

*На правах рукописи*

Се Цюаньсинь

СТАЦИОНАРНЫЙ МОЛЕКУЛЯРНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС  
В ОРДИНАРНЫХ И МНОГОПОТОЧНЫХ КАСКАДАХ ДЛЯ  
РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ  
НЕМАЛОМ ОБОГАЩЕНИИ И ПОТЕРЯХ НА СТУПЕНЯХ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Автор:

Москва 2007

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте  
(государственном университете)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Сулаберидзе Г.А.

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор Борисевич В.Д.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Холпанов Л.П.  
доктор физико-математических наук,  
профессор Жданов В.М.

Ведущая организация: Институт молекулярной физики,  
РНЦ Курчатовский институт

Защита состоится “16” Мая 2007 г. в \_\_\_\_ час. на заседании диссертационного  
совета Д 212.130.04 в конференцзале МИФИ по адресу: 115409, г. Москва,  
Каширское шоссе, 31, тел. 324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан “\_\_” Апреля 2007 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном  
экземпляре, заверенный печатью организации.

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

Е.М.Кудрявцев

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Области применения и масштабы получения стабильных изотопов непрерывно увеличиваются. В связи с этим продолжают теоретические и экспериментальные исследования по разработке новых и усовершенствованию известных методов разделения изотопных смесей, а также моделированию и оптимизации разделительных процессов и каскадных схем с целью уменьшения стоимости получаемой изотопной продукции.

Проектирование и оптимизацию каскадных схем обычно проводят на основе математических моделей, сохраняющих все основные физические закономерности, но позволяющих существенно упростить расчеты. Такие каскады принято называть модельными. При разделении многокомпонентных смесей в случае немалых обогащений на ступенях в качестве модельных используют квазиидеальные каскады. До настоящего времени теория квазиидеальных каскадов ограничена рассмотрением ординарного (3-х поточного) каскада в отсутствие потерь рабочего вещества. При этом остаются нерешенными ряд принципиальных теоретических задач: оптимизация квазиидеального каскада по критерию минимальности суммарного потока; учет дополнительных внешних потоков в каскаде, а также влияние потерь рабочего вещества на ступенях каскада на его разделительные характеристики. Это определяет интерес исследователей к дальнейшему развитию теории квазиидеальных каскадов.

Другой важной для практики проблемой является исследование и оптимизация процесса разделения многокомпонентной изотопной смеси в прямоугольном каскаде (ПК). Невозможность получения аналитического решения приводит к необходимости разработки численных методов решения этой задачи. Большинство известных методов расчета ПК имеют ограничения по величине обогащения на ступенях и применимо в отсутствии потерь рабочего вещества. Создание газовых центрифуг с очень большими коэффициентами разделения и появление все большего количества задач по обогащению различных стабильных изотопов,

сопровождающихся частичным разложением рабочего вещества на разделительных ступенях (элементах), делают разработку математических моделей и алгоритмов расчета ПК с учетом этих факторов актуальной проблемой.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью настоящей работы являлось построение математических моделей и разработка методик расчета каскадов (квазиидеальных и прямоугольных) для разделения многокомпонентных изотопных смесей при немалых обогащениях и наличии потерь рабочего вещества на ступенях, а также исследование основных закономерностей массопереноса в ординарных и многопоточных квазиидеальных каскадах. Для достижения заданной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

- анализ особенностей обогащения компонентов и определение оптимальных (по суммарному потоку) условий разделения в квазиидеальном ординарном каскаде.
- построение математической модели квазиидеального каскада с дополнительным внешним потоком (отбора или питания), а также создание методики его расчета; исследование закономерностей переноса многокомпонентной изотопной смеси в квазиидеальном каскаде с дополнительным внешним потоком.
- разработка математических моделей, алгоритмов и методик расчета квазиидеальных и прямоугольных каскадов, учитывающих наличие потерь рабочего вещества одновременно в узлах и в коммуникациях обогащенной и обедненной фракции ступеней каскада с относительными коэффициентами разделения, заметно превышающими единицу.
- исследование влияния потерь на массоперенос многокомпонентной смеси в квазиидеальном и прямоугольном каскадах.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- создана методика, позволяющая определять и исследовать области допустимых значений концентраций целевого компонента на концах ординарного квазиидеального каскада; установлена возможность

оптимизации ординарного квазиидеального каскада по длине отвальной секции и величине параметра  $M^*$ , определяющего распределение потока питания ступеней по длине каскада.

- разработана математическая модель переноса многокомпонентной изотопной смеси в квазиидеальном каскаде с дополнительным внешним потоком (питания или отбора) и на ее основе исследован стационарный молекулярно-селективный массоперенос в многопоточных каскадах.
- разработаны математические модели, алгоритмы и методики расчета квазиидеальных и прямоугольных каскадов, учитывающих наличие потерь рабочего вещества одновременно в узлах и в коммуникациях обогащенной и обедненной фракции ступеней каскада с относительными коэффициентами разделения, заметно превышающими единицу.
- определена степень влияния потерь рабочего вещества одновременно в узлах и коммуникациях каскада на разделительные характеристики квазиидеального и прямоугольного каскадов.

### **Практическая значимость работы**

- Разработанные математические модели и алгоритмы расчета квазиидеальных каскадов позволяют проводить детальный анализ массопереноса компонентов разделяемой смеси и оптимизацию каскада по важнейшему с практической точки зрения критерию - минимуму суммарного потока.
- Полученные аналитические зависимости, связывающие концентрации компонентов во внешних потоках для каскадов с дополнительным потоком питания (или отбора) являются основой для создания эффективных методик расчета сложных каскадных схем.
- Разработанные методики расчета прямоугольных каскадов с заданным потоком питания ступеней при наличии потерь рабочего вещества и произвольных коэффициентах разделения на ступенях позволяют с высокой точностью рассчитать значения концентраций компонентов на концах каскада, а также распределение концентраций по ступеням каскада.
- Результаты численного анализа характеристик прямоугольных каскадов с

потерями в узлах и коммуникациях позволяют корректно оценивать их влияние на разделительные характеристики каскада и тем самым выстраивать оптимальную стратегию разделительной компании.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Асимптотические формулы для расчёта концентраций целевого компонента в потоках отбора и отвала квазиидеального каскада с немалыми обогащениями на ступенях, позволяющие определить область их допустимых значений.
- Результаты оптимизации квазиидеального каскада по критерию минимальности суммарного потока.
- Аналитическое решение системы уравнений массопереноса квазиидеального каскада с дополнительным внешним потоком.
- Математические модели квазиидеального и прямоугольного каскада при наличии потерь рабочего вещества одновременно в узлах и коммуникациях ступеней.
- Метод расчета прямоугольных каскадов с немалыми обогащениями на ступенях, позволяющий учитывать потери рабочего вещества не только в узлах каскада, но и коммуникациях обогащенной и обедненной фракции.
- Результаты исследований закономерностей квазиидеального и прямоугольного каскада для разделения многокомпонентных изотопных смесей при наличии потерь на ступенях.

