

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»
Физико-технологический институт
Кафедра технической физики

На правах рукописи

Маслюков Евгений Владимирович

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ
БИНАРНОЙ И МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСЕЙ ИЗОТОПОВ УРАНА**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Палкин Валерий Анатольевич

Екатеринбург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1.ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ	12
1.1. Модельные каскады для разделения бинарных смесей изотопов ..	12
1.1.1. Параметры и уравнения ординарного каскада	12
1.1.2. Идеальный каскад	14
1.1.3. Оптимальный каскад при произвольно заданных коэффициентах разделения ступеней	16
1.1.4. Оптимальный каскад газовых центрифуг	18
1.1.5. Оптимизация каскадов газовых центрифуг с произвольной схемой соединения ступеней.....	19
1.2. Модельные каскады для разделения многокомпонентных смесей изотопов	21
1.2.1. Параметры и уравнения ординарного каскада	21
1.2.2. Квазиидеальный каскад.....	23
1.2.3. R-каскад.....	25
1.2.4. Q-каскад	26
1.2.5. Оптимизация каскада с заданными внешними концентрациями целевого изотопа	28
1.2.6. Расчет и оптимизация каскадов с несколькими питаниями по срезам парциальных потоков	30
1.2.7. Оценка содержания минорных изотопов урана в каскадах, оптимизированных по ^{235}U	32

1.2.8. Оптимизация каскадов газовых центрифуг для разделения регенерированного урана	34
1.3. Восстановление изотопного состава регенерированного урана в каскадах	36
1.3.1. Сравнительная характеристика регенерированного урана.....	36
1.3.2. Обогащение регенерированного урана с разбавлением природным сырьем и отвальным ураном	37
1.3.3. Восстановление изотопного состава в отдельном каскаде.....	38
1.3.4. Восстановление изотопного состава в двойных каскадах.....	39
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОПОТОЧНЫХ КАСКАДОВ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ УРАНА	40
2.1. Моделирование многопоточного каскада газовых центрифуг для разделения бинарной смеси изотопов урана.....	40
2.1.1. Модель каскада газовых центрифуг для разделения $^{235}, ^{238}\text{U}$	40
2.1.2. Оптимизация и подбор параметров каскада	44
2.1.3. Расчет характеристик эффективности	46
2.1.4. Компьютерный тренажер «Каскад газовых центрифуг»	47
2.1.5. Задачи для обучения персонала.....	52
2.2. Моделирование систем каскадов газовых центрифуг методом матричного описания связей ступеней в общей схеме	53
2.2.1. Особенности расчета и оптимизации системы каскадов.....	54
2.2.2. Результаты моделирования систем каскадов газовых центрифуг	55

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ МНОГОПОТОЧНЫХ КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ УРАНА 60

3.1. Аналитическая оценка содержания минорных изотопов урана в каскадах, оптимизированных на обогащение ^{235}U 60

3.1.1. Основные параметры и уравнения каскада 60

3.1.2. Решение задачи оптимизации 63

3.1.3. Исследование свойств модельных каскадов 65

3.2. Аналитическая оценка содержания изотопов слабообогащенного регенерированного урана в каскадах, оптимизированных на обогащение одного из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$ 67

3.2.1. Описание модели 67

3.2.2. Решение задачи оптимизации 68

3.2.3. Исследование свойств модельных каскадов 70

3.3. Расчет каскада с несколькими питаниями и отборами по срезам парциальных потоков 72

3.3.1. Основные параметры и уравнения модели 72

3.3.2. Расчет параметров каскада 74

3.4. Оптимизация каскадов по срезам парциальных потоков 77

3.4.1. Оптимизация каскада по критерию максимума разделительной способности 77

3.4.2. Оптимизация каскада при заданных концентрациях целевого компонента 80

ГЛАВА 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА В КАСКАДАХ.....	82
4.1. Очистка регенерированного урана в дополнительном отборе R-каскада и его обогащение в ординарном каскаде.....	82
4.1.1. Исходные данные для расчета каскадов.....	82
4.1.2. Результаты расчета каскадов	83
4.2. Очистка регенерированного гексафторида урана в двухкаскадной схеме при обогащении ^{235}U менее 5%	88
4.2.1. Общие принципы построения схем каскадов	88
4.2.2. Двойной каскад с питанием второго каскада отвалом первого ..	89
4.2.3. Двойной каскад с питанием второго каскада отбором первого..	91
4.3. Очистка регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с двумя питаниями	95
4.3.1. Очистка с использованием на втором питании природного гексафторида урана	95
4.3.2. Очистка с использованием на втором питании отвального гексафторида урана	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	105
Приложение А. Примеры контрольных вопросов.....	115
Приложение Б. Описание задач обучения.....	121
Приложение В. Акт внедрения программы.....	126
Приложение Г. Справка об использовании программы в ТПУ.	127
Приложение Д. Справка об использовании программы в НИЯУ МИФИ. .	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы. Классическая теория бинарного разделения изотопов урана ^{235}U , ^{238}U в ординарных каскадах была разработана Козном [1]. Она ориентирована на оптимизацию процесса разделения природного гексафторида урана и в основном на первый промышленный способ – газодиффузионный. В дальнейшем, при переходе к центрифужному способу методы расчета каскадов были дополнены и развиты в различных работах [2 – 7], а также в оригинальных разработках на разделительных заводах. Эти методы позволяют решать задачи расчета каскадов при их оптимизации на обогащение по ^{235}U .

На питании каскадов разделительных заводов помимо природного гексафторида урана используется регенерированный и отвальный, которые в значительной мере могут содержать ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U . Наличие этих изотопов в гексафториде урана и потребность в стабильных изотопах привели к разработке методов расчета каскадов для разделения многокомпонентных смесей [4, 8 – 12]. Однако остались нерешенными ряд задач, в основном для многопоточных каскадов, имеющих несколько питаний различным сырьём и несколько отборов. Другим направлением развития каскадной тематики является изотопное восстановление регенерированного гексафторида урана по ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U . Существующие каскадные методы [13 – 32] имеют различные недостатки, затрудняющие их использование.

Разделительным предприятиям необходим квалифицированный персонал, понимающий физические принципы обогащения урана в каскадах газовых центрифуг. Для их успешного освоения и применения на практике целесообразна разработка компьютерных программ-тренажеров. Разработка и внедрение таких программ – важный аспект развития атомной промышленности.

Целью данной работы является создание новых методов расчета и оптимизации разделения бинарных и многокомпонентных смесей изотопов урана

в многопоточных каскадах, разработка новых методов восстановления изотопного состава регенерированного урана. Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**.

- Разработать численные методы оптимизации процессов разделения бинарной смеси изотопов урана в многопоточных каскадах и системах каскадов газовых центрифуг;
- Разработать аналитический метод оценки содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по ^{235}U ;
- Разработать аналитический метод оценки содержания многокомпонентной смеси слабообогащенного регенерированного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по одному из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$;
- Разработать численный метод расчета и оптимизации каскадов с произвольным количеством потоков питания и отбора по парциальным потокам компонентов смеси;
- Провести численные эксперименты по апробации разработанных методов и проанализировать полученные результаты в сравнении с известными;
- На основе созданных численных и аналитических способов расчета и оптимизации многопоточных каскадов разработать различные методы очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- Разработаны численные методы оптимизации процессов разделения бинарной смеси изотопов урана в многопоточных каскадах газовых центрифуг, предназначенные для проведения технологических расчетов и обучения персонала разделительных предприятий;
- Разработан метод оптимизации систем каскадов газовых центрифуг для разделения бинарных смесей изотопов на основе матричного описания связей ступеней в общей схеме;

- Разработан аналитический метод оценки содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по ^{235}U ;
- Разработан аналитический метод оценки содержания многокомпонентной смеси слабообогащенного регенерированного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по одному из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$;
- Разработан численный метод расчета и оптимизации каскадов с произвольным количеством потоков питания и отбора по парциальным потокам компонентов смеси;
- Разработан метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}\text{U}$ в дополнительном потоке отбора *R*-каскада;
- Разработан и запатентован метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в двойных каскадах с одновременной наработкой низкообогащенного урана из природного;
- Разработан метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с использованием на втором питании природного или отвального урана.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

- Компьютерная программа «Каскад газовых центрифуг», разработанная для оптимизации разделения бинарной смеси изотопов урана, в опытном порядке использовалась при проведении технологических расчетов схем каскадов на ОАО «Сибирский химический комбинат»;
- На основе разработанных методов оптимизации создан компьютерный тренажер, применявшийся для обучения технологического персонала разделительных производств на ОАО «Уральский электрохимический комбинат», ОАО «Сибирский химический комбинат», АО «Ангарский электролизный химический комбинат», АО «ПО Электрохимический завод»;

- Аналитические методы позволяют без детальных расчетов оптимальных многопоточных каскадов оценить состав многокомпонентной смеси изотопов урана в отборных и отвальном потоках;
- Численный метод оптимизации систем каскадов газовых центрифуг для разделения бинарных смесей изотопов позволяет определить и оптимизировать по различным критериям внешние и внутренние параметры;
- Разработанная на основе аналитических методов компьютерная программа используется при подготовке магистратов направления «Ядерные физика и технологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета;
- Разработанная на основе аналитических методов компьютерная программа использовалась в Институте нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике на кафедре молекулярной физики НИЯУ МИФИ при подготовке студентов-специалистов по направлению «Технологии разделения изотопов и ядерное топливо» по профилю «Технологии разделения изотопов»;
- Разработанные методы очистки регенерированного урана могут быть эффективно использованы на разделительных предприятиях.

Методология и методы диссертационного исследования. При достижении цели и для решения задач исследования использовался анализ и обобщение данных научно-технической литературы. Аналитическое и численное моделирование процессов разделения смесей изотопов урана проводилось с использованием специально разработанных компьютерных программ. Результаты расчетов и оптимизации модельных каскадов сравнивались с результатами, полученными другими исследователями.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод оптимизации систем каскадов газовых центрифуг для разделения бинарных смесей изотопов, разработанный на основе матричного описания связей ступеней в общей схеме;

- Метод оптимизации разделения бинарной смеси изотопов урана в каскадах газовых центрифуг, разработанный для проведения технологических расчетов и обучения персонала разделительных предприятий;
- Метод аналитического расчета содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по изотопу ^{235}U ;
- Метод аналитического расчета содержания многокомпонентной смеси слабообогащенного регенерированного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по одному из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$;
- Метод численного расчета и оптимизации каскадов с произвольным количеством потоков питания и отбора по парциальным потокам компонентов смеси;
- Способ очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}\text{U}$ в дополнительном потоке отбора R-каскада;
- Способ очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в двойных каскадах с одновременной наработкой низкообогащенного урана;
- Способ очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с использованием на втором питании природного или отвального урана.

Достоверность полученных результатов следует из корректности постановки задач, физической обоснованности принятых приближений и применяемых физико-математических моделей, использования разработанных методов оптимизации в технологических расчетах, а также из соответствия результатов аналитических и численных экспериментов.

Апробация результатов. Получен патент РФ №2613157 от 15.03.2017 на способ очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в двойных каскадах.

Результаты, изложенные в материалах диссертации, доложены и обсуждены на конференциях:

- XII Международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», Звенигород, 2008 г.;
- 12th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Paris, France, 2012 г.;
- I Международная молодежная научная конференция, посвященная 65-летию основания Физико-технологического института. Екатеринбург, 2014 г.;
- II Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации». Екатеринбург, 2015 г.;
- International Workshop on The Physical Chemical Processes at Atomic Systems, Moscow, Russia, 2015 г.;
- 14th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Stresa, Italy, 2017 г.;

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 8 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Web of Science и Scopus. Автор принимал участие в проекте по гранту РФФИ 16-08-00161 А "Восстановление изотопного состава регенерированного урана" в 2016 – 2018 гг.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

1.1. Модельные каскады для разделения бинарных смесей изотопов

Основные положения теории разделения бинарных смесей изотопов разработаны в связи с проблемой обогащения урана Коэном, Бриголли, Пигфордом, Бенедиктом, Апельблатом, Жигаловским, Скорыниным, Колокольцовым, Сазыкиным, Сулаберидзе и другими авторами [1 – 7, 33 – 36].

