  $F/W$  – примерно 16% (см. рис. 10, 11).

Разработанная модель  $Q$ -каскада с потерями дополняет собой ранее предложенную В.В. Толстым аналогичную модель каскада с потерями в случае «слабого обогаще-

ния», соотношения для расчета внешних и внутренних параметров которого получены на основе подхода В.Я. Бирюкова, Р.Я. Кучерова и В.П. Миненко. Кроме того, разработанная модель позволила обобщить классическую теорию «идеального» каскада с потерями рабочего вещества, рассмотренную К. Коэном при наличии у каскада только обогатительной части. Получены аналитические выражения, связывающие внешние и внутренние параметры «идеального» каскада с потерями, имеющего как обогатительную, так и обеднительную части.

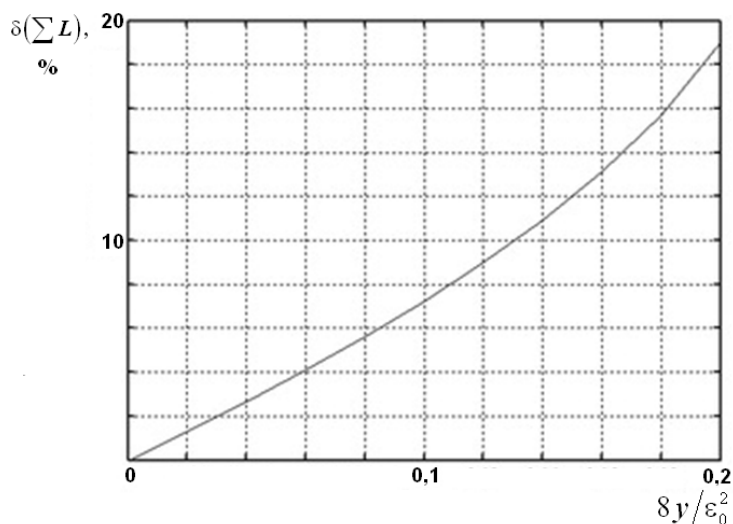


Рис. 10. Относительное изменение величины суммарного потока  $Q$ -каскада в зависимости от величины безразмерного коэффициента потерь (разделяемая смесь – цинк,  $C_n^P = 1,0\%$ ,

$$C_n^W = 50,0\% , n = 2)$$

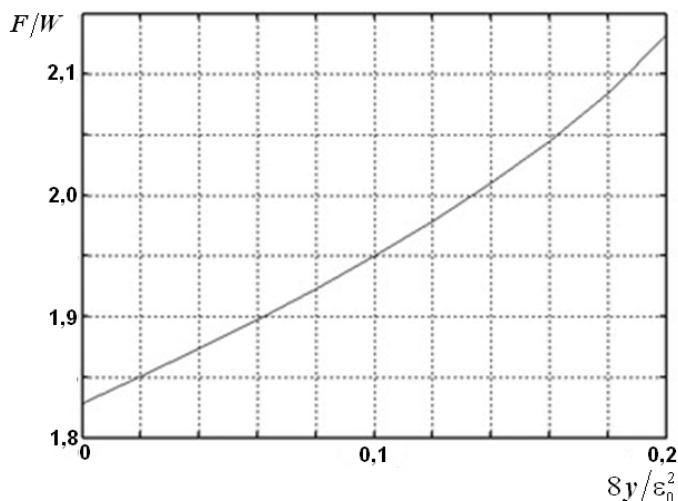


Рис. 11. Зависимость величины  $F/W$  в  $Q$ -каскаде от величины безразмерного коэффициента потерь (разделяемая смесь – цинк,  $C_n^P = 1,0\%$ ,  $C_n^W = 50,0\%$ ,  $n = 2$ )

Третья глава посвящена изучению ряда разделительных проблем, возникающих в контексте повторного использования выделенного из ОЯТ регенерированного урана, а именно – решены следующие задачи: проанализированы предложенные на сегодняшний день каскадные схемы для снижения накопления минорных изотопов при обогащении регенерата по изотопу  $^{235}\text{U}$ ; изучены закономерности изменения изотопного состава регенерата урана и параметров разделительного каскада при многократном рецикле данного материала в топливном цикле реакторов типа ВВЭР. Помимо этого разработаны упрощенная физико-математическая модель и методика расчета параметров «квазиидеального» каскада, с учетом потерь рабочего вещества на его ступенях и образования примесей, которая позволяет оценить влияние  $\alpha$ -распада присутствующего в регенерате  $^{232}\text{U}$  с образованием легкого примесного газа на изменение внешних параметров каскада.