**Апробация работы:** Основные результаты диссертации докладывались на научной сессии МИФИ (2004 г.), на XIX-ой, XX-ой и XXI-ой Международных конференциях по физико-химическим методам разделения смесей (International Symposium on Physico-chemical Methods on the Mixtures Separation, “Ars Separatoria” 2004, 2005 и 2006, Poland), а также на IX-ой, X-ой и XI-ой Всероссийской (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» (2004, 2005 и 2006 г., г.Звенигород, Россия).

**Публикации:** По теме работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 статьи в реферируемых журналах.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, 4 глав,

заклучения, приложения и списка использованной литературы, включающего 66 источников. Общий объем работы составляет 158 страниц, содержащих 30 рисунков и 5 таблиц.

### Содержание работы

В первой главе описана математическая модель ординарного квазиидеального каскада для разделения многокомпонентной смеси при немалых обогащениях на ступени. Получены асимптотические формулы для вычисления значений концентраций в отборе и отвале квазиидеального каскада. Рассмотрены разделительные характеристики квазиидеального каскада. Основное внимание уделено исследованию особенностей обогащения компонентов с промежуточной массой и оптимизации квазиидеального каскада.

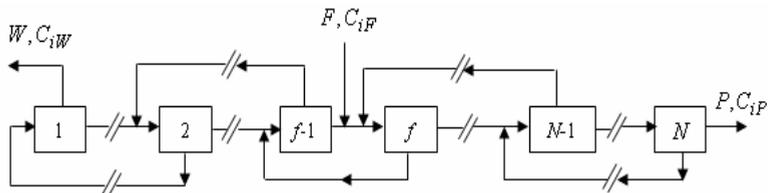


Рис.1. Схема противоточного симметричного каскада.

При разделении многокомпонентной изотопной смеси параметрами квазиидеального каскада являются потоки питания  $F$ , отбора  $P$  и отвала  $W$ , а также соответствующие им концентрации  $C_{iF}$ ,  $C_{iP}$ ,  $C_{iW}$  ( $i = \overline{1, m}$ ,  $m$  – число компонентов), полное число ступеней в каскаде  $N$ , номер ступени, на вход которой подают поток питания  $f$ , и номер компонента  $k$  (называемого опорным), полные коэффициенты разделения ступеней  $q_{ik}$  и коэффициенты разделения ступеней по обогащенной  $\alpha_{ik}$  и обедненной фракции  $\beta_{ik}$  (рис.1).

Для молекулярно-кинетических методов разделения изотопов (газовой диффузии, газовой центрифуги, термодиффузии, масс-диффузии) полный коэффициент разделения ступени  $q_{ik}$  может быть представлен в виде.

$$q_{ik} = q_0^{M_k - M_i}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $q_0$  – коэффициент разделения, приходящийся на единицу разности массовых чисел,  $M_k$ ,  $M_i$  – массовое число  $k$ -го и  $i$ -го компонента соответственно. В этом случае концентрации компонентов в потоке отбора и отвала определяются следующими соотношениями:

$$C_{iP} = C_{iF} \frac{1 - g_i^{-f}}{1 - g_i^{-N-1}} \bigg/ \sum_{j=1}^m C_{jF} \frac{1 - g_j^{-f}}{1 - g_j^{-N-1}}, \quad (2)$$

$$C_{iW} = C_{iF} \frac{1 - g_i^{N+1-f}}{1 - g_i^{N+1}} \bigg/ \sum_{j=1}^m C_{jF} \frac{1 - g_j^{N+1-f}}{1 - g_j^{N+1}}, \quad (3)$$

где

$$g_i = \frac{\alpha_{ik}(\beta_{ik} - 1)}{\alpha_{ik} - 1}, \quad i \neq k; \quad g_k = \frac{\beta_{ik} - 1}{\beta_{ik}(\alpha_{ik} - 1)}. \quad (4)$$

Формула для расчета относительного суммарного потока имеет вид

$$\sum_{s=1}^N \frac{L(s)}{P} = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{g_i + 1}{g_i - 1} \left[ \frac{W}{P} C_{iW}(-f) + C_{iP}(N+1-f) \right] \right\}. \quad (5)$$

Частным случаем квазиидеального является R-каскад - каскад без смешивания в «узлах» по относительной концентрации пары выбранных («опорных») компонентов  $n$ ,  $k$ :

$$R'_{nk}(s-1) = R_{nk}(s) = R''_{nk}(s+1), \quad (6)$$

где  $R_{nk} = C_n/C_k$ ,  $R'_{nk} = C'_n/C'_k$ ,  $R''_{nk} = C''_n/C''_k$ .

Поскольку в квазиидеальном каскаде значения полных коэффициентов разделения  $q_{ik}$  одинаковы на всех ступенях каскада, то в этом случае из условия (6) следует, что ступени должны быть симметричными относительно пары компонентов с номерами  $n$  и  $k$ , то есть

$$\alpha_{nk} = \beta_{nk} = \sqrt{q_{nk}}. \quad (7)$$

В этом случае  $g_i$  могут быть выражены в следующем виде:

$$g_i = q_0^{(M^* - M_i)/2}, \quad (8)$$

где

$$M^* = (M_n + M_k)/2. \quad (9)$$

При фиксированном числе ступеней в отвальной части максимальное значение концентрации целевого компонента в потоке отбора  $C_{nP}^{макс}$  может быть найдено предельным переходом ( $N \rightarrow \infty$ ) из формулы (2)

$$C_{nP}^{макс} \approx (1 - g_n^{-f}) C_{nF} / \sum_{i=1}^n (1 - g_i^{-f}) C_{iF}. \quad (10)$$

При этом концентрация целевого компонента в потоке отвала может быть рассчитана по формуле

$$C_{nW} \approx g_n^{-f} C_{nF} / \left( \sum_{i=n+1}^m C_{iF} + \sum_{i=1}^n g_i^{-f} C_{iF} \right). \quad (11)$$