1.1.1. Параметры и уравнения ординарного каскада

На рисунке 1.1 показана схема противоточного симметричного ординарного (трехпоточного) каскада, использующаяся на практике для разделения изотопов урана.

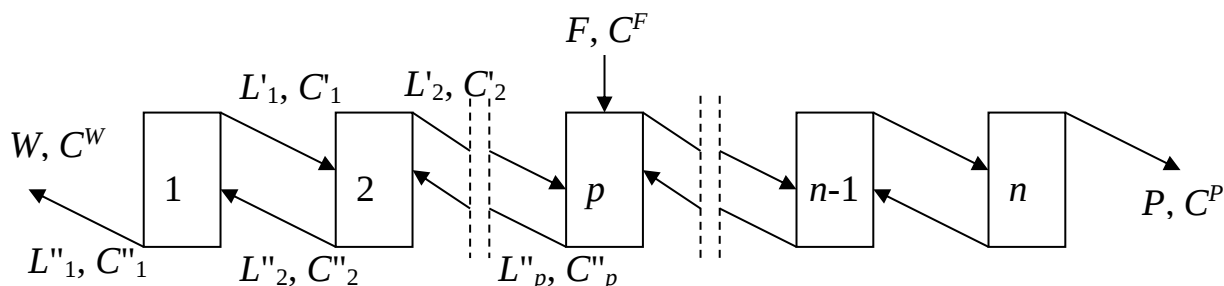


Рисунок 1.1 – Схема противоточного симметричного каскада для
разделения бинарной смеси изотопов

Фракция ступени, обогащенная целевым легким изотопом, называется отбором, обедненная – отвалом. На схеме обозначены: концентрация легкого изотопа – C с индексами от 1 до n , соответствующими номеру ступени. Концентрация второго изотопа равна $1 - C$. Поток питания, отбора и отвала j -й ступени – L_j , L'_j и L''_j . Концентрации целевого изотопа в потоках питания, отбора и отвала j -й ступени – C_j , C'_j и C''_j . Поток отвала каскада – W , поток отбора – P , поток

питания – F . Концентрации целевого изотопа во внешних потоках отвала, питания и отбора каскада – C^W , C^P , C^F соответственно, p – номер ступени подачи питания каскада. Потоки и концентрации связаны между собой балансовыми уравнениями, разделительными характеристиками и граничными условиями.

Внешние параметры каскада при отсутствии потерь удовлетворяют балансовым уравнениям для рабочего вещества:

$$F = W + P, \quad (1.1)$$

для легкого изотопа:

$$FC^F = WC^W + PC^P. \quad (1.2)$$

Аналогичные уравнения выполняются для внутренних параметров. Потоки и концентрации каждой ступени удовлетворяют соотношениям

$$L'_j + L''_j = L_j, j = \overline{1, n}, \quad (1.3)$$

$$L'_j C'_j + L''_j C''_j = L_j C_j, j = \overline{1, n}. \quad (1.4)$$

Балансовые связи потоков между ступенями характеризуются уравнениями

$$L_1 = L''_2, L_2 = L'_1 + L''_3, \dots, L_p = L'_{p-1} + L''_{p+1} + F, \dots, L_n = L'_{n-1}; \quad (1.5)$$

$$L_1 C_1 = L''_2 C''_2, L_2 C_2 = L'_1 C'_1 + L''_3 C''_3, \dots, L_p C_p = L'_{p-1} C'_{p-1} + L''_{p+1} C''_{p+1} + FC^F, \dots, \\ L_n C_n = L'_{n-1} C'_{n-1}. \quad (1.6)$$

Разделительные характеристики задаются для каждой ступени в общем случае зависимостью полного коэффициента разделения q_j от потока питания разделительного элемента l_j и коэффициента деления потока θ_j : $q_j = q_j(l_j, \theta_j)$. Полные коэффициенты разделения ступеней согласно определению равны

$$q_j = \frac{C'_j}{1 - C'_j} / \frac{C''_j}{1 - C''_j}, j = \overline{1, n}. \quad (1.7)$$

Аналогично определяются коэффициенты разделения по обогащенной и обедненной фракциям:

$$\alpha_j = \frac{C'_j}{1 - C'_j} / \frac{C_j}{1 - C_j}, \quad \beta_j = \frac{C_j}{1 - C_j} / \frac{C''_j}{1 - C''_j}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.8)$$

Кроме того, для описания процесса разделения удобно пользоваться полными коэффициентами обогащения $\varepsilon_j = q_j - 1$.

Коэффициенты деления потока θ_j и потоки питания разделительных элементов ступеней l_j определяются по формулам

$$\theta_j = \frac{L'_j}{L_j}, \quad l_j = \frac{L_j}{N_j}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.9)$$

где N_j – количество разделительных элементов в j -й ступени.

Внешние и внутренние параметры каскада связаны граничными условиями

$$L''_1 = W, \quad C''_1 = C^W, \quad L'_n = P, \quad C'_n = C^P. \quad (1.10)$$

Общее количество основных параметров каскада составляет $10n+8$. С учетом определений и балансовых уравнений каскад имеет $2n+4$ независимых параметров. В качестве независимых параметров при расчете обычно выбирают внешние концентрации, поток питания (или отбора) и $2n$ внутренних параметров.

1.1.2. Идеальный каскад

Идеальным называется каскад, в котором отсутствуют потери работы разделения от смешения потоков с различными концентрациями [1]. Для противоточного симметричного каскада, представленного на рисунке 1.1, это означает выполнение условий несмешения:

$$C_p = C^F, \quad C''_{j+1} = C'_{j-1} = C_j, \quad j = \overline{2, n-1}. \quad (1.11)$$

При заданных концентрациях питания каскада и в одном из внешних потоков с учетом (1.11) остается свободным один параметр, который определяет тип идеального каскада – симметричный или несимметричный.

Идеальный каскад обычно рассматривается в теории разделения при постоянных полных коэффициентах разделения ступеней $q_j = q$. При этом считается, что все разделительные элементы работают при одинаковых потоках питания. Поэтому количества разделительных элементов N_j пропорциональны потокам питания ступеней.

Для расчета параметров идеального каскада необходимо задать n , p и q . Условия (1.11) означают, что коэффициенты разделения по обогащенной и обедненной фракциям двух соседних ступеней равны:

$$\alpha_j = \beta_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}. \quad (1.12)$$

Если полные коэффициенты разделения всех ступеней одинаковы, то выбор симметричного разделения $\alpha_1 = \beta_1$ первой ступени приводит к одинаковым α и β для всех ступеней:

$$\alpha = \beta = \sqrt{q}. \quad (1.13)$$

Соотношение (1.13) определяет идеальный каскад с симметричными ступенями. Это основной тип идеального каскада, введенный Коэном. Его особенностью является то, что концентрации отбора и отвала каскада не могут быть выбраны произвольно. Они вычисляются по заданной концентрации питания C^F , n , p и q .

При выбранном одном внешнем потоке, остальные потоки находятся из уравнений баланса, а потоки питания ступеней определяются в виде

$$L_j = \begin{cases} \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1} W \frac{C_j - C^W}{C_j(1 - C_j)}, & j = \overline{1, p-1}, \\ \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1} P \frac{C^P - C_j}{C_j(1 - C_j)}, & j = \overline{p, n}. \end{cases} \quad (1.14)$$

По потокам питания ступеней и заданному потоку l , одинаковому для всех разделительных элементов каскада, рассчитываются количества разделительных элементов в соответствии с (1.9).

Суммирование потоков приводит к формуле для разделительной способности каскада, которую называют эффективной

$$E = \sum_{j=1}^n L_j \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \ln \alpha. \quad (1.15)$$

Слева в полученном соотношении стоит

$$E = PV(C^P) + WV(C^W) - FV(C^F), \quad (1.16)$$

где потенциал разделения $V(C)$ введен в работе [1] в виде

$$V(C) = (2C - 1) \ln \frac{C}{1 - C}. \quad (1.17)$$

Справа под знаком суммирования стоит разделительная способность ступени. Отсюда следует, что в идеальном каскаде эффективная разделительная способность равна суммарной разделительной способности ступеней.

Коэффициенты деления потока ступеней удовлетворяют соотношению

$$\theta_j = \frac{1 + (\alpha - 1)C_j}{\alpha + 1}. \quad (1.18)$$

По найденным значениям θ_j и L_j определяются потоки отбора и отвала ступеней.

При одинаковых полных коэффициентах деления q и $\alpha_1 \neq \beta_1$ получается идеальный каскад с несимметричными ступенями. Он характеризуется двумя значениями коэффициентов деления α_j, β_j , повторяющимися через ступень. При определенном выборе n, p и β_j можно обеспечить одну из требуемых внешних концентраций отбора или отвала. Расчет параметров каскада можно произвести аналогично каскаду с симметричными ступенями.

Идеальный каскад в случае слабого деления совпадает с оптимальным по критерию минимального суммарного потока. При произвольных обогащениях и заданных внешних концентрациях целевого изотопа между ними возникают существенные различия.

Основным недостатком идеального каскада при разделении изотопов урана является невозможность обеспечения заданных концентраций на отборе и отвале.

1.1.3. Оптимальный каскад при произвольно заданных коэффициентах деления ступеней

Согласно [33], оптимальный каскад с заданными внешними концентрациями целевого изотопа, рассчитанный по критерию минимума суммарного потока, является смешивающим. Наибольшее смешение наблюдается в ступени подачи питания.

В схеме расчета, предложенной в работе [33], заданы F , C^F , C^P , C^W и коэффициенты разделения q_j . Количества разделительных элементов считаются пропорциональными потокам питания ступеней. К варьируемым параметрам относятся потоки отвала ступеней $L''_2, L''_3, \dots, L''_n$, а также n и p .

Расчет концентраций отбора и отвала ступеней производится, начиная с первой ступени по рекуррентным формулам

$$C''_1 = C^W, \quad C'_j = \frac{q_j C''_j}{1 + (q_j - 1)C''_j}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.19)$$

$$C''_j = C'_{j-1} \left(1 - \frac{\tau'_j}{L''_j} \right) + \frac{\tau'_{lj}}{L''_j}, \quad j = \overline{2, n}. \quad (1.20)$$

Здесь τ'_j , τ'_{lj} – транзитные потоки вещества и легкого изотопа в сторону отвала каскада, равные

$$\begin{aligned} \tau'_j &= W, \quad \tau'_{lj} = WC^W, \quad j \leq p, \\ \tau'_j &= -P, \quad \tau'_{lj} = -PC^P, \quad j > p. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Аналогичным образом через транзитные потоки вычисляются неизвестные потоки ступеней. При этом используются соотношения:

$$L''_j - L'_{j-1} = \tau'_j, \quad j = \overline{2, n}. \quad (1.22)$$

Расчет заканчивается определением концентрации отбора последней ступени. При правильном выборе варьируемых параметров расчетная концентрация C''_n должна совпадать с заданным значением C^P . Количество ступеней и номер ступени подачи внешнего питания определяются перебором.

Если коэффициенты разделения q_j заданы константами, то задача оптимизации по критерию минимума суммарного потока ступеней для каждого набора n и p сводится к перебору значений L''_2 и последующему расчету остальных потоков отвала ступеней по формуле

$$L''_j = \frac{\tau'_j}{2} + \sqrt{\left(\frac{\tau'_j}{2}\right)^2 + \varphi_{j-1}(L''_{j-1})^2}, \quad j = \overline{3, n}. \quad (1.23)$$

где

$$\varphi_{j-1} = \frac{\tau'_j C'_{j-1} - \tau'_{lj} C''_{j-1} (1 - C''_{j-1})}{\tau'_{j-1} C'_{j-2} - \tau'_{lj-1} C'_{j-1} (1 - C'_{j-1})}, \quad j = \overline{3, n}. \quad (1.24)$$

Поток отвала второй ступени L''_2 отвечает за «сшивку» концентраций на отборе каскада. Можно показать, что зависимость C'_n от L''_2 возрастающая. Отсюда следует единственность значения L''_2 , удовлетворяющего условию $C'_n = C^P$.

Оптимальный каскад, рассчитанный с использованием соотношений (1.19) – (1.24), будет иметь меньший суммарный поток по сравнению с идеальным.

Основным недостатком модели является упрощение, которое предполагает, что потоки питания газовых центрифуг одинаковы, а значит, их количество в ступенях N_j пропорционально потокам питания ступеней L_j .