Проведен анализ физических аспектов многократного использования регенерированного урана в топливе ВВЭР с использованием комплексного подхода на основе согласованного моделирования нейтронно-физических процессов и процессов разделения изотопов в каскадах. Для моделирования последних использован  $R$ -каскад (каскад с несмещением в «узлах» по относительным концентрациям выбранной пары компонентов) с двумя питаниями (природный уран, регенерат). Данная схема является оптимальной (по критерию минимальности удельных затрат работы разделения и расхода природного урана) для обогащения регенерата урана с учетом требований, предъявляемых к содержанию минорных изотопов в товарном низкообогащенном уране (НОУ).

Расчеты изотопных составов ядерного топлива на стадиях облучения в активной зоне реактора и в процессе выдержки после его выгрузки из реактора осуществлены усилиями сотрудников Института ядерных реакторов НИЦ «Курчатовский институт» (ИЯР НИЦ «КИ») (при участии В.А. Невиницы, А.А. Дудникова и др.) с использованием соответствующих современных программных кодов и вычислительных мощностей ИЯР НИЦ «КИ».

Проведен параметрический анализ закономерностей изменения изотопного состава регенерата и параметров разделительного каскада при его обогащении на каждом рецикле в зависимости от требуемого содержания изотопа  $^{235}\text{U}$  (или глубин выгорания топлива) и ограничений на содержание изотопа  $^{232}\text{U}$ . Расчеты проведены для двух глубин выгорания ядерного топлива – 48 и 60 МВт·сут/кгU. Для каждой глубины выгорания учитывали два варианта ограничений на  $^{232}\text{U}$  в НОУ –  $2 \cdot 10^{-7}\%$  и  $5 \cdot 10^{-7}\%$ . Отдельно рассмотрен асимптотический случай отсутствия ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$ . Для всех сценариев паразитное поглощение нейтронов в обогащенном уране изотопом  $^{236}\text{U}$  компенсировали дополнительным обогащением по  $^{235}\text{U}$  с коэффициентом компенсации 0,29. Относительный коэффициент разделения ступени для компонентов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  равен 1,2. Важно отметить, что для обогащения смеси как регенерированного урана, так и природного урана, выбор изотопа  $^{238}\text{U}$  в качестве «опорного» соответствует оптимальному выбору (по критерию минимальности суммарного

потока каскада) параметра  $M^*$  – полусуммы массовых чисел целевого и «опорного» компонентов.

Результаты проведенных численных экспериментов показали, что для выгорания 48 МВт·сут/кгU экономия природного урана максимальна в отсутствии ограничений на содержание изотопа  $^{232}\text{U}$ , а удельные затраты работы разделения – максимальны. Введение ограничений меняет картину в противоположную сторону: при самом жестком ограничении на содержание  $^{232}\text{U}$  ( $C_{232}^P \leq 2 \cdot 10^{-7} \%$ ) расход природного урана максимален, а удельные затраты работы разделения – минимальны. При отсутствии ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$  среднее относительное уменьшение в расходе природного урана, по сравнению с ядерным топливом, при изготовлении которого использован только природный уран, за пять последовательных рециклов составляет чуть менее 16%. В то время как при ограничении  $C_{232}^P \leq 2 \cdot 10^{-7} \%$  оно составляет 7,7%.

Качественно аналогичные закономерности наблюдаются и для топлива с выгоранием 60 МВт·сут/кгU.

Анализ полученных в результате численных экспериментов данных показывает, что основными причинами снижения привлекательности регенерированного урана для повторного использования являются необходимость осуществлять разбавление регенерированного урана природным для снижения количества  $^{232}\text{U}$  и компенсации влияния изотопа  $^{236}\text{U}$ .

Однако полученные результаты могут потребовать уточнения в дальнейшем, поскольку при моделировании процессов разделения в каскаде не учтено возможное влияние факторов разложения рабочего вещества, например, за счет  $\alpha$ -распада  $^{232}\text{U}$ , и образования (натечки) примесных компонентов на ступенях каскада.

Представлена физико-математическая модель «квазиидеального» каскада, учитывающая присутствие указанных выше факторов. Разработанная модель применена для оценки влияния разложения рабочего вещества и присутствия источника образования нового компонента при дообогащении регенерированного урана в каскаде с двумя потоками питания. При построении модели потери рабочего вещества на ступени формально рассмотрены в качестве «паразитных» отборов, а образующиеся примеси в качестве «паразитных» потоков питания. Принципиальная схема подобного каскада представлена на рис. 12.