Так же в предельном случае при стремлении  $f \rightarrow \infty$  формула (10) для концентрации целевого компонента в потоке отбора преобразуется к виду:

$$C_{nP}^{пред} \approx C_{nF} / \sum_{i=1}^n C_{iF}, \quad (12)$$

а при стремлении  $f \rightarrow 0$  (10) запишется как

$$C_{nP}^{макс} \approx C_{nF} / \sum_{i=1}^n \frac{\ln g_i}{\ln g_n} C_{iF}. \quad (13)$$

Из формул (10), (12) и (13) следует, что допустимое значение концентрации целевого компонента в потоке отбора из квазиидеального каскада будет определяться следующими соотношениями

$$C_{nF} / \sum_{i=1}^n \frac{\ln g_i}{\ln g_n} C_{iF} < C_{nP}^{макс} < C_{nF} / \sum_{i=1}^n C_{iF}. \quad (14)$$

С другой стороны, с уменьшением числа ступеней в обогатительной части каскада при заданной величине  $f$  величина  $C_{nP}$  уменьшается. В предельном случае обогатительная секция каскада может состоять всего из одной ступени, на вход которой подают поток питания. В этом случае выражения (2)-(3) приводятся к виду

$$C_{nP}^{мин} \approx \frac{1 - g_n^{-f}}{1 - g_n^{-f-1}} C_{nF} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_i^{-f}}{1 - g_i^{-f-1}} C_{iF}, \quad (15)$$

$$C_{nW} \approx \frac{1 - g_n}{1 - g_n^{f+1}} C_{nF} \left/ \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_i}{1 - g_i^{f+1}} C_{iF} \right. . \quad (16)$$

На рис.2 представлена область допустимых значений  $C_{nP}$  и  $C_{nW}$ , рассчитанная для случая разделения изотопной смеси Кг природного состава в квазиидеальном каскаде с несмешиванием по относительной

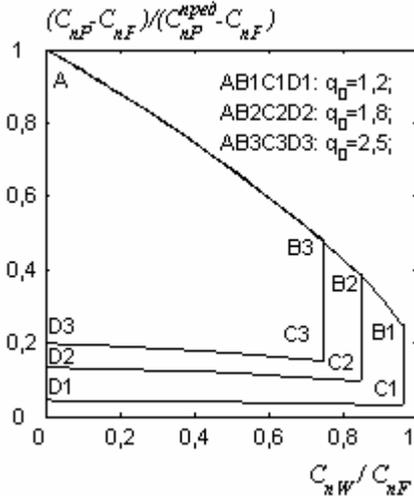


Рис.2. Область допустимых значений концентраций целевого компонента  $^{83}\text{Kr}$  в потоке отбора  $C_{nP}$  и отвала  $C_{nW}$  квазиидеального каскада при различных значениях  $q_0$ .

концентрации  $R_{45}=C_4/C_5$  (целевой компонент  $^{83}\text{Kr}$ ) при различных значениях коэффициентов разделения на единицу разности массовых чисел  $q_0$ . Область AB1C1D1 соответствует случаю  $q_0=1,2$ , а области AB2C2D2 и AB3C3D3 – случаю  $q_0=1,8$  и  $2,5$ , соответственно. Чем выше значение  $q_0$ , тем меньше область существования решения системы уравнений (2)-(3). Кроме того, поведение кривой, описывающей верхнюю границу величины  $C_{nP}$  при заданном значении величины  $C_{nW}$ , не зависит от величины коэффициента разделения, приходящегося на единицу разности массовых чисел  $q_0$ , и

определяется лишь исходным составом смеси компонентов.

Оптимизация квазиидеального каскада с использованием критерия минимальности суммарного потока в каскаде проведена по параметру  $M^*$  и концентрации целевого компонента в потоке отвала.

На рис.3 представлены зависимости относительного суммарного потока  $\Sigma L/P$  от величины параметра  $M^*$  при обогащении изотопа  $^{83}\text{Kr}$  для различных концентраций целевого компонента в потоке отбора  $C_{nF}$  (15%,

20%, 30% и 40%). Полученные зависимости свидетельствуют о том, что при заданных концентрациях целевого компонента в потоках отбора и отвала,

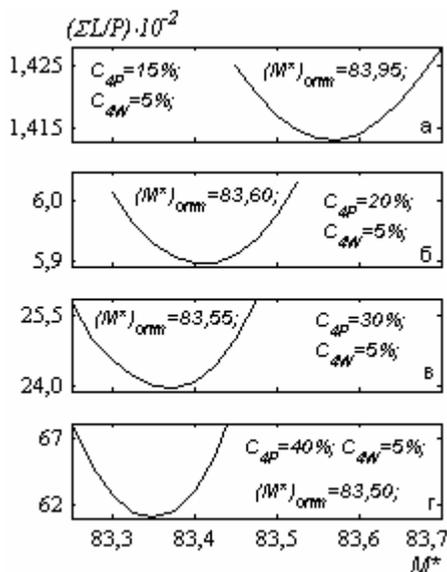


Рис.3. Зависимости относительного суммарного потока  $\Sigma L/P$  от величины параметра  $M^*$  при обогащении промежуточного компонента  $^{83}\text{Kr}$  при различных значениях концентрации целевого компонента в потоке отбора  $C_{4P}$  (а:  $C_{4P} = 15\%$ , б:  $C_{4P} = 20\%$ , в:  $C_{4P} = 30\%$ , г:  $C_{4P} = 40\%$ ).

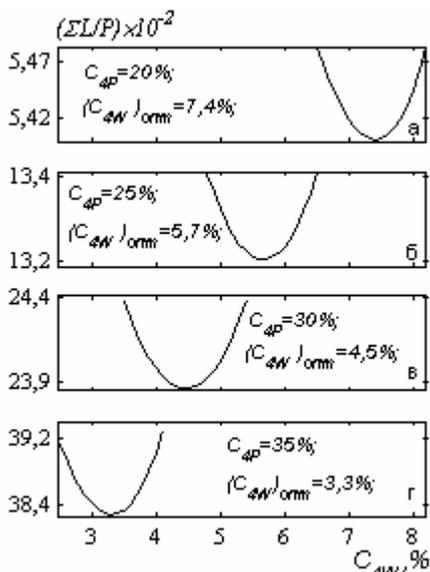


Рис.4. Зависимости величины относительного суммарного потока в квазиидеальном каскаде от концентрации целевого компонента ( $^{83}\text{Kr}$ ) в потоке отвала при заданных значениях концентрации целевого изотопа в потоке отбора (а:  $C_{4P} = 20\%$ , б:  $C_{4P} = 25\%$ , в:  $C_{4P} = 30\%$ , г:  $C_{4P} = 35\%$ ).