1.1.4. Оптимальный каскад газовых центрифуг

В работе [34] рассмотрена задача оптимизации каскада газовых центрифуг. В качестве критерия эффективности используется минимум суммарного количества газовых центрифуг. В этом случае в список параметров для оптимизации включены $n, p, N_2, N_3, \dots, N_n, L''_2, L''_3, \dots, L''_n$, а N_1 отвечает за сшивку концентраций на отборе каскада. При условии, что количество газовых центрифуг в каждой из ступеней относительно велико, можно пренебречь дискретностью N_j . Для оптимизации используются расчетные соотношения

$$\frac{1}{q_j} \frac{\partial q_j}{\partial N_j} = \frac{C'_{j-1} (1 - C'_{j-1})}{C''_{j-1} (1 - C''_{j-1})} \frac{L'_{j-1}}{L''_j} \frac{1}{q_{j-1}} \frac{\partial q_{j-1}}{\partial N_{j-1}}, \quad j = \overline{2, n}, \quad (1.25)$$

$$\frac{1}{q_j} \frac{\partial q_j}{\partial L''_j} = - \frac{1}{C''_{j-1} (1 - C''_{j-1})} \frac{\partial C''_{j-1}}{\partial L''_j}, \quad j = \overline{2, n}, \quad (1.26)$$

где

$$\frac{\partial C''_j}{\partial L''_j} = C'_{j-1} (1 - C'_{j-1}) \frac{L'_{j-1}}{L''_j} \frac{1}{q_{j-1}} \frac{\partial q_{j-1}}{\partial L''_j} + \frac{\tau'_j C'_{j-1} - \tau'_{lj}}{(L''_j)^2}. \quad (1.27)$$

В этих соотношениях производные q_j по N_j определяются заданной зависимостью $q_j = q_j(l_j, \theta_j)$.

Приведенные выражения могут быть обобщены на случай нескольких внешних потоков питания. Для этого необходимо скорректировать уравнения для транзитных потоков и ввести в расчетные соотношения номера ступеней подачи питания.

В работе [34] задается зависимость полного коэффициента разделения газовой центрифуги от потока питания и коэффициента деления потока в виде

$$q = \exp(a_0 + a_1 \theta - a_2 \theta^2) l^{-a_3}, \quad (1.28)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – положительные коэффициенты, определяемые исходя из стендовых испытаний газовых центрифуг. Алгоритм оптимизации каскада по критерию минимума суммарного количества газовых центрифуг сводится к численному перебору L''_2 и N_1 с аналитическим вычислением внутренних параметров каскада по ступеням. При этом наилучшие значения n и p могут быть найдены перебором в относительно узком диапазоне значений.

Рассмотренный способ оптимизации эквивалентен минимизации суммарного потока ступеней только при условии работы центрифуг в строго заданных одинаковых по потоку газа режимах. Если условие одинаковости режимов не действует, решения указанных задач могут заметно отличаться. Условием применимости метода является большое число газовых центрифуг при сравнительно малом количестве ступеней в каскаде.

Основным недостатком указанной модели является невозможность ее распространения на расчет каскадов с заданным количеством газовых центрифуг в ступенях.

1.1.5. Оптимизация каскадов газовых центрифуг с произвольной схемой соединения ступеней

В работе [37] предложен метод расчета оптимальных параметров противоточных каскадов при различных схемах соединения ступеней и целевых функциях оптимизации. На основе вычислительного эксперимента

проанализированы условия наиболее эффективного применения несимметричных схем. Разработанный метод был обобщен в работе [38] на случай коэффициентов разделения, зависящих от потока питания газовых центрифуг и коэффициента деления потока.

Связи потоков ступеней в схеме выражаются с помощью матриц α и β размерностью $n \times n$. Элемент α_{ij} определяет какая часть отбора j -й ступени попадает на питание i -й ступени, элемент β_{ij} – аналогичную часть отвала. Для каскада, соединенного по противоточной симметричной схеме, матрицы α и β при $n = 5$ имеют следующий вид:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \beta = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

С помощью введенных матриц уравнения связей потоков в схеме каскада переписываются в универсальном виде

$$L_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} L'_j + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} L''_j + \mu_i; \quad L_i C_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} L'_j C'_j + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} L''_j C''_j + \lambda_i, \quad (1.29)$$

где $\mu_i = F$, $\lambda_i = FC^F$ при $i = p$ и $\mu_i = 0$, $\lambda_i = 0$ при $i \neq p$.

Если заданы внешние параметры каскада и схема соединения ступеней, то при выборе критерия эффективности возникает задача оптимизации $2n$ внутренних переменных. В качестве них удобно принять конструкционные параметры n , p , полные коэффициенты разделения q_i , ($i = \overline{1, n}$) и концентрации отвала ступеней C''_i , ($i = \overline{2, n-1}$).

В обобщенном виде целевую функцию оптимизации внутренних переменных можно записать как

$$\Psi = \Psi(n, p, q_1, \dots, q_n, C''_2, \dots, C''_{n-1}) \rightarrow \min, \quad (1.30)$$

где Ψ – суммарное количество газовых центрифуг или другая характеристика.

При заданных значениях параметров оптимизации потоки отбора и отвала ступеней рассчитываются с помощью матричных уравнений

$$L_i'' = - \sum_{k=1}^n D_{ik} B_k, \quad L_i' = \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} L_k'' + \delta_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1.31)$$

где

$$D = A^{-1}; \quad A_{ik} = \sum_{j=1}^n \alpha'_{ij} \gamma_{jk} \frac{q_j C_j''}{C_j''(q_j - 1) + 1} + \beta'_{ik} C_k''; \quad (1.32)$$

$$B_i = \lambda_i + \sum_{j=1}^n \alpha'_{ij} \frac{q_j C_j''}{C_j''(q_j - 1) + 1} \delta_j;$$

$$\gamma = -(\alpha')^{-1} \beta'; \quad \delta = -(\alpha')^{-1} \mu; \quad \alpha' = \alpha - E; \quad \beta' = \beta - E. \quad (1.33)$$

Здесь E – единичная матрица. Остальные параметры каскада, в частности, количество газовых центрифуг N_i , определяются исходя из рассчитанных потоков согласно уравнениям ступеней.

Разработанная методика позволяет производить расчет каскадов с произвольными схемами соединения ступеней, учитывающими особенности оптимизации разделительных характеристик газовых центрифуг.

1.2. Модельные каскады для разделения многокомпонентных смесей ИЗОТОПОВ

Теория и методы расчета многокомпонентных смесей изотопов разрабатывались Миненко, Колокольцовым, Жигаловским, Сулаберидзе, Сазыкиным, Борисевичем и другими авторами [4, 8 – 12, 28, 39 – 47].

1.2.1. Параметры и уравнения ординарного каскада

Разделение многокомпонентной изотопной смеси производится аналогично бинарной в противоточном симметричном каскаде (рисунок 1.2).

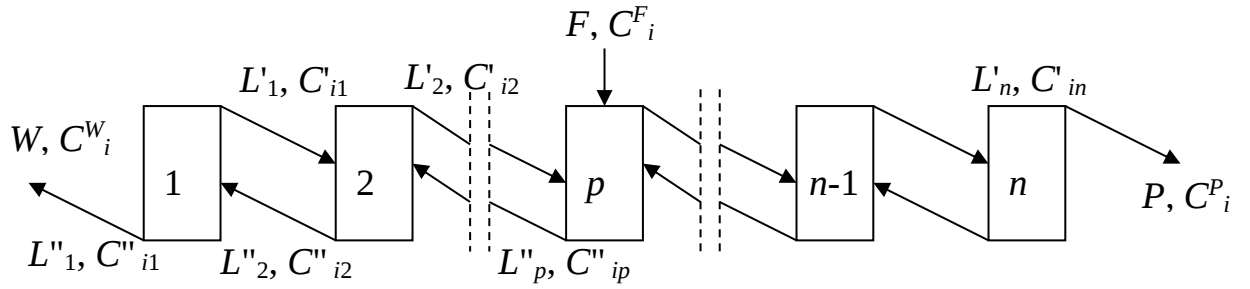


Рисунок 1.2 – Схема ординарного противоточного симметричного каскада для разделения многокомпонентной смеси изотопов

Обозначим потоки питания, отбора и отвала каскада как F , P и W соответственно. Пронумеруем ступени каскада от 1 до n ($j = \overline{1, n}$). Поток питания каскада подается в ступень с номером p . Разделяемая смесь изотопов состоит из m компонентов ($i = \overline{1, m}$), номера которых расположены в порядке возрастания массовых чисел (атомных или молекулярных масс). Концентрации компонентов в питании, отборе и отвале каскада обозначены как C_i^F , C_i^P и C_i^W соответственно. В каждой из ступеней с номером j входящий поток L_j с концентрациями компонентов C_{ij} разделяется на два выходящих потока: отбора L'_j с концентрациями C_{ij}' и отвала L''_j с концентрациями C_{ij}'' .

При отсутствии потерь потоки в каскаде удовлетворяют уравнениям баланса вещества и изотопа:

$$\begin{aligned} L'_j + L''_j &= L_j, \quad j = \overline{1, n}; \\ L'_j C_{ij}' + L''_j C_{ij}'' &= L_j C_{ij}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (1.34)$$

Внешние параметры каскада также связаны балансовыми соотношениями

$$F = W + P; \quad F C_i^F = W C_i^W + P C_i^P, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.35)$$

Уравнения, отражающие схему соединения ступеней в каскаде:

$$\begin{aligned} L_1 &= L''_2, \quad L_2 = L'_1 + L''_3, \dots, \quad L_p = L'_{p-1} + L''_{p+1} + F, \dots, \quad L_n = L'_{n-1}; \\ L_1 C_{i1} &= L''_2 C_{i2}, \quad L_2 C_{i2} = L'_1 C_{i1} + L''_3 C_{i3}, \dots, \\ L_p C_{ip} &= L'_{p-1} C_{ip-1} + L''_{p+1} C_{ip+1} + F C_i^F, \dots, \quad L_n C_{in} = L'_{n-1} C_{in-1} \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (1.36)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} W &= L''_1, \quad P = L'_n; \\ C_i^W &= C_{i1}'', \quad C_i^P = C_{in}', \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (1.37)$$

Полные коэффициенты разделения определяются как отношения относительных концентраций рассматриваемого изотопа и m -го компонента в отборе и отвале:

$$q_i = \frac{C'_i}{C'_m} / \frac{C''_i}{C''_m}, \quad i = \overline{1, m-1}. \quad (1.38)$$

При выборе тяжелого компонента в качестве m -го все коэффициенты $q_i > 1$. Для разделительных элементов их величина задается характеристиками

$$q_i = q_i(l, \theta), \quad i = \overline{1, m-1}, \quad (1.39)$$

которые определяются в соответствии с разностью массовых чисел i -го и m -го компонентов

$$q_i = q_0^{M_m - M_i}, \quad i = \overline{1, m-1}, \quad (1.39)$$

где q_0 – полный коэффициент разделения на единицу разности масс.

Количество внутренних параметров, определяющих процесс разделения многокомпонентной смеси изотопов в ординарном противоточном каскаде составляет $(4m+2)n+2$. Количество внешних параметров – $3m$. С учетом приведенных соотношений, граничных условий и уравнений, отражающих схему соединения ступеней, количество независимых внутренних и внешних переменных для расчета процесса разделения в каскаде центрифуг составляет $m+2n+2$.