Рассмотрен случай обогащения регенерированного урана, выделенного из облученного топлива ВВЭР-1000. При этом требуемая концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке отбора каскада должна составлять не менее 4%, концентрация данного изотопа в отвале – ~0,1%, относительный коэффициент разделения ступени для компонентов  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  равен 1,2.

Предполагали, что потери на ступени пропорциональны величине потока питания той же ступени, а количество образовавшихся молей примесного компонента пропорционально количеству молей распавшегося гексафторида. Рассмотрено 2 случая: 1 – коэффициент потерь рабочего вещества не меняется по длине каскада; 2 – величи-

на коэффициента потерь монотонно возрастает от отвала к отбору каскада, как степенная функция.

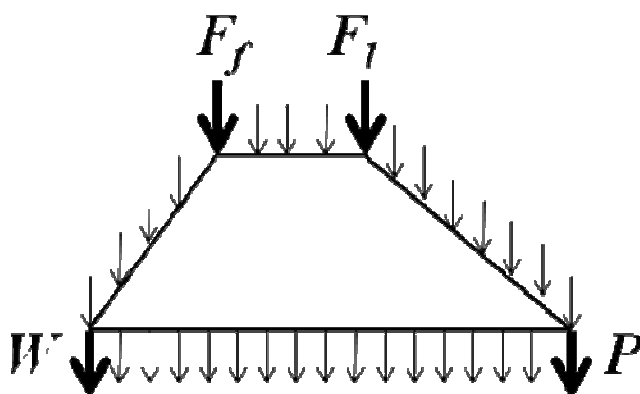


Рис. 12. Принципиальная схема каскада с двумя потоками питания при наличии потерь рабочего вещества и образовании примесного компонента ( $F_f$  – поток природного урана;  $F_l$  – поток регенерированного урана)

Величину коэффициента потерь для случая 1 варьировали в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$ , в случае 2 предполагали, что на отвальном конце каскада коэффициент потерь принимает значение  $10^{-6}$ , а на отборном –  $10^{-4}$ . Во всех расчетах полагали, что на 1 моль распавшегося гексафторида урана образуется 2 моля нового примесного компонента. В качестве «легкой» примеси рассмотрен компонент с массовым числом 336, что на 10 единиц меньше, чем масса крайнего уранового компонента  $^{232}\text{UF}_6$ .

Из результатов расчетов следует, что при изменении коэффициента потерь в указанном выше диапазоне значений концентрация  $^{235}\text{U}$  снижается с 4,23% до 3,01%. Такое изменение концентрации компонента  $^{235}\text{U}$  в отборе является существенным, поскольку технические характеристики НОУ по целевому изотопу ( $^{235}\text{U}$ ) должны строго соответствовать требованиям стандартной спецификации. Однако, полученные результаты являются предварительными и для корректного моделирования процесса дообогащения регенерированного урана, с учетом присутствия в каскаде потерь рабочего вещества и примесей, необходимо уточнение параметров процесса разложения гексафторида урана под действием  $\alpha$ -излучения на основе экспериментальных данных и уточнение законов образования примесей и их взаимодействия с конструкционными материалами разделительного каскада.

### **Основные выводы**

1. Выявлен физический смысл параметров, определяющих физико-математическую модель молекулярно-селективного массопереноса в  $Q$ -каскадах. Свойство постоянства «срезов» парциальных потоков в  $Q$ -каскаде позволяет отнести данную модель к так называемым «квазиидеальным» каскадам.
2. Дано физическое обоснование возможности локализации, накопления и увеличения концентрации целевого промежуточного компонента на внутренних ступенях

каскада за счет возникновения «скачка» или «расширения» потока на его внутренних ступенях. С использованием теории  $Q$ -каскадов показано преимущество в величине концентрации целевого промежуточного компонента, нарабатываемого в дополнительном отборе  $Q$ -каскада с «расширением» по отношению к  $Q$ -каскаду монотонного профиля потока. Продемонстрирована возможность построения каскадов с «расширением» потока, состоящих из участков прямоугольного профиля потока, что принципиально подтверждает возможность практического применения каскадов с «расширением».