существует оптимальное значение  $(M^*)_{opt}$ , при котором относительный суммарный поток в каскаде минимален. Например, при концентрации целевого компонента 15%,  $(M^*)_{opt} = 83,95$ , (рис.2а), а при 40%  $(M^*)_{opt}$  равно 83,50 (рис.2г). Это объясняется тем, что для получения разных концентраций целевого компонента в потоках отбора и отвала необходимо совершить разную термодинамическую работу. С физической точки зрения для каждого рассмотренного случая минимизация суммарного потока в

каскаде соответствует отысканию такого распределения потока в нем, при котором термодинамические потери на смешение будут минимальны .

На рис.4 представлены зависимости относительного суммарного потока  $\Sigma L/P$  от концентрации целевого компонента в потоке отвала для случая разделения природной смеси криптона в квазиидеальном каскаде при отсутствии смешивания по относительной концентрации  $R_{45}=C_4/C_5$ . При заданной концентрации целевого компонента в отборе  $C_{4P}$  (а:20%, б: 25%, в: 30%, г: 35%) оптимальная концентрация целевого компонента в отвале ( $C_{4W})_{opt}$  будет соответственно равна 7,4%, 5,7%, 4,5%, 3,3%. Чем большее обогащение целевого компонента в квазиидеальном каскаде надо получить, тем меньше оптимальная концентрация целевого компонента в отвале, при которой относительный суммарный поток минимален.

Во второй главе описана математическая модель квазиидеального каскада с дополнительным внешним потоком (отбора или питания) и представлена методика его расчета. Проведены исследования основных закономерностей массопереноса в каскаде с дополнительным внешним потоком. Математическая модель создана для противоточного симметричного каскада с потоками питания  $F$ , отвала  $W$ , отбора  $P$  и дополнительным потоком  $E$  ( $E>0$  соответствует случаю дополнительного потока питания, а  $E<0$  - дополнительного потока отбора), с концентрациями в соответствующих потоках  $C_{iF}$ ,  $C_{iW}$ ,  $C_{iP}$ ,  $C_{iE}$ . С использованием созданной математической модели получены следующие аналитические соотношения

$$C_{iP} = \frac{C_{iF}(1-g_i^{-f}) + \frac{E}{F}C_{iE}(1-g_i^{-l})}{1-g_i^{-(N+1)}} \bigg/ \frac{\sum_{j=1}^m C_{jF}(1-g_j^{-f}) + \frac{E}{F}C_{jE}(1-g_j^{-l})}{1-g_j^{-(N+1)}}, \quad (17)$$

$$C_{iW} = \frac{C_{iF}(g_i^{N+1-f} - 1) + \frac{E}{F}C_{iE}(g_i^{N+1-l} - 1)}{g_i^{N+1} - 1} \bigg/ \frac{\sum_{j=1}^m C_{jF}(g_j^{N+1-f} - 1) + \frac{E}{F}C_{jE}(g_j^{N+1-l} - 1)}{g_j^{N+1} - 1}, \quad (18)$$

$$\Sigma L = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{g_i + 1}{g_i - 1} [PC_{iP}(N + 1 - l) + WC_{iW}(-l) + FC_{iF}(l - f)] \right\}, \quad (19)$$

позволяющие при заданных величинах  $C_{iF}$ ,  $C_{iE}$ ,  $g_i$ ,  $N$ ,  $f$ ,  $l$ ,  $E/F$  рассчитать концентрации компонентов в потоках отбора и отвала, а также суммарный

поток в квазиидеальном каскаде.

При расчете квазиидеального каскада с дополнительным потоком отбора ситуация сложнее, чем в случае дополнительного потока питания, так как концентрации компонентов в отбираемом потоке не заданы. Однако, в этом случае можно получить связь концентраций в дополнительном потоке отбора  $C_{iE}$  с концентрациями в основном потоке отбора  $C_{iP}$  из следующего соотношения

$$\frac{C_{iE}}{C_{iP}} = \frac{C_{nE}}{C_{nP}} \cdot \frac{g_n - 1}{g_n + 1} \cdot \frac{g_i + 1}{g_i - 1} \cdot \frac{1}{1 - g_n^{I-N-1}} \cdot (1 - g_i^{I-N-1}). \quad (20)$$

Важной практической задачей, в которой находит применение теория квазиидеального каскада с дополнительным внешним потоком, является дообогащение регенерированного топлива АЭС. Из всех возможных схем ординарных каскадов для переработки регенерированного топлива наилучшей является схема с дополнительным потоком питания, в котором в определённое сечение ординарного каскада добавляется регенерат. Задача дообогащения регенерированного ядерного топлива до заданной концентрации изотопа  $^{235}\text{U}$  должна решаться с учётом необходимого разбавления концентрации изотопа  $^{232}\text{U}$  и компенсации влияния изотопа  $^{236}\text{U}$ . Изотоп  $^{232}\text{U}$  является источником жёсткого гамма излучения, поэтому отношение концентрации  $^{232}\text{U}$  к концентрации  $^{235}\text{U}$  во вторичном топливе из соображений безопасности работающего с ним персонала не должно превышать  $1,1 \cdot 10^{-7}$ . Изотоп  $^{236}\text{U}$ , является активным поглотителем тепловых нейтронов. Для компенсации паразитного поглощения нейтронов изотопом  $^{236}\text{U}$  в ядерное топливо необходимо вводить дополнительное количество делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$ . Величину этого дополнительного обогащения учитывают с помощью *коэффициента компенсации реактивности (ККР)*, значение которого лежит в диапазоне  $0,20 \div 0,60$ . А концентрация  $^{235}\text{U}$  в переработанном топливе ( $C_{3P, экв.}$ ), эквивалентная концентрации в продукте, полученном из природного сырья ( $C_{3P, пр.}$ ), рассчитывают по формуле:

$$C_{3P, экв.} = C_{3P, пр.} + ККР \times C_{4P}, \quad (21)$$

где  $C_{4P}$  концентрация  $^{236}\text{U}$  в регенерированном топливе.