1.2.2. Квазиидеальный каскад

Теория квазиидеальных каскадов разработана Сазыкиным. В основе лежит возможность задания одинаковых по ступеням каскада срезов парциальных потоков. Согласно работе [4] срезы парциальных потоков в ступени с номером j задаются выражениями

$$\varphi_{ij} = L'_j C'_{ij} / L_j C_{ij}, \quad 1 - \varphi_{ij} = L''_j C''_{ij} / L_j C_{ij}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.41)$$

Можно определить относительные концентрации R_{ik} , R'_{ik} , R''_{ik} , где k – номер выбранного опорного компонента. В этом случае коэффициенты разделения по

обогащенной α_{ik} и обедненной фракции β_{ik} , полный коэффициент разделения q_{ik} и относительные концентрации равны

$$\begin{aligned}\alpha_{ik} &= R'_{ik}/R_{ik}, \quad \beta_{ik} = R_{ik}/R''_{ik}, \quad q_{ik} = R'_{ik}/R''_{ik}; \\ R_{ik} &= C_i/C_k, \quad R'_{ik} = C'_i/C'_k, \quad R_{ik} = C''_i/C''_k.\end{aligned}\quad (1.42)$$

При этом выполняются соотношения

$$q_{ik} = \alpha_{ik}\beta_{ik}, \quad q_{kk} = \alpha_{kk}\beta_{kk} \equiv 1. \quad (1.43)$$

В случае, когда коэффициенты разделения α_{ik} , β_{ik} и q_{ik} , а значит, срезы парциальных потоков φ_i и коэффициенты g_i одинаковы на всех ступенях, каскад называется квазиидеальным.

Введем коэффициенты

$$g_i = \frac{\varphi_i}{1 - \varphi_i} = \frac{L'_i}{L''_i}, \quad i \neq k; \quad g_k = \frac{\varphi_k}{1 - \varphi_k} = \frac{L'_k}{L''_k}, \quad i = k. \quad (1.44)$$

В этом случае из (1.41) и (1.44) получим:

$$g_i/g_k = q_{ik} = \alpha_{ik}\beta_{ik}; \quad \frac{1 + g_i}{1 + g_k} = \beta_{ik}. \quad (1.45)$$

Решениями уравнений (1.45) относительно α_{ik} и β_{ik} будут следующие соотношения

$$\begin{aligned}g_i &= \frac{\alpha_{ik}(\beta_{ik} - 1)}{\alpha_{ik} - 1}, \quad i \neq k; \\ g_k &= \frac{\beta_{ik} - 1}{\beta_{ik}(\alpha_{ik} - 1)}, \quad i = \overline{1, m}, \quad i \neq k.\end{aligned}\quad (1.46)$$

Величины g_i и g_k инвариантны по отношению к компоненту i , это означает, что в качестве опорного может быть выбран любой компонент смеси. Используя уравнения (1.41) – (1.44) можно получить соотношения, связывающие параметры отдельной ступени каскада

$$L_i = \frac{g_i + 1}{g_i} L'_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (1.47)$$

$$C_i = \frac{g_i + 1}{g_i} \frac{L'_i}{\sum_{i=1}^m L_i}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (1.48)$$

$$\theta = \sum_{i=1}^m L'_i / \sum_{i=1}^m L_i. \quad (1.49)$$

Если в ступень с номером s не подается поток питания, то уравнение баланса для нее имеет вид

$$L_{is} = L'_{is} + L''_{is}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.50)$$

С учетом (1.47) – (1.49) его можно записать следующим образом

$$L'_{is-1} + \frac{1}{g_{is}} L'_{is+1} - \frac{g_{is} + 1}{g_{is}} L'_{is} = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.51)$$

Для ступени с номером p уравнение преобразуется к виду

$$L'_{ip-1} + \frac{1}{g_{ip}} L'_{ip+1} - \frac{g_{ip} + 1}{g_{ip}} L'_{ip} + FC_i^F = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.52)$$

При постоянных g_i и g_k фундаментальное решение системы уравнений (1.51), (1.52) с учетом граничных условий позволяет определять поток отбора ступени L'_{is} при заданных g_{is} , а затем – параметры ступеней согласно (1.47) – (1.49).

В работе [11] предложен способ расчета квазиидеальных каскадов с двумя потоками питания. Этот способ был обобщен на случай одного дополнительного потока питания или отбора [28]. В работе [42] способ был усовершенствован для случая нескольких потоков питания. Дальнейшее развитие теории квазиидеальных каскадов отражено в работах [39, 41, 48 – 50].

Особенностью рассмотренного метода является невозможность расчета каскада со строго заданными внешними концентрациями целевого изотопа. Это затрудняет его использование для расчета урановых каскадов.

1.2.3. R-каскад

В частном случае квазиидеального каскада существует возможность построения каскада с одинаковыми по ступеням относительными концентрациями двух компонентов с индексами i и k , называемых ключевыми:

$$R'_{ik}(j-1) = R_{ik}(j) = R''_{ik}(j+1), \quad j = \overline{2, n-1}. \quad (1.53)$$

При этом коэффициенты разделения постоянны и определяются выражением

$$\alpha_{ik} = \beta_{ik} = \sqrt{q_{ik}}. \quad (1.54)$$

Каскад, удовлетворяющий условию (1.53), называется R -каскадом [10]. Легко показать, что коэффициенты g_i и g_k с учетом (1.46) будут определяться как:

$$g_i = \frac{1}{\sqrt{q_{ik}}}, \quad g_l = \frac{q_{lk}}{\sqrt{q_{ik}}}, \quad g_k = \sqrt{q_{ik}}. \quad (1.55)$$

Индексы i и k могут обозначать любые выбранные ключевые компоненты. Для правильного расчета каскада необходимо соответствующим образом определить коэффициенты разделения q_{ik} .

При определенном выборе ключевых компонентов R -каскад близок к оптимальному с заданными внешними концентрациями по одному из компонентов [51 – 54]. Это означает, что теория R -каскадов позволяет получить начальные приближения для расчета оптимальных параметров каскада при заданных концентрациях одного из изотопов. В работе [28] предложен и продемонстрирован на примере пятикомпонентной смеси изотопов вольфрама способ расчета R -каскадов с одним дополнительным потоком отбора.

Следует отметить, что R -каскады, построенные по ключевым компонентам с одинаковым средним массовым числом, полностью идентичны [55].

1.2.4. Q -каскад

При решении задачи расчета каскада для разделения многокомпонентных смесей в качестве предварительного приближения можно использовать модель каскада непрерывного профиля. Общий метод расчета таких каскадов изложен в работе [9]. Он состоит в том, чтобы заменить в уравнениях концентрации C_{ij} , являющиеся функциями номера ступени j , на характеристические функции $\omega_i(j)$. Эти функции предлагается задавать в экспоненциальном виде:

$$\omega_i(j) = \exp(Q_i j), \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{0, n}, \quad (1.56)$$

где Q_i – постоянные, удовлетворяющие условию:

$$Q_i - Q_k = \varepsilon_{ik}. \quad (1.57)$$

Здесь ε_{ik} – полный коэффициент обогащения i -го компонента по отношению к k -му, равный по определению $(q_{ik} - 1)$. В случае слабых обогащений, когда полный коэффициент разделения близок к единице

$$\varepsilon_{ik} \approx \ln q_{ik}. \quad (1.58)$$

Модельные каскады, удовлетворяющие условию (1.56), называют Q -каскадами. Замена переменных позволяет упростить уравнения массопереноса в каскаде интегральными уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \omega_i(j) + \sum_{k=1}^m \frac{2PC_k^P}{L(j)} \int_0^j \omega_i(t) \exp[\varepsilon_{ik}(j-t)] dt = \\ \sum_{k=1}^m \frac{L(0)C_k^P}{L(j)} \exp(\varepsilon_{ik}j), \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (1.59)$$

Характеристические функции связаны с концентрациями и межступенными потоками в каскаде:

$$L(j)C_i(j) = \frac{L(0)C_i^P + 2PC_i^P \int_0^j \omega_i(t) dt}{\omega_i(j)}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.60)$$

Для расчета каскада необходимо задать константы Q_i . Затем, с учетом граничных условий и балансовых уравнений из (1.56) – (1.60) определяются параметры обогатительной части:

$$L(j) = 2P \sum_{k=1}^m \frac{C_k^P}{Q_k} [1 - \exp(-Q_k j)], \quad i = \overline{1, m}; \quad (1.61)$$

$$C_i(j) = \frac{\frac{C_k^P}{Q_k} [1 - \exp(-Q_k j)]}{\sum_{k=1}^m \frac{C_k^P}{Q_k} [1 - \exp(-Q_k j)]}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1.62)$$

Аналогичные выражения можно записать для обеднительной части Q -каскада.

Теория Q -каскадов была дополнена понятием виртуального компонента для упрощения оптимизации по критерию минимального суммарного потока. Изучены характерные особенности среднего массового числа виртуального компонента и

параметра Q [56 – 58]. В работе [59] проведены расчеты с учетом потерь рабочего вещества.

Рассмотренную модель можно использовать только для расчета каскада оптимального непрерывного профиля. Эта особенность затрудняет использование Q -каскадов для расчета урановых каскадов.

1.2.5. Оптимизация каскада с заданными внешними концентрациями целевого изотопа

Особенностью квазиидеальных и R -каскадов является невозможность выполнения заданных внешних концентраций для целевого изотопа. Это условие можно выполнить при оптимизации каскада по методу [53].

В данном подходе считается, что количества разделительных элементов в ступенях пропорциональны потокам их питания. Тогда, если задать в каскаде поток питания, концентрации компонентов питания, концентрации отбора и отвала по целевому компоненту, то останется n переменных для оптимизации. При заданных полных коэффициентах разделения в число оптимизируемых переменных входят n , p и $n-2$ параметров ступеней. В качестве этих параметров целесообразно использовать концентрации целевого компонента в отвалах ступеней с номерами от 2 до $n-1$.

Критерий эффективности можно записать в общем виде

$$\psi(n, p, C''_{k2}, C''_{k3}, \dots, C''_{kn-1}) \rightarrow \min, \quad (1.63)$$

где k – номер выбранного целевого компонента.

Процедура поиска решений включает перебор пары конструктивных переменных n и p . Для каждой их пары производится оптимизация по концентрациям целевого изотопа в отвалах ступеней. В расчетах по критерию (1.63) можно применять пошаговый метод оптимизации. На каждом шаге,

определяемом выбранным набором $C''_{k2}, C''_{k3}, \dots, C''_{kn-1}$, следует рассчитать параметры каскада по ступеням.

Сначала выбираются приближенно неизвестные концентрации нецелевых изотопов в отвале каскада C^W_i , которые затем уточняются расчетом. Далее из балансовых соотношений находятся соответствующие C^P_i . Затем из граничных условий определяются для каждого компонента концентрации отвала первой и отбора последней ступеней, равные внешним концентрациям каскада. После чего вычисляется концентрация целевого изотопа в отвале последней ступени

$$C''_{kn} = \frac{C'_{kn}}{q_{kn}} \bigg/ \sum_{i=1}^m \frac{C'_{in}}{q_{in}}. \quad (1.64)$$

Дальнейшие расчеты проводятся по ступеням с использованием соотношений

$$C''_{ij} = q_{ij} C''_{ij} \bigg/ \sum_{s=1}^m q_{sj} C''_{sj}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}; \quad (1.65)$$

$$L''_j = (\tau_{kj} - \tau_j C'_{kj-1}) / (C'_{kj-1} - C''_{kj}), \quad j = \overline{2, n}; \quad (1.66)$$

$$C''_{ij} = C''_{ij-1} - (\tau_{ij} - \tau_j C'_{kj-1}) / L''_j, \quad i \neq k, \quad j = \overline{2, n}. \quad (1.67)$$

Здесь τ_{ij} и τ_j – транзитные потоки i -го изотопа и вещества в сечении перед j -й ступенью. Они находятся по внешним параметрам каскада: $\tau_{ij} = -WC^W_i$, $\tau_j = -W$ при $j \leq p$ и $\tau_{ij} = PC^P_i$, $\tau_j = P$ при $j > p$.

Расчет заканчивается проверкой сходимости полученных значений C'_{in} , $i \neq k$ с аналогичными, выбранными первоначально по внешним концентрациям. Если эти параметры не совпадают с заданной точностью, то внешние концентрации нецелевых изотопов изменяются и вычисления повторяются. Такие итерации можно проводить целенаправленно, например, путем минимизации суммы квадратов невязок концентрации. В случае, когда указанные концентрации по каждому изотопу совпадают, рассчитывается целевая функция ψ и принимается решение о новом шаге оптимизации.

В работе [60] описано множество критериев оптимизации разделительных процессов, которые могут применяться при оптимизации каскадов. Наиболее

простым является минимум суммарного потока питания ступеней. Решение задачи оптимизации по данному критерию [53, 61] удобно производить численным методом Хука-Дживса [62]. В работе [22] предложена универсальная вычислительная схема, позволяющая оптимизировать каскад при разных критериях оптимизации.