3. Определены физические закономерности изменения изотопного состава регенерированного урана и параметров каскада для его дообогащения при многократном рецикле данного материала в топливе реакторов типа ВВЭР. Процесс дообогащения регенерированного урана смоделирован на основе  $R$ -каскада с двумя внешними питаниями (природный уран, регенерат). Выполнен анализ влияния ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$  в низкообогащенном уране на изменение внешних параметров разделительного каскада при многократном рецикле регенерата в топливе ВВЭР-1000.
4. Выявленные физические закономерности изменения параметров разделительного каскада с двумя питаниями при дообогащении регенерированного урана могут потребовать уточнения в дальнейшем, поскольку при моделировании массопереноса в каскаде не учтено влияние факторов разложения рабочего вещества, и возможного образования (натечки) примесных компонентов на ступенях каскада. Для оценки влияния указанных факторов разработана физико-математическая модель молекулярно-селективного переноса в каскаде с потерями и натечками на ступенях. Показано, что при учете потерь рабочего вещества и наработки газового компонента на ступенях каскада с двумя питаниями, обогащающего регенерированный уран, происходит недопустимое, с точки зрения требований стандартной спецификации низкообогащенного урана, снижение концентрации  $^{235}\text{U}$  в отборе каскада.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Zeng S., Sulaberidze G.A., Jiang D., Borisevich V.D., Smirnov A.Yu. The  $Q$ -cascade explanation. – Sep. Sci. and Technol., 2012, v. 47, № 11, p. 1591–1595.
2. Zeng S., Smirnov A. Yu., Jiang D. et al. Isotopically selective mass transfer in the  $Q$ -cascade with losses of working substance. – Sep. Sci. and Technol., 2013, v. 48, № 1, p. 15–21.
3. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Алексеев П.Н. и др. Эволюция изотопного состава регенерированного урана при многократном рецикле в легководных реакторах с подпиткой природным ураном. – ВАНТ. Сер: Физ. яд. реакт., 2010, №. 4, с. 70–80.
4. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А. и др. Каскадные схемы в задачах исследования закономерностей изменения изотопного состава многократно регенерированного урана. – Ядерная физика и инжиниринг, 2012, т. 3, № 5, с. 396–403.

5. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д. Влияние профиля потока питания ступеней каскада на массоперенос промежуточных компонентов. – Теорет. основы хим. технол., 2010, т. 44, № 6, с. 672–680.
6. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. К расчету параметров квазиидеального каскада с потерями и натечками на его ступенях. – Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2012, т. 1, № 2, с. 216–223.
7. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Borisevich V.D. The spot of the model cascades in the theory of multicomponent mixture separation. – In: Proc. of the XXIV<sup>th</sup> International Symposium on Physicochemical methods of separation “Ars Separatoria 2009”, 14–18 June, 2009, Kudowa-Zdroj, Poland, p. 100.
8. Palkin V.A., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. et al. Design-analytical research of a refinement of the recycled uranium from <sup>236</sup>U isotope by use of the Q-cascade. – In: Proc. 11<sup>th</sup> Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Saint-Petersburg, Russia, 13–18 June, 2010, p. 142–149.
9. Smirnov A.Yu. Mass transfer regularities in the cascade with several external flows at reenrichment of the recycled uranium. – In: Proc. of the XXV<sup>th</sup> International Symposium on Physicochemical methods of separation “Ars Separatoria 2010”, 4–7 July, 2010, Torun, Poland, p. 288–290.
10. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. General model of mass transfer processes in a cascade with losses of working substance. – In: Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Methods and Materials for Separation Processes “Separation Science: Theory and Practice 2011”, Kudowa-Zdroj, Poland. June 5–9, 2011, p. 119.
11. Alekseev P.N., Dudnikov A.A., Nevinitza V.A., Proselkov V.N., Chibinyaev A.V., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Evolution of multi-recycled uranium isotope composition in closed fuel cycle of light water reactors. – In: Proc. of “Global 2009”, Paris, France, September 6–11, p. 2633–2637.
12. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Дудников А.А. и др. Влияние <sup>232</sup>U и <sup>236</sup>U на изменение изотопного состава регенерированного урана в процессе его многократного использования в топливе легководных реакторов. – Материалы школы-конференции «Актуальные проблемы разработки и производства ядерного топлива», Звенигород, 8–11 ноября 2010 г., с. 181–182.
13. Дудников А.А., Невиница В.А., Проселков В.Н., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Сумарокова А.С. Многократный рецикл урана: проблема <sup>236</sup>U. – В сб.: Аннотации докладов Научной сессии НИЯУ МИФИ-2012, т.1, с. 221.
14. Борман В.Д., Борисевич В.Д., Пшенин В.В., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Способы уменьшения содержания минорных изотопов при обогащении регенерата урана. – В сб.: Аннотации докладов Научной сессии НИЯУ МИФИ-2012, т.1, с. 201.