Таким образом, задача сводится к расчёту разделения 5-компонентной смеси изотопов урана в каскаде с дополнительным потоком питания, при этом природное сырьё ( $^{235}\text{U} - 7,11 \cdot 10^{-3}$ ,  $^{238}\text{U} - 0,99289$ ) подают в каскад как основной поток питания, а поток регенерированного топлива поступает в каскад как дополнительный поток питания. Типичный состав регенерированного топлива российского реактора ВВЭР-440 после 10 лет выдержки приведен в следующем:  $^{232}\text{U} - 1 \cdot 10^{-9}$ ,  $^{234}\text{U} - 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $^{235}\text{U} - 8,3 \cdot 10^{-3}$ ,  $^{236}\text{U} - 4,1 \cdot 10^{-3}$ ,  $^{238}\text{U} - 0,9877$ . Для расчёта брались следующие значения параметров  $q_0 = 1,0627$  ( $q_{35} = 1,2$ ),  $C_{3P} = 3,5\%$ ,  $C_{3W} = 0,2\%$ ,  $R_{nk} = R_{35} = C_3/C_5$ ,  $C_{1P}/C_{3P} \leq 1,1 \cdot 10^{-7}$ . Результаты расчетов представлены на рис.5.

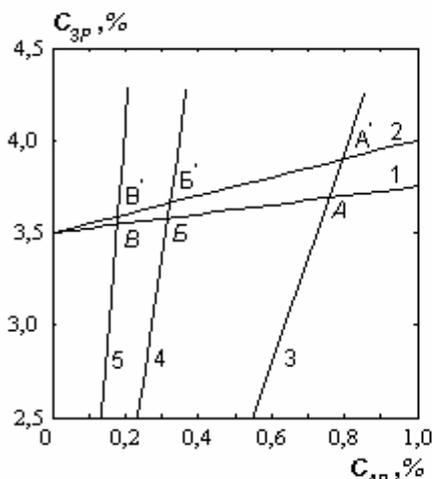


Рис.5. Обогащение  $^{235}\text{U}$  с учетом компенсации  $^{236}\text{U}$ , эквивалентное обогащению природного урана до 3,5%. 1:  $KKP=0,25$ ; 2:  $KKP=0,5$ ; 3:  $E/F=1$ ; 4:  $E/F=1/4$ ; 5:  $E/F=1/8$ .

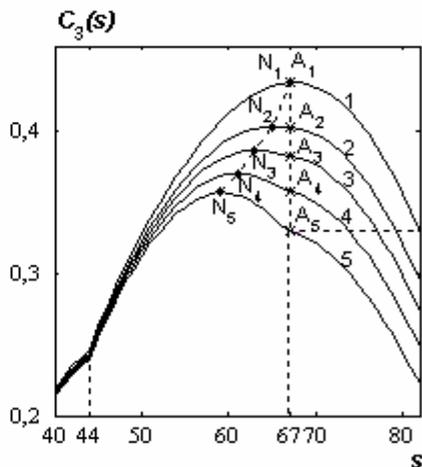


Рис.6. Распределения концентрации целевого изотопа ( $^{183}\text{W}$ ) по ступеням R-каскада при различных величинах  $E/P$ : 1:  $E/P=0$ ; 2:  $E/P=0,3$ ; 3:  $E/P=0,6$ ; 4:  $E/P=1,2$ ; 5:  $E/P=2,8$ .

Прямые 1 и 2 представляют собой зависимости эквивалентных концентраций  $C_{3P, экв}$  от концентрации изотопа  $^{236}\text{U}$   $C_{4P}$ , рассчитанные по формуле (21) при заданном значении обогащения  $^{235}\text{U}$ , равном 3,5%. Кривые 3, 4, 5 представляют зависимости концентрации  $C_{3P}$  от  $C_{4P}$  при обогащении смеси в каскаде соответственно при отношении  $E/F = 1, 1/4$  и  $1/8$ . Каждая

точка этих кривых соответствует своему R-каскаду. Точки, лежащие ниже точек пересечения с прямыми 1 (при  $KKP=0,25$ ) и 2 (при  $KKP=0,50$ ), не удовлетворяют условию компенсации, поэтому обогащение топлива должно быть осуществлено до значений концентраций, соответствующих точкам пересечения  $A, B, B$  ( $KKP=0,25$ ) и  $A', B', B'$  ( $KKP=0,50$ ). Условию компенсации  $^{236}\text{U}$  соответствуют также значения, которые лежат выше указанных точек пересечения. Однако обогащение урана до таких концентраций нецелесообразно, поскольку может приводить к избыточным затратам удельного суммарного потока. Важным следствием проведенного исследования является вывод о том, что выполнение условия компенсации для любой концентрации изотопа  $^{236}\text{U}$  с одновременным разбавлением  $^{232}\text{U}$  можно обеспечить двумя способами: подбором параметров каскада и подбором отношения  $E/F$  потока регенерата к потоку питания в каскад.

Задача о расчете многокомпонентных каскадов с дополнительным отбором связана с тем, что концентрации промежуточных изотопов имеют максимум внутри каскада и, следовательно, существует возможность получить в дополнительном отборе концентрацию промежуточного изотопа большую, чем в концевом отборе. Однако при этом остаются вопросы о допустимой величине дополнительного отбора и поведении максимума концентрации целевого изотопа внутри каскада. Созданная теория дает возможность получать ответы на эти вопросы. Проиллюстрировано это на примере расчета каскада с дополнительным отбором для разделения 5-компонентной смеси изотопов вольфрама с природным составом:  $^{180}\text{W} - 0,01400$ ,  $^{182}\text{W} - 0,26416$ ,  $^{183}\text{W} - 0,14409$ ,  $^{184}\text{W} - 0,30618$ ,  $^{186}\text{W} - 0,28417$ . Целевым компонентом выбран промежуточный изотоп с  $n=3$ , а опорным - изотоп с номером  $k=4$ . Полный коэффициент разделения брался равным  $q_{34}=1,16306$ .

На рис.6 показаны распределения концентрации целевого компонента в каскаде с дополнительным отбором при разных относительных потоках  $E/P$ . В случае без дополнительного отбора при получении заданных концентраций целевого компонента в потоках отбора ( $C_{3P}=33\%$ ) и отвала ( $C_{3W}=0,85\%$ ), общее число ступеней в каскаде равно  $N=82$ , номер ступени,

на вход которой подают поток питания  $f=44$ . При этом максимальная концентрация целевого компонента достигается в ступени с номером  $l=67$ , поскольку дополнительный поток отбора отбирают из этой ступени. Кривая 1 соответствует разделению в каскаде без дополнительного отбора, а остальные кривые – случаям различных величин дополнительного отбора. Точки  $A_i$  ( $i=1, \dots, 5$ ) на рис.5 соответствуют концентрациям целевого компонента в потоке дополнительного отбора, а точки  $N_i$  ( $i=1, \dots, 5$ ) – максимальным значениям этих концентраций внутри каскада. С ростом величины относительного потока  $E/P$ , концентрация целевого изотопа в дополнительном потоке отбора уменьшается. При этом также уменьшается номер ступени, в которой достигается максимум концентрации (точка, соответствующая максимуму концентрации, движется на рис.6 влево). Чтобы получить в дополнительном отборе концентрацию промежуточного изотопа большую, чем в конечном отборе, необходимо правильно выбрать отношение  $E/P$ , которое в рассмотренном случае должно быть меньше 2,8.