1.2.6. Расчет и оптимизация каскадов с несколькими питаниями по срезам парциальных потоков

В работе [42] предложен метод численного расчета и оптимизации каскада, использующий неодинаковые срезы парциальных потоков компонентов. Он обобщает известную методику, описанную в работе [48], на случай нескольких питаний каскада. Схема такого каскада представлена на рисунке 1.3.

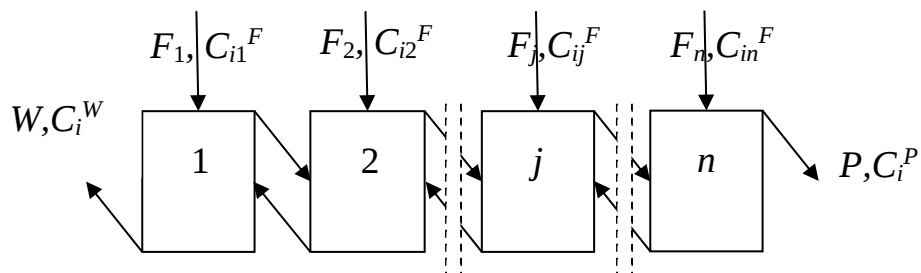


Рисунок 1.3 - Схема противоточного симметричного каскада с несколькими потоками питания

В начале расчета задаются потоки $F_1, F_2, \dots, F_n$ и концентрации питаний $C_{i1}^F, C_{i2}^F, \dots, C_{in}^F$ ($i = \overline{1, m}$). Расчет каскада проводится по срезам парциальных потоков, которые представляются в виде

$$\varphi_{ij} = L'_{ij}/L_{ij} = \sigma_j q_{ij}/(1 + \sigma_j q_{ij}), \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.68)$$

где σ_j - коэффициенты, определяющие соотношение между обогащениями в отвале и отборе j -й ступени, которые не зависят от рассматриваемого изотопа.

Согласно уравнениям баланса в каждом сечении каскада для любого i -го изотопа можно записать

$$L'_{ij+1} - L'_{ij} = (1 - \varphi_{ij+1})L_{ij+1} - \varphi_{ij}L_{ij} = W_{ij+1}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (1.69)$$

Здесь W_{ij+1} – транзитный поток i -го компонента смеси в направлении отвала, определяемый в сечении перед $(j+1)$ -й ступенью, рассчитываемый в соответствии с формулами

$$W_i = WC_i^W, \quad W_{ij+1} = WC_i^W - \sum_{s=1}^j F_s C_{is}^F, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.70)$$

С учетом граничных условий из (1.69) можно получить

$$L'_{ij} = \frac{1}{\varphi_{ij}} \sum_{l=1}^j W_{il} \prod_{s=l}^j \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}, \quad j = \overline{1, n}; \quad (1.71)$$

$$W_i = WC_i^W = \sum_{j=1}^n F_j C_{ij}^F \frac{1 + \sum_{l=j+1}^n \prod_{s=l}^n \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}}{1 + \sum_{l=1}^n \prod_{s=l}^n \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.72)$$

Из уравнений баланса парциальный поток i -го изотопа на отборе

$$P_i = PC_i^P = \sum_{j=1}^n F_j C_{ij}^F - W_i. \quad (1.73)$$

Согласно методике по различным задаваемым коэффициентам q_{ij} и σ_j ступеней, количеству ступеней n и характеристикам питания F_j , C_{ij}^F в соответствии с (1.68) – (1.73) рассчитываются парциальные потоки всех компонентов изотопной смеси. Другие параметры каскада определяются по найденным значениям этих переменных:

$$P = \sum_{i=1}^m P_i, \quad W = \sum_{i=1}^m W_i, \quad C_i^P = \frac{P_i}{P}, \quad L_j = \sum_{i=1}^m L_{ij}, \quad C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L}, \dots \quad (1.74)$$

При одинаковых по ступеням q_{ij} и σ_j расчет определяет квазиидеальный каскад с произвольным числом питающих потоков. При варьировании этих величин можно произвести оптимизацию каскада. Если задавать q_{ij} , то в качестве критерия оптимизации можно выбрать минимум суммарного потока питания при заданных внешних концентрациях целевого компонента. В этом случае хорошую эффективность показывает метод Хука-Дживса. Часть переменных σ_j отвечает за сшивку по заданным концентрациям целевого изотопа по критерию

$$\psi = \frac{|C_i^W - C_0^W|}{C_i^W} + \frac{|C_i^P - C_0^P|}{C_i^P} \rightarrow \min. \quad (1.75)$$

Остальные параметры σ_j варьируются для обеспечения минимизации суммарного потока.

Задача оптимизации может также решаться при переменных q_{ij} , варьируемых во внешнем цикле. В качестве критерия оптимизации может быть задан минимум суммарного количества разделительных элементов или максимум разделительной способности каскада, отнесенной к суммарному числу разделительных элементов. В этих случаях для каждого набора переменных q_{ij} и σ_j по ступеням находятся такие N_j , для которых выполняются все уравнения каскада.

К ограничениям метода следует отнести невозможность расчета каскадов с дополнительными потоками отбора.

1.2.7. Оценка содержания минорных изотопов урана в каскадах, оптимизированных по ^{235}U

Оценка содержания минорных изотопов урана в оптимальных каскадах может производиться в результате аналитического решения системы дифференциальных уравнений, приближенно описывающей изменения концентраций изотопов по каскаду [8]. Уравнения справедливы при малых эффектах разделения по ступеням, а также при условии, что концентрации компонентов $^{235}, ^{238}\text{U}$ значительно превышают концентрации остальных минорных компонентов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. В этом случае предполагается, что оптимальный каскад будет близок по своим характеристикам к идеальному по $^{235}, ^{238}\text{U}$. Предложенный в [8] подход в общем случае многопоточного каскада требует проведения численно-аналитических вычислений по специальной компьютерной программе.

С целью упрощения расчетов в работе [12] было получено аналитическое решение для ординарного каскада. При заданных характеристиках питания

содержание минорных изотопов в отборном и отвальном потоках каскада рассчитывается по формулам

$$C_m^P = \frac{C_m^F (R^W)^d - (R^F)^d}{\theta (R^W)^d - (R^P)^d}, \quad C_m^W = \frac{C_m^F (R^F)^d - (R^P)^d}{1 - \theta (R^W)^d - (R^P)^d}, \quad (1.76)$$

где $d = 2/3\Delta\mu_m - 1$, $\Delta\mu_m = \mu_m - \mu_{235}$ – разность между массовым числом минорного изотопа и изотопа ^{235}U ; $\theta = (C^F - C^W) / (C^P - C^W)$ – коэффициент деления потока питания; $R^F = C^F / (1 - C^F)$, $R^W = C^W / (1 - C^W)$, $R^P = C^P / (1 - C^P)$ – относительные концентрации ^{235}U в питании, отвале и отборе соответственно; m – индекс, обозначающий минорный изотоп.

В работе [46] данный метод был обобщен на случай каскада с двумя отборами, двумя питаниями и одним отвалом. На рисунке 1.4 обозначены внешние потоки каскада и концентрации изотопа ^{235}U в соответствующих потоках. Для обозначения концентраций минорных изотопов во внешних потоках введен индекс m .

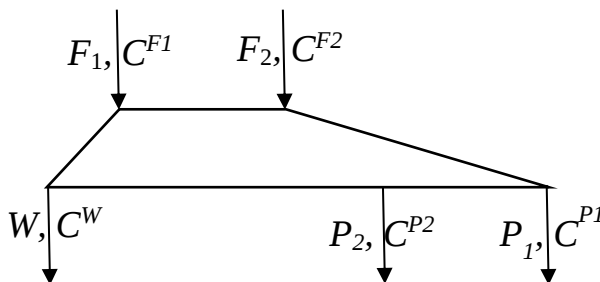


Рисунок 1.4 - Схема каскада с двумя отборами, двумя питаниями и одним отвалом

Концентрации минорных изотопов в отборах определяются, исходя из соотношений

$$C_m^{P1} = A\tilde{C}_m^{F1}, \quad C_m^{P2} = B\tilde{C}_m^{F1}, \quad (1.77)$$

где $A = A_1/D_1$, $B = B_1/D_1$;

$$\begin{aligned} A_1 &= [P_1(C^{P1} - C^{F1}) + P_2(C^{P2} - C^{F1})](R^{F1})^d (R^{P2})^d d^2 (C^{P1} - C^{P2}); \\ B_1 &= dC^{P2}(1 - C^{P2})[P_1(C^{P1} - C^{F1}) + P_2(C^{P2} - C^{F1})] \times \\ &\quad \times [(R^{P1})^d - (R^{P2})^d](R^{F1})^d; \\ D_1 &= C^{F1}(1 - C^{F1})\{dP_1(C^{P1} - C^{P2})(R^{P2})^d [(R^{P1})^d - (R^{F1})^d] - \\ &\quad - P_2C^{P2}(1 - C^{P2})[(R^{P2})^d - (R^{F1})^d][(R^{P2})^d - (R^{P1})^d]\}. \end{aligned} \quad (1.78)$$

Концентрации минорных изотопов в отвале

$$C_m^W = \gamma \tilde{C}_m^{F1} + \zeta(C_m^{P1}P_1 + C_m^{P2}P_2 - C_m^{F1}F_1), \quad (1.79)$$

где

$$\gamma = \frac{d(R^{F1})^d(C^{F2} - C^W)[P_1(C^{P1} - C^{F1}) + P_2(C^{P2} - C^{F1})]}{C^{F1}(1 - C^{F1})D_2},$$

$$\zeta = \frac{(C^{F2} - C^W)[(R^{F1})^d - (R^{F2})^d]}{D_2}, \quad (1.80)$$

$$D_2 = [(R^{F2})^d - (R^W)^d]P_1(C^{P1} - C^{F2}) + P_2(C^{P2} - C^{F2}) - F_1(C^{F1} - C^{F2}).$$

Концентрация $\tilde{C}_m^{F1}$ рассчитывается следующим образом:

$$\tilde{C}_m^{F1} = \frac{C_m^{F1}F_1(1 - \zeta W) + C_m^{F2}F_2}{[\zeta(AP_1 + BP_2) + \gamma]W + AP_1 + BP_2}. \quad (1.81)$$

Значения внешних потоков определяются исходя из уравнений баланса при заданных внешних концентрациях ^{235}U , потоках основного отбора и одного из питаний каскада.

Особенностью рассмотренного подхода является условие $C^{P2} > C^{F2}$, что ограничивает применение метода.

1.2.8. Оптимизация каскадов газовых центрифуг для разделения регенерированного урана

В работе [47] предложена методика численного расчета и оптимизации трехпоточного каскада газовых центрифуг для разделения регенерированного урана. В качестве основных исходных данных выступают задаваемые по ступеням количества газовых центрифуг.

Разделительные характеристики ступеней газовых центрифуг задаются зависимостью коэффициента обогащения для целевого изотопа ^{235}U по отношению к ^{238}U ε_j от потока питания газовой центрифуги l_j и коэффициента деления потока ступени θ_j :

$$\varepsilon_j = a_{0j} + a_{1j}\theta_j - a_{2j}\theta_j^2 + a_{3j} \ln l_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.82)$$

где $a_{0j}, \dots, a_{3j}$ – коэффициенты, определяемые по результатам стендовых испытаний газовых центрифуг. Полные коэффициенты разделения для целевого изотопа ^{235}U по отношению к ^{238}U q_{5j} рассчитываются по соответствующим значениям коэффициента обогащения

$$q_{5j} = \frac{2 + \varepsilon_j}{2 - \varepsilon_j} \frac{1 + \varepsilon_j(\theta_j - 0,5) - 0,00711(1 - \varepsilon_j/2)}{1 + \varepsilon_j(\theta_j - 0,5) - 0,00711(1 + \varepsilon_j/2)}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.83)$$

Полные коэффициенты разделения для других изотопов определяются исходя из q_{5j} и соотношения массовых чисел. Расчет концентраций отбора и отвала ступеней производится по рекуррентным формулам

$$C'_{ij} = \frac{q_{ij} C''_{ij}}{1 + \sum_{i=1}^m (q_{ij} - 1) C''_{ij}}, \quad C''_{ij} = C'_{ij-1} \left(1 - \frac{\tau'_j}{L'_j} \right) + \frac{\tau'_{ij}}{L'_j}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.84)$$

где τ'_j и τ'_{ij} – транзитные потоки вещества и i -го изотопа в направлении отвала каскада.