В третьей главе получены аналитические выражения для расчета концентраций компонентов в потоках отбора и отвала и суммарного потока, изучено влияние потерь рабочего вещества на разделительные характеристики квазиидеального каскада.

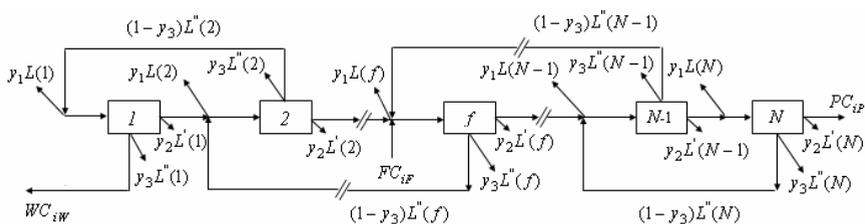


Рис.7. Схема противоточного разделительного каскада с потерями

Предположим, что величина потерь рабочего вещества пропорциональна потоку материального вещества в котором она имеет место, то есть

$$\Delta L_s = y_1 L(s), \quad \Delta L'_s = y_2 L'(s), \quad \Delta L''_s = y_3 L''(s), \quad (22)$$

где  $y_1, y_2, y_3$  – постоянные величины, называемые коэффициентами потерь (рис.7). При этом концентрация в потоке потерь равна концентрации в соответственных фракциях.

С использованием созданной математической модели получены следующие выражения:

$$C_{iP} = \frac{\omega_{2i}^{-f} - \omega_{1i}^{-f}}{\omega_{2i}^{-N-1} - \omega_{1i}^{-N-1}} C_{iF} \left/ \sum_{j=1}^m \frac{\omega_{2j}^{-f} - \omega_{1j}^{-f}}{\omega_{2j}^{-N-1} - \omega_{1j}^{-N-1}} C_{jF} \right., \quad (23)$$

$$C_{iW} = \frac{\omega_{2i}^{N+1-f} - \omega_{1i}^{N+1-f}}{\omega_{2i}^{N+1} - \omega_{1i}^{N+1}} C_{iF} \left/ \sum_{j=1}^m \frac{\omega_{2j}^{N+1-f} - \omega_{1j}^{N+1-f}}{\omega_{2j}^{N+1} - \omega_{1j}^{N+1}} C_{jF} \right., \quad (24)$$

$$\Sigma L = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{g_i + 1}{1 - y_3} \left[ \frac{PC_{iP}(1 - \omega_{1i}^{f-N-1}) + WC_{iW}(1 - \omega_{1i}^f)}{(\omega_{1i} - 1)(\omega_{2i} - 1)} \right] \right\}, \quad (25)$$

где

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_{1i} &= \frac{(g_i + 1)(1 + y_1) + \sqrt{((g_i + 1)(1 + y_1))^2 - 4(1 - y_3)(1 - y_2)g_i}}{2(1 - y_3)}, \\ \omega_{2i} &= \frac{(g_i + 1)(1 + y_1) - \sqrt{((g_i + 1)(1 + y_1))^2 - 4(1 - y_3)(1 - y_2)g_i}}{2(1 - y_3)}. \end{aligned} \right. \quad (26)$$

При заданных величинах  $g_i, f, N, y_1, y_2, y_3, C_{iF}$ , формулы (23)-(26) позволяют рассчитать концентрации компонентов в потоках отбора  $C_{iP}$  и отвала  $C_{iW}$  и суммарный поток в каскаде.

На рис.8 и 9 приведены результаты расчета каскада для обогащения изотопа  $^{235}\text{U}$  из регенерированного урана, состав которого приведен на странице 14, со следующими исходными условиями: коэффициент

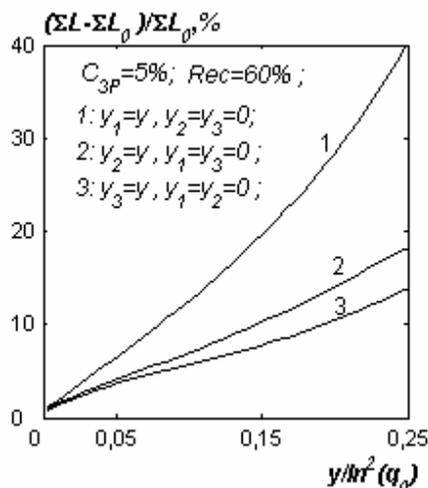


Рис.8. Зависимости относительного приращения суммарного потока  $(\Sigma L - \Sigma L_0) / \Sigma L_0$  от безразмерной величины  $y / \ln^2(q_0)$  при обогащении изотопом  $^{235}\text{U}$  регенерированного урана для различных вариантов учета потерь в квазиидеальном каскаде.

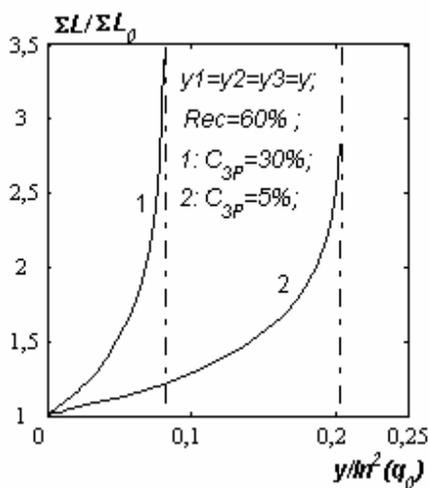


Рис.9. Зависимости относительного суммарного потока  $\Sigma L / \Sigma L_0$  от безразмерной величины  $y / \ln^2(q_0)$  для различных значений концентраций целевого компонента в потоке отбора ( $C_{3P} = 30\%$  и  $C_{3P} = 5\%$ ) в случае  $y_1 = y_2 = y_3 = y$ .

извлечения  $Rec = (PC_{3P} / FC_{3F}) \cdot 100\% = 60\%$ ,  $q_0 = 1,0627$  ( $q_{35} = 1,2$ ). На рис.8 представлены зависимости относительного приращения суммарного потока  $(\Sigma L - \Sigma L_0) / \Sigma L_0$  ( $\Sigma L$ —суммарный поток в квазиидеальном каскаде с потерями,  $\Sigma L_0$ —суммарный поток в квазиидеальном каскаде без потерь) от безразмерной величины  $y / \ln^2(q_0)$  для различных вариантов учета потерь (1:  $y_1 = y, y_2 = y_3 = 0$  соответствует случаю, когда потери рабочего вещества имеют место в узлах каскада, 2:  $y_2 = y, y_1 = y_3 = 0$ —потери в коммуникациях обогащенной фракции, 3:  $y_3 = y, y_1 = y_2 = 0$ —потери в коммуникациях обедненной фракции).

При заданных концентрации целевого компонента в потоке отбора ( $C_{3P}=5\%$ ) и коэффициенте извлечения ( $Rec=60\%$ ), с возрастанием коэффициента  $y$ , приращение суммарного потока в каскаде  $(\Sigma L - \Sigma L_0)/\Sigma L_0$  заметно увеличивается. Наибольшее влияние на характеристики каскада в случае равенства коэффициентов потерь имеет место их учет в узлах каскада (1:  $y_1=y, y_2=y_3=0$ ). Так, например, при  $y/\ln^2(q_0)=0,25$ , приращение суммарного потока в случае 1:  $y_1=y, y_2=y_3=0$  составляет 40%, а в случае 2:  $y_2=y, y_1=y_3=0$  и случае 3:  $y_3=y, y_1=y_2=0$  равно 18,3% и 13,7%, соответственно.

На рис.9 представлены зависимости относительного суммарного потока  $\Sigma L/\Sigma L_0$  от безразмерной величины  $y/\ln^2(q_0)$  для различных значений концентрации целевого компонента в потоке отбора (30% и 5%) в случае учета потерь одновременно в узлах, коммуникациях обогащенной и обедненной фракции ( $y_1=y_2=y_3=y$ ). Из полученных зависимостей следует, что тем выше концентрация целевого компонента в потоке отбора, тем сильнее потери влияют на характеристики каскада. Причем при заданной концентрации целевого компонента и заданном коэффициенте извлечения существует предельное значение коэффициента потерь  $y_{\max}$ , при котором суммарный поток стремится к бесконечности. В данном случае  $y_{\max}/\ln^2(q_0)=0,081$  при  $C_{3P}=30\%$ ,  $Rec=60\%$ , и  $y_{\max}/\ln^2(q_0)=0,201$  при  $C_{3P}=5\%$ ,  $Rec=60\%$ .

В четвертой главе представлена оригинальная методика расчета ПК, позволяющая учитывать потери рабочего вещества одновременно в узлах и коммуникациях каскада. Исследовано влияние потерь рабочего вещества на характеристики ПК. В качестве примера проведены расчеты ПК при обогащении изотопа  $^{180}\text{W}$  из пятикомпонентной смеси изотопов вольфрама природного состава. При расчете за исходные приняты следующие параметры каскада:  $N=50, f=16, q_0=1,16306$ .

На рис.10 представлена зависимость относительного отклонения концентраций целевого компонента ( $^{180}\text{W}$ ) в потоке отбора  $(C_{1P}-C_{1P}^*)/C_{1P}$  от величины отношения потоков  $P/L$  и  $W/L$  для различных вариантов учета потерь в ПК ( $C_{1P}$ —концентрация целевого компонента в отсутствие потерь, а  $C_{1P}^*$ —при наличии потерь). Поверхность 1 соответствует учету потерь в коммуникациях обедненной фракции ( $y_3=y, y_1=y_2=0$ ); поверхность 2 – учету

потерь в узлах каскада ( $y_1=y, y_2=y_3=0$ ); а поверхность 3 – учету потерь одновременно в узлах каскада и коммуникациях обогащенной и обедненной фракций ( $y_1=y_2=y_3=y$ ). В расчетах коэффициент потерь был принят равным

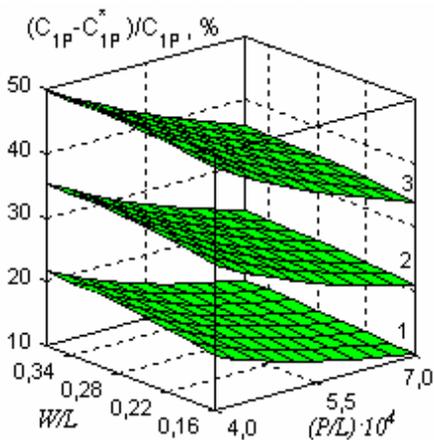


Рис.10. Зависимость относительного отклонения концентраций целевого компонента ( $^{180}\text{W}$ ) в потоке отбора  $(C_{IP}-C_{IP}^*)/C_{IP}$  от отношения потоков  $P/L$  и  $W/L$  для различных вариантов учета потерь в прямоугольном каскаде.

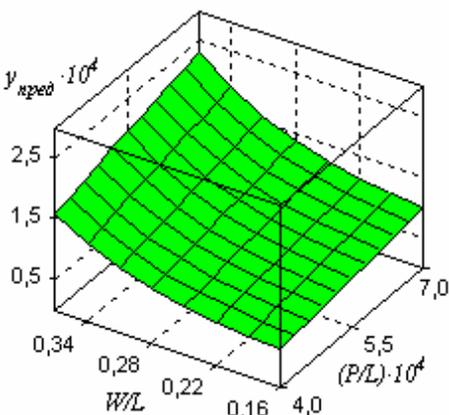


Рис.11. Зависимость предельной величины коэффициента потерь  $y_{пред}$  от отношения потоков  $P/L$  и  $W/L$  при учете потерь одновременно в узлах каскада и коммуникациях обогащенной и обедненной фракций ( $y_1=y_2=y_3=y$ ).

$y=5 \cdot 10^{-5}$ . Расчеты показывают, что с уменьшением потока отбора (увеличением потока отвала) влияние потерь становится все более существенным. Это объясняется тем, что потери рабочего вещества играют роль «паразитного» отбора. Так, например, в случае 3 ( $y_1=y_2=y_3=y$ ) при  $P/L=7 \cdot 10^{-4}$ ,  $W/L=0,16$  относительное отклонение концентрации целевого компонента составляет  $(C_{IP}-C_{IP}^*)/C_{IP} \times 100\% = 34\%$ ; а при  $P/L=4 \cdot 10^{-4}$ ,  $W/L=0,36$ ,  $(C_{IP}-C_{IP}^*)/C_{IP} \times 100\% = 50\%$ .