Концентрации изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в отвале каскада варьируются для соблюдения условия

$$\sum_i \left| \frac{C'_{in} - C_i^P}{C_i^P} \right| < \Delta_m, \quad (1.85)$$

где C'_{in} – концентрация i -го изотопа в потоке отбора n -й ступени, получаемая в результате поступенного расчета, C_i^P – концентрация i -го изотопа на отборе каскада, определяемая из балансовых соотношений, Δ_m – точность расчета.

В качестве параметров оптимизации выступают потоки отвала ступеней $L''_2, \dots, L''_n$ при сшивке расчетной концентрации отбора последней ступени с заданной по каскаду. Для расчета первого приближения используется алгоритм определения параметров каскада с постоянным коэффициентом деления потока. Критерием оптимизации является максимизация потока отбора P при заданных конструктивных параметрах, n, p , количествах газовых центрифуг в ступенях, внешних концентрациях целевого изотопа ^{235}U .

Методика применима только для расчета трехпоточных каскадов, что ограничивает ее применение.

1.3. Восстановление изотопного состава регенерированного урана в каскадах

1.3.1. Сравнительная характеристика регенерированного урана

Природный уран состоит из смеси изотопов ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U . Их концентрация (массовая доля) составляет 0,0054 %, 0,711 % и 99,2836 % соответственно. Для использования в качестве топлива в реакторах атомных электростанций природный уран обогащается до 2,0 – 5,0 % по изотопу ^{235}U . Регенерированный уран марки «РС» нарабатывается в промышленных реакторах. Наибольшее количество регенерированного урана получается из отработанного топлива атомных электрических станций (марка «РТ»). Содержание ^{235}U в регенерированном уране обычно больше, чем в природном. Это позволяет использовать его для воспроизводства реакторного топлива с меньшими затратами работы разделения. Однако данный процесс затрудняет наличие в регенерированном уране химически неотделимых изотопов ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U . Сравнительный изотопный состав природного и регенерированного урана приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Сравнительный изотопный состав природного и регенерированного урана.

Содержание изотопа	^{232}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U
В природном уране, %	—	0,0054	0,711	—
В регенерированном уране, %	$(0,5 - 5) \cdot 10^{-7}$	0,015 – 0,025	0,6 – 1,25	0,2 – 0,7

Наличие изотопа ^{232}U в регенерированном уране приводит к затруднениям при изготовлении ядерного топлива из-за мощного и вредного гамма-излучения продуктов его распада. Изотоп ^{234}U также существенно ухудшает радиационную обстановку — он характеризуется интенсивным альфа-излучением. Вредное влияние изотопа ^{236}U связано с паразитным захватом нейтронов в ядерном

реакторе, что приводит к необходимости повышения концентрации делящегося изотопа ^{235}U в топливе и ухудшает экономические показатели [63, 64].

Для сведения к минимуму радиационной опасности и улучшения качества топлива необходимо восстановление изотопного состава регенерированного урана. В настоящее время для обогащения регенерированного урана до энергетической концентрации ^{235}U и снижения в нем содержания $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ целесообразно использовать технологию разделения гексафторида урана в каскадах газовых центрифуг и операции разбавления. Требования к содержанию изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в низкообогащенном гексафториде урана содержатся в ASTM C 996–15 [65].

1.3.2. Обогащение регенерированного урана с разбавлением природным сырьем и отвальным ураном

Один из способов снижения концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в регенерированном гексафториде урана связан с обогащением в ординарном каскаде до концентрации ^{235}U 10–90 % и последующим разбавлением природным гексафторидом урана до концентраций порядка 5 % [13]. Оптимальные значения концентрации ^{235}U в отборе ординарного каскада лежат в диапазоне от 21 до 36 %. При существенном улучшении качества продукта этот способ предполагает получение высокообогащенного урана на промежуточной стадии. Кроме того, он связан с расходом природного урана, представляющем собой ценное сырье. Аналогичный недостаток имеет способ одновременного обогащения в каскаде регенерированного и природного урана [28].

С целью экономии природного сырья более эффективно использовать в каскаде в качестве разбавителя гексафторид смеси изотопов урана марки «РС», выделенной из выгоревшего ядерного топлива, с пониженным содержанием $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ [15]. Еще одним способом является одновременное разбавление в каскаде природным сырьем и отвальным ураном [14, 43]. Однако, при экономии природного сырья, повышаются затраты работы разделения.

1.3.3. Восстановление изотопного состава в отдельном каскаде

Эффективным способом очистки регенерированного гексафторида урана является использование каскада с двумя питаниями, двумя отборами и одним отвалом [16, 17]. На одно из питаний подается большой поток природного гексафторида урана, на второе – малый поток регенерированного. В основном отборе каскада нарабатывается низкообогащенный уран, характеристики которого определяются природным ураном. Поток и концентрация ^{235}U в дополнительном отборе совпадают с потоком и концентрацией регенерированного урана в питании. Концентрации изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе, соответствующем очищенному регенерированному урану, существенно снижается. Недостатком способа является небольшая производительность очистки, выражаемая малым потоком очищенного урана.

Очистка регенерированного урана от $^{232}, ^{234}\text{U}$ возможна в отвале *R*-каскадов [21]. Однако при этом в отбор ступеней каскадов уходит загрязненный поток с высокой концентрацией ^{235}U до 60 – 90 %. Очистка в оптимальных каскадах газовых центрифуг при смещении питания в отборную ступень позволяет снизить содержание ^{235}U , а также обеспечить очистку от $^{232}, ^{234}\text{U}$ в отвальном потоке [22].

В работе [23] рассматривается два каскада. Очистка производится в первом каскаде, отвал которого подается на питание второго. В отборе второго каскада происходит наработка низкообогащенного урана. В конечном продукте значительно снижается содержание ^{232}U при оптимизации очистительного каскада на заданную внешнюю концентрацию этого изотопа [24]. Количество ступеней определяется исходя из расчета *R*-каскада [4], а концентрация ^{235}U не превышает 5 % при смещении точки подачи питания в отборную ступень. При использовании измененной схемы с увеличением концентрации ^{235}U в отборе очистительного каскада до 7 – 13 % улучшается и качество конечного продукта по ^{234}U [21].

Недостатки перечисленных способов связаны с большими затратами работы разделения на очистку.

1.3.4. Восстановление изотопного состава в двойных каскадах

Существенное уменьшение концентрации ^{232}U достигается в двойных каскадах, в которых первый ординарный каскад работает на обогащение ^{235}U до высоких концентраций. Отбор этого каскада очищается от $^{232}, ^{234}\text{U}$ во втором. Получаемый в нем очищенный отвалный уран разбавляется до требуемых концентраций низкообогащенного урана. Снижение концентрации ^{232}U до величины $2 \cdot 10^{-8} \%$ получается в варианте двойного каскада [18] и до $1 \cdot 10^{-7} \%$ при использовании каскада согласно работе [19]. В случае, когда на питании второго ординарного каскада используется дополнительный газ-носитель [20], удастся понизить содержание ^{232}U до $3 \cdot 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-9} \%$ без применения специального разбавителя. Недостатком этих способов является получение на промежуточных стадиях высокообогащенного урана с концентрацией ^{235}U более 20 %.

Использование двухкаскадной схемы [26] с предварительной очисткой регенерированного гексафторида урана от ^{232}U в первом каскаде и дополнительным отбором во втором обеспечивает увеличение очищаемого потока по сравнению с [16, 17]. Однако этот поток остается относительно небольшим по отношению к природному сырью, используемому на втором питании схемы. Еще одним подходом является применение квазиидеальных каскадов в двухкаскадной схеме и операций разбавления [27]. В этом случае для существенной очистки регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ требуются большие затраты работы разделения.

В работе [32] предложено использование трехкаскадной схемы для очистки регенерированного гексафторида урана. Такая схема характеризуется меньшим потреблением природного урана, но для ее реализации требуется вдвое большее количество газовых центрифуг по сравнению с ординарным каскадом. Также возрастают затраты работы разделения.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОПОТОЧНЫХ КАСКАДОВ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ УРАНА

2.1. Моделирование многопоточного каскада газовых центрифуг для разделения бинарной смеси изотопов урана

Каскады для разделения бинарной смеси изотопов урана могут быть оптимизированы по различным критериям [33, 34]. Оптимизация осложняется при наличии в каскаде нескольких потоков питания и заданном количестве газовых центрифуг в ступенях. Эта задача была решена при разработке методов оптимизации каскадов газовых центрифуг для технологических расчетов на ОАО «Сибирский Химический Комбинат». Ее основу составляют алгоритмы оптимизации каскадов для разделения бинарной смеси изотопов урана $^{235}, ^{238}\text{U}$ [66]. Их упрощенный вариант (п. 2.1.1.) был реализован в компьютерном тренажере для обучения технологического персонала разделительных производств.

2.1.1. Модель каскада газовых центрифуг для разделения $^{235}, ^{238}\text{U}$

Расчетная схема каскада с потоками питания, подаваемыми в каждую ступень, представлена на рисунке 2.1. Такая схема позволяет рассчитать каскад с любым набором потоков питания. Все реально отсутствующие потоки задаются равными нулю.

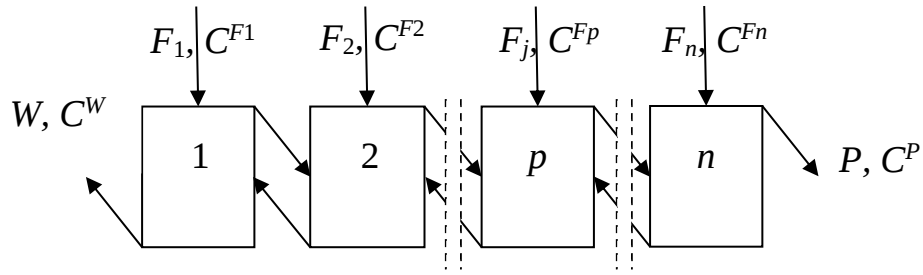


Рисунок 2.1 – Расчетная схема противоточного симметричного каскада

Каскад состоит из n ступеней, основное питание подается в ступень с номером p . Внешние параметры каскада удовлетворяют балансовым уравнениям для рабочего вещества и изотопа ^{235}U :

$$\sum_{j=1}^n F_j = W + P; \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^n F_j C^{Fj} = W C^W + P C^P. \quad (2.2)$$

Аналогичные уравнения выполняются для внутренних параметров. Потoki и концентрации каждой ступени удовлетворяют соотношениям (1.3) и (1.4). Балансовые связи потоков между ступенями характеризуются уравнениями

$$L_1 = L_2'' + F_1, \quad L_2 = L_1' + L_3'' + F_2, \dots, \quad (2.3)$$

$$L_p = L_{p-1}' + L_{p+1}'' + F_p, \dots, \quad L_n = L_{n-1}' + F_n;$$

$$L_1 C_1 = L_2'' C_2'' + F_1 C^{F1}, \quad L_2 C_2 = L_1' C_1' + L_3'' C_3'' + F_2 C^{F2}, \dots, \quad (2.4)$$

$$L_p C_p = L_{p-1}' C_{p-1}' + L_{p+1}'' C_{p+1}'' + F_p C^{Fp}, \dots, \quad L_n C_n = L_{n-1}' C_{n-1}' + F_n C^{Fn}.$$

Полные коэффициенты разделения ступеней, определяемые формулой (1.7), рассчитываются в соответствии с зависимостью

$$q_j = \exp(a_0 + a_1 \theta_j - a_2 \theta_j^2 - a_3 \ln l_j), \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.5)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – задаваемые модельные коэффициенты.

В расчете каскада также учитываются соотношения (1.9) и (1.10). Общее число независимых параметров при заданных потоках F_j и концентрациях C^{Fj} дополнительных питаний ($j = \overline{1, n}; j \neq p$) составляет $2n+4$. Процедура расчета предусматривает определение потоков и концентраций ступеней по $2n+5$

параметрам с проверкой граничного условия $C'_n = C^P$. В число этих параметров входят: $n, p, W, C^W, C^{Fp}, C^P, N_1, N_2, \dots, N_n, L''_2, L''_3, \dots, L''_n$.

Расчет концентраций отбора и отвала ступеней производится, начиная с первой ступени, с учетом граничного условия $C''_1 = C^W$ по рекуррентным формулам

$$C'_j = \frac{q_j C''_j}{1 + (q_j - 1) C''_j}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.6)$$

$$C''_j = C'_{j-1} \left(1 - \frac{\tau'_j}{L''_j} \right) + \frac{\tau'_{lj}}{L''_j}, \quad j = \overline{2, n}. \quad (2.7)$$

Здесь τ'_j, τ'_{lj} – транзитные потоки вещества и легкого изотопа в сторону отвала каскада, равные

$$\begin{aligned} \tau'_1 &= W, \quad \tau'_{l1} = WC^W, \\ \tau'_j &= \tau'_{j-1} - F_{j-1}, \quad \tau'_{lj} = \tau'_{lj-1} - F_{j-1} C^{Fj-1}, \quad j = \overline{2, n}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Аналогичным образом через транзитные потоки вычисляются потоки питания и отбора ступеней. При этом используются соотношения:

$$L''_j - L'_{j-1} = \tau'_j, \quad j = \overline{2, n}. \quad (2.9)$$

В основной схеме оптимизации варьируются потоки отвала ступеней $L''_2, L''_3, \dots, L''_n$ и поток отвала каскада W . При этом для каждого фиксированного значения W находятся такие $L''_2, L''_3, \dots, L''_n$, которые обеспечивают максимальную величину C'_n , рассчитываемую по (2.6). Оптимизация производится методом Хука-Дживса. Она заканчивается при определении наибольшего значения W , для которого выполняется граничное условие $C'_n = C^P$. Такая оптимизация соответствует критерию максимума эффективной разделительной способности каскада. Эта величина находится как

$$E = PV(C^P) + WV(C^W) - F_p V(C^{Fp}) - \sum_{i \neq p} \delta_i F_i V(C^{Fi}), \quad (2.10)$$

где $V(C)$ – потенциал разделения (1.18), $\delta_i = 1$ при наличии питания в i -й ступени, $\delta_i = 0$ когда питания нет.

Особым случаем оптимизации является каскад с двумя питаниями с варьируемым дополнительным потоком питания. Критерием также является максимум эффективной разделительной способности каскада. В этом случае предусмотрен внешний цикл оптимизации с перебором вариантов с различным дополнительным потоком питания.

В другой схеме оптимизации действует такой же критерий, но рассчитывается вариант трехпоточного каскада с варьированием n и p при фиксированных или изменяемых N_j ($j = \overline{1, n}$) во внешнем цикле.

После определения основных параметров ступеней рассчитываются давления в трассах отвала и питания ступеней. Расчет давлений в трассах отвала и питания ступеней производится по формулам

$$P_{Tj} = \sqrt{\frac{b_0 L_j - L_j''}{b_1 N_j}}, \quad (2.11)$$

где b_0, b_1 – модельные коэффициенты гидравлической характеристики газовой центрифуги по трассе отвала;

$$P_{0j} = k_0 L_j - k_1, \quad (2.12)$$

где k_0, k_1 – модельные коэффициенты гидравлической характеристики газовой центрифуги по трассе питания.

Алгоритм расчета предусматривает возможность задать ограничения сверху и снизу на давления в трассах отвала и питания. При наличии этих ограничений оптимизация каскада проходит в три этапа: расчет без ограничений по давлениям, с ограничением давлений только сверху, с ограничением давлений сверху и снизу. Если по окончании первого или второго этапа давления по трассам отвала и питания удовлетворяют заданным ограничениям, расчет завершается.

2.1.2. Оптимизация и подбор параметров каскада

Оптимальное значение W выбирается из заданного интервала неопределенности. Начальное значение W определяется путем выбора одинакового значения коэффициента деления потока для всех ступеней, обеспечивающего выполнение условия $C'_n = C^P$. Исключением является последняя ступень, для которой коэффициент деления потока без учета закрутки рассчитывается по найденному потоку L''_n и заданной величине $L'_n = P$.

Верхняя граница W_B для неизвестного потока отвала каскада рассчитывается из условия максимума разделительной способности каскада

$$E = E_{max} = e_{0max} \sum_{j=1}^N N_j, \quad (2.13)$$

где e_{0max} – максимальная разделительная способность одной газовой центрифуги, определяемая из выражения

$$e_{0max} = \frac{1}{2} l \theta (1 - \theta)^2 \ln^2(q) \rightarrow \max \quad (2.14)$$

и оптимальных значениях l_{opt} и θ_{opt} . Отсюда следует, что

$$W_B = \frac{E_{max} - B_W}{A_W}, \quad (2.15)$$

где величины A_W и B_W равны

$$A_W = \frac{(C^{Fp} - C^W)V(C^P) - (C^P - C_W)V(C^{Fp})}{C^P - C^{Fp}} + V(C_W); \quad (2.16)$$

$$B_W = \frac{\sum_{j \neq p} \delta_j F_j (C^P - C^{Fj})V(C^{Fp}) - \sum_{j \neq p} \delta_j F_j (C^{Fp} - C^{Fj})V(C^P)}{C^P - C^{Fp}} - \sum_{j \neq p} \delta_j F_j V(C^{Fj}). \quad (2.17)$$

Нижняя граница потока отвала из физических соображений принимается равной нулю:

$$W_H = 0. \quad (2.18)$$

Оптимизация потока F_j второго питания, подаваемого в j -ю ступень с известной концентрацией C^{Fj} , проводится в заданном интервале неопределенности.

Верхняя граница F_j рассчитывается из условия отсутствия основного питания. Ее величина находится по значению оптимального потока питания газовой центрифуги $l_{опт}$, соответствующего $E_{\max}$:

$$F_{jB} = l_{опт} \sum_{i=1}^n N_i. \quad (2.19)$$

Нижняя граница из физических соображений принимается равной нулю:

$$F_{jH} = 0.$$

При подборе n и p в качестве начальных приближений используются количество ступеней и номер ступени подачи питания, соответствующие идеальному каскаду

$$n = \frac{2 \ln \left(\frac{C^P(1 - C^W)}{C^W(1 - C^P)} \right)}{\ln(q)}; \quad p = \frac{2 \ln \left(\frac{C^P(1 - C^F)}{C^F(1 - C^P)} \right)}{\ln(q)}. \quad (2.21)$$

После этого перебором определяются такие значения n и p , при которых коэффициент использования мощности каскада $K_{ум}$ будет максимальным. Коэффициент $K_{ум}$ вычисляется по отношению эффективной разделительной способности $E_{эфф}$ к максимальной $E_{\max}$.

Оптимизация количества центрифуг в ступенях каскада N_j при заданном суммарном количестве газовых центрифуг реализуется следующим образом. Каждая ступень каскада начиная с отбора и заканчивая ступенью подачи питания разделяется на две до тех пор, пока не будут найдены значения N_j , соответствующие максимуму $K_{ум}$. После этого аналогичные действия выполняются с отвалной частью каскада. Ступень отбора допускается дополнительно делить дважды.

На первой и последней ступенях каскада может быть открыта закрутка. В случае последней ступени часть ее потока отбора $L_{зотб}$ подается на питание, а для первой ступени эту роль выполняет часть потока отвала $L_{зотв}$. Расчет потоков закруток производится исходя из условия максимизации полного коэффициента разделения, соответствующего максимуму разделительной способности каскада.

Оптимальный коэффициент деления потока на отвале и поток закрутки первой ступени определяются по формулам

$$\theta_{3отв} = \frac{1}{4} \frac{a_1}{a_2} + \sqrt{\frac{1}{16} \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 + \frac{a_3}{2a_2}}; \quad (2.22)$$

$$L_{3отв} = (1 - \theta_{3отв})L_2'' - W. \quad (2.23)$$

Соответствующие величины для последней ступени равны

$$\theta_{3отб} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a_1}{2a_2} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 + \frac{a_1}{2a_2} \right)^2 - \frac{a_1 - a_3}{2a_2}}; \quad (2.24)$$

$$L_{3отб} = \frac{\theta_{3отб}}{(1 - \theta_{3отб})} L_n'' - P. \quad (2.25)$$

При оптимизации потоков закруток вводится минимальный поток закрутки. Если рассчитанный поток закрутки меньше заданного минимума $L_{3 \min}$, то его значение приравнивается к $L_{3 \min}$. В случае, когда модельные коэффициенты a_1 и a_2 разделительной характеристики равны нулю, величины потоков закруток приравниваются к $L_{3 \min}$.

2.1.3. Расчет характеристик эффективности

После определения основных оптимальных параметров каскада рассчитываются характеристики эффективности разделения ступеней ($j = \overline{1, n}$):

- Фактическая разделительная способность

$$E_{\text{факт}j} = L_j' V(C_j') + L_j'' V(C_j'') - L_j V(C_j), \quad (2.26)$$

где L_j , C_j – полный поток и средневзвешенная концентрация питания j -й ступени, определяемые потоками L_{jk} и концентрациями C_{jk} отдельных питаний, т.е.

$$L_j = \sum_{k=1}^n L_{jk}, C_j = \frac{\sum_{k=1}^n L_{jk} C_{jk}}{L_j}; \quad (2.27)$$

- Эффективная разделительная способность

$$E_{эффj} = L'_j V(C'_j) + L''_j V(C''_j) - \sum_{k=1}^s L_{jk} V(C_{jk}), \quad (2.28)$$

где s – количество питаний j -й ступени;

- Схемный КПД

$$\eta_{схj} = E_{эффj} / E_{фактj}; \quad (2.29)$$

- Разделительная способность одной газовой центрифуги

$$E_{гцj} = E_{фактj} / N_j; \quad (2.30)$$

- Гидравлический КПД

$$\eta_{гj} = E_{фактj} / e_{0max} N_j. \quad (2.31)$$

Аналогичные характеристики эффективности рассчитываются для каскада:

- Фактическая суммарная разделительная способность

$$E_{факт} = \sum_{j=1}^n E_{фактj}; \quad (2.32)$$

- Эффективная разделительная способность

$$E_{эфф} = \sum_{j=1}^n E_{эффj}; \quad (2.33)$$

- Схемный КПД

$$\eta_{сх} = E_{эфф} / E_{факт}; \quad (2.34)$$

- Коэффициент использования разделительной мощности

$$K_{им} = E_{эфф} / E_{max}. \quad (2.35)$$

2.1.4. Компьютерный тренажер «Каскад газовых центрифуг»

Компьютерный тренажер «Каскад газовых центрифуг» создан с помощью среды быстрой разработки приложений Borland C++ Builder 6 Enterprise Edition под управлением операционной системы семейства Windows на языке C++. При

написании программы использованы только стандартные библиотеки среды C++ Builder 6. Основной исходный файл программы – «UnCasc.cpp». В исходном файле программы содержится ряд комментариев, облегчающих восприятие текста программы. Все функции разбиты на несколько групп, также разделенных комментариями.

На рисунке 2.2 представлена блок-схема, реализующая разработанные алгоритмы. После ввода и проверки исходных данных (1), если нет оптимизации второго потока питания, программа проходит только внутренний цикл.

Он состоит из расчета верхней границы W , предварительного расчета с подбором потока отвала в заданных пределах (6), оптимизации численным методом всего каскада (7) и уточнения текущего W до выполнения условия:

$$|C'_n - C^P| < \Delta_C, \quad (2.36)$$

где Δ_C – заданная точность расчета концентраций. В случае оптимизации второго потока питания в работу включается внешний цикл подбора F_j (5-12). По окончании работы программы, результаты расчета (11) можно просмотреть в виде таблицы, сохраняемой в файл, а также в графическом виде.

Главное окно программы с основными параметрами каскада показано на рисунке 2.3. Из основного окна можно переключиться на вкладку «Настройки» (рисунок 2.4), обеспечивающую задание дополнительных параметров каскада. По окончании расчета результаты оптимизации по каждой ступени можно просмотреть в виде уменьшенной (рисунок 2.5) или развернутой (рисунок 2.6) таблицы, а также графически (рисунок 2.7).

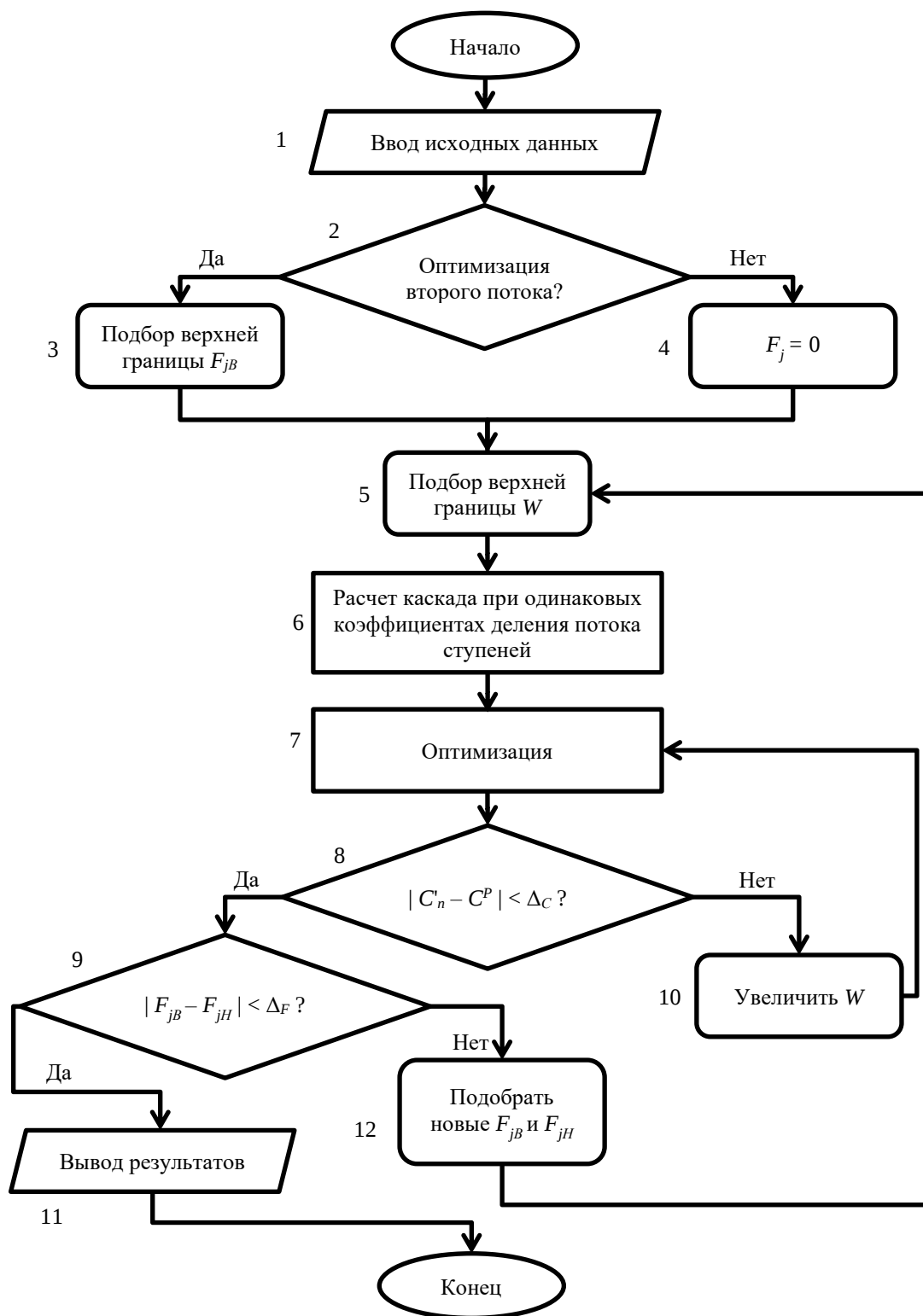


Рисунок. 2.2 - Общая блок-схема программы

Расчет каскада

Расчет | Настройки

Число ступеней каскада n: 3 $e_{\text{отм}} = 0,070$

Номер ступени подачи основного питания p: 0

Концентрация отбора C^p , %: 2

Концентрация отвала C^w , %: 0,25

Выберите набор a[i]:

☒ 0,4 0,6 0,5 0,15

☐ 0,3 0,5 0,7 0,1

Использовать закрутки:

☐ На отвале ☐ На отборе

Минимальный поток, г/с: 0,001

☐ Оптимизировать второй поток питания

Тип задач: ☐ № 1 ☒ № 2

Информация по текущей ступени:

Ступень №: 1

Число ГЦ в ступени N: 25000

Поток питания $F(i)$, г/с: 0,0000

Концентрация питания $C^F(i)$, %: 0,0000

Добавить основное питание: ↓

Добавить дополнительное питание: ↓

Убрать питание: ×

Управление:

← Н.У. →

↑

↓

— +

Общие результаты расчета каскада

Поток основного питания F_p , г/с: 0 Концентрация C^n , %: 0

Поток отбора P, г/с: 0 $C^p = C^n$ с точностью, %: 0

Поток отвала W, г/с: 0 Суммарный поток ΣL , г/с: 0

Эффективная разделятельная способность $E_{\text{эфф}}$, г/с: 0

Фактическая разделятельная способность $E_{\text{факт}}$, г/с: 0

Схемный КПД $\eta_{\text{сх}}$, %: 0

Коэффициент использования мощности $K_{\text{им}}$, %: 0

Время расчета: 00:00:00

Поток закрутки на отборе L'_3 , г/с: Поток F_i :

Поток закрутки на отвале L'_3 , г/с:

Расчет! ■

Подбор n и p ■

Подбор N ■

Остановить

Результаты

Графики

Помощь ?

О программе ?

Выход ■

Рисунок 2.3 - Окно основных параметров каскада.

Расчет каскада

Расчет | Настройки

Ограничения по давлению:

☐ Использовать

P_o , мм.рт.ст. ≤ 300

P_T , мм.рт.ст. ≥ 10

P_T , мм.рт.ст. ≤ 300

$P_T = \sqrt{\frac{b[0] \cdot L_i - L_i''}{b[1] \cdot N_i}}$

Набор b[i]:

☒ 0,8 ☐ 0,004 ☐ 0,9 ☐ 0,003

$P_0 = k[0] \cdot L_i + k[1]$

Набор k[i]:

k[0]=0,01 k[1]=1

Точность расчета:

$C^p - C^n \leq 10$ $C^p = C^n$

При оптимизации второго потока питания $dF \leq 10$

Количество ГЦ в ступени:

Максимум: 50000

Дискретность: 5000

Задать

Приоритет программы:

Низкий Средний Высокий

Звук по окончании расчета:

☒ Воспроизводить

Концентрация по умолчанию:

Если не задана концентрация основного питания, по нажатию кнопки "Добавить основное питание" добавлять питание со следующей концентрацией(%): 0,711

Помощь ?

О программе ?

Выход ■

Рисунок 2.4 - Окно дополнительных параметров и настроек программы

Результаты расчета в виде таблиц											
	C', %	C', %	C, %	L', t/c	L', t/c	L, t/c	l, m/t/c	Θ	q	F, t/c	C ^Ф , %
1	0.2500	0.3470	0.3065	194.72	272.19	466.91	18.68	0.5830	1.389		
2	0.3065	0.3968	0.3533	466.91	502.48	969.39	38.78	0.5183	1.296		
3	0.3558	0.4449	0.3997	697.20	675.48	1372.70	54.91	0.4921	1.252		
4	0.4013	0.4919	0.4448	870.20	805.11	1675.30	67.01	0.4806	1.227		
5	0.4448	0.5380	0.4891	999.83	905.84	1905.70	76.23	0.4753	1.211		
6	0.4871	0.5838	0.5328	1100.60	987.58	2088.10	83.53	0.4729	1.200		
7	0.5288	0.6294	0.5763	1182.30	1057.10	2239.40	89.57	0.4720	1.191		
8	0.5704	0.6749	0.6197	1251.80	1120.10	2371.90	94.88	0.4722	1.185		
9	0.6120	0.7204	0.6634	1314.80	1185.60	2500.40	100.02	0.4741	1.178		
10	0.6540	0.7653	0.7074	1380.30	1273.50	2653.80	106.15	0.4799	1.172	264.36	0.7110
11	0.6939	0.8227	0.7560	1203.90	1120.30	2324.20	92.97	0.4820	1.187		
12	0.7447	0.8954	0.8169	1050.70	966.28	2016.90	80.68	0.4791	1.204		
13	0.8096	0.9897	0.8946	896.64	802.53	1699.20	67.97	0.4723	1.225		
14	0.8937	1.1163	0.9962	732.89	625.49	1358.40	54.34	0.4605	1.252		
15	1.0056	1.2941	1.1323	555.85	435.40	991.25	39.65	0.4392	1.291		
16	1.1597	1.5604	1.3188	365.76	240.75	606.51	24.26	0.3969	1.351		
17	1.3814	2.0000	1.5604	171.11	69.64	240.75	9.63	0.2893	1.457		

Рисунок 2.5 - Таблица результатов расчета каскада в уменьшенном варианте

Результаты расчета в виде таблиц

	C', %	C', %	L', t/c	L', t/c	L, t/c	l, m/t/c	Θ	q	F, t/c	C ^Ф , %	E _{эфф} , t/c	E _{факт} , t/c	E _{пл} , m/t/c	rcx, %	rr, %	P _r , mm	P _o , mm
1	0.2500	0.3470	194.72	272.19	466.91	18.68	0.5830	1.389			6.002	6.002	0.240	100.000	68.696	42.29	2.95
2	0.3065	0.3968	466.91	502.48	969.39	38.78	0.5183	1.296			8.011	8.073	0.323	99.233	92.396	55.55	5.67
3	0.3558	0.4449	697.20	675.48	1372.70	54.91	0.4921	1.252			8.610	8.631	0.345	99.765	98.776	63.32	7.97
4	0.4013	0.4919	870.20	805.11	1675.30	67.01	0.4806	1.227			8.737	8.737	0.349	100.000	99.998	68.56	9.70
5	0.4448	0.5380	999.83	905.84	1905.70	76.23	0.4753	1.211			8.690	8.712	0.348	99.742	99.713	72.44	11.00
6	0.4871	0.5838	1100.60	987.58	2088.10	83.53	0.4729	1.200			8.571	8.648	0.346	99.106	98.978	75.50	12.01
7	0.5288	0.6294	1182.30	1057.10	2239.40	89.57	0.4720	1.191			8.421	8.573	0.343	98.235	98.112	78.05	12.82
8	0.5704	0.6749	1251.80	1120.10	2371.90	94.88	0.4722	1.185			8.261	8.494	0.340	97.254	97.213	80.36	13.52
9	0.6120	0.7204	1314.80	1185.60	2500.40	100.02	0.4741	1.178			8.101	8.412	0.336	96.308	96.270	82.79	14.15
10	0.6540	0.7653	1380.30	1273.50	2653.80	106.15	0.4799	1.172	264.36	0.7110	7.881	8.309	0.332	94.851	95.097	86.18	14.80
11	0.6939	0.8227	1203.90	1120.30	2324.20	92.97	0.4820	1.187			8.335	8.552	0.342	97.456	97.879	80.96	13.04
12	0.7447	0.8954	1050.70	966.28	2016.90	80.68	0.4791	1.204			8.626	8.692	0.348	99.240	99.480	75.03	11.51
13	0.8096	0.9897	896.64	802.53	1699.20	67.97	0.4723	1.225			8.718	8.719	0.349	99.992	99.784	68.02	9.97
14	0.8937	1.1163	732.89	625.49	1358.40	54.34	0.4605	1.252			8.509	8.552	0.342	99.500	97.873	59.48	8.33
15	1.0056	1.2941	555.85	435.40	991.25	39.65	0.4392	1.291			7.835	8.007	0.320	97.849	91.637	48.70	6.56
16	1.1597	1.5604	365.76	240.75	606.51	24.26	0.3969	1.351			6.407	6.678	0.267	95.934	76.434	34.56	4.66
17	1.3814	2.0000	171.11	69.64	240.75	9.63	0.2893	1.457			3.672	3.672	0.147	100.000	42.028	14.66	2.71

Выход

Сохранить в файле

Меньше <<

Рисунок 2.6 - Таблица результатов расчета каскада в развернутом виде