Установлена предельная величина коэффициента потерь  $y_{пред}$ , которую позволяет учесть разработанный алгоритм. Она зависит от точности получаемого решения и величин потоков отбора и отвала в каскаде. На рис.11 представлена зависимость  $y_{пред}$  от величин  $P/L$  и  $W/L$  при учете

потерь одновременно в узлах каскада и коммуникациях обогащенной и обедненной фракций при разделении изотопов вольфрама природного состава для заданной точности решения  $\delta = 10^{-5}$ . Видно, что величина  $y_{пред}$  падает с уменьшением потоков отбора и отвала. Так при  $P/L = 7 \cdot 10^{-4}$ ,  $W/L = 0,36$  предельная величина коэффициента потерь  $y_{пред}$  составляет  $2,32 \cdot 10^{-4}$ ; а при  $P/L = 4 \cdot 10^{-4}$ ,  $W/L = 0,16$  не превышает  $6,13 \cdot 10^{-5}$ .

### **Основные результаты диссертационной работы**

1. Получены асимптотические формулы для расчёта концентраций целевого компонента в потоках отбора и отвала из ординарного квазиидеального каскада с немалыми обогащениями на ступенях, позволяющие определить область допустимых значений концентраций целевого компонента в потоках отбора и отвала.
2. Проведена оптимизация квазиидеального каскада по концентрации целевого компонента в потоке отвала  $C_{nW}$  и параметру  $M^*$ , определяющему относительную концентрацию пары компонентов, по которой имеет место несмещение в узлах каскада. Установлено, что при фиксированных концентрациях целевого компонента в потоках отбора и отвала существует оптимальное значение параметра  $M^*$ , при котором суммарный поток минимален. Показано, что при заданном значении параметра  $M^*$  для каждого значения концентрации целевого компонента в потоке отбора существует оптимальное значение концентрации целевого компонента в потоке отвала, при котором суммарный поток имеет минимальное значение.
3. Теория квазиидеального каскада для разделения многокомпонентных изотопных смесей с произвольными обогащениями на ступенях каскада обобщена на случай дополнительных внешних потоков питания или отбора. Получены аналитические выражения для расчета суммарного потока и распределений концентраций компонентов в таком каскаде.
4. Возможности разработанной теории продемонстрированы на примерах решения задач о дообогащении регенерированного топлива в квазиидеальном каскаде с дополнительным питанием и получении промежуточного компонента в потоке дополнительного отбора с

- концентрацией выше, чем в концевом отборе.
5. Получены аналитические выражения для расчета суммарного потока и распределений концентраций компонентов в квазиидеальном каскаде с дополнительным потоком питания при наличии потерь рабочего вещества на ступенях.
  6. Разработан эффективный алгоритм расчета ПК с произвольным обогащением на ступенях, позволяющий учитывать потери рабочего вещества одновременно в узлах и коммуникациях каскада. Предложенный метод не требователен к заданию начальных приближений, характеризуется быстрой и устойчивой сходимостью итерационного процесса.
  7. Проведено численное исследование влияния потерь рабочего вещества на процесс разделения многокомпонентной изотопной смеси в ПК. Определена предельная величина коэффициента потерь  $y_{пред}$ , которая может быть учтена с помощью разработанного алгоритма и исследована ее зависимость от величин потоков отбора и отвала в прямоугольного каскада.

**Основные результаты опубликованы в следующих работах:**

1. Borisevich V.D., Petrov V.I., Sulaberidze G.A., Quanxin Xie, Some isotope separation problems in spent fuel processing. / Proc. XIXth Int. Symp. Phys.-Chem. Methods of the Mixtures Separation, "Ars Separatoria 2004", Zloty Potok, Poland, June 10-13, 2004, pp.169-174.
2. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се, О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл. / Труды 9-ей Всероссийский (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», г. Звенигород, Россия, 4-8 октября 2004, Сборник докладов, с.78-85.
3. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се, R-каскад дополнительным внешним потоком и произвольными обогащениями на ступенях. / Научная сессия МИФИ-2005, Сборник научных трудов, с.27-28.

4. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се, Исследование закономерностей стационарного массопереноса в разделительных каскадах при дообогащении регенерированного урана. // Инженерная физика, 2005, №3, с.15-19.
5. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се, Асимптотический подход к анализу обогащения компонентов с промежуточными массами в квазиидеальном каскаде. / Труды 10-ой Всероссийской (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», г. Звенигород, Россия, 3-7 октября 2005, с.31-36.
6. Quansin Xie, Sulaberidze G.A., Borisevich V.D, Some properties of quasi-ideal cascades with losses at stages, / Proc. XX Intl. Symposium on Phys.-Chem. Methods of the Mixtures Separation, “Ars Separatoria 2005”, Szklarska Poreba, Poland, June 20-23, 2005, pp.205-207.
7. Цюаньсинь Се, Борисевич В.Д., Потапов Д.В., Сулаберидзе Г.А., Разделение многокомпонентных изотопных смесей в прямоугольном каскаде с потерями рабочего вещества. // Инженерная физика, 2006, №2, с.30-34.
8. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се, Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей. // Теор. основы хим. технологии, 2006, т.40, №1, с.7-16.
9. Сулаберидзе Г.А., Потапов Д.В., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се, Особенности обогащения компонентов с промежуточной массой в квазиидеальном каскаде. // Атомная энергия, 2006, т.100, вып.1, с.51-56.
10. Potapov D.V., Quansin Xie, Sulaberidze G.A., Borisevich V.D, Calculation of multistage separation installations with losses of working substance. / Proc. XXI Intl. Symposium on Phys.-Chem. Methods of the Mixtures Separation, “Ars Separatoria 2006”, Torun, Poland, July 2-5, 2006, pp.114-116.
11. Sulaberidze G.A., Xie Quanxin, Borisevich V.D., On some properties of quasi-ideal cascades with losses at stages. // Ars Separatoria Acta, 2006, No4, pp.67-77.
12. Цюаньсинь Се, Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Оптимизация модельных каскадов для разделения многокомпонентных изотопных

смесей. / Труды 11-ой Всероссийский (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», г. Звенигород, Россия, 11-15 декабря 2006, Сборник докладов, с.15-20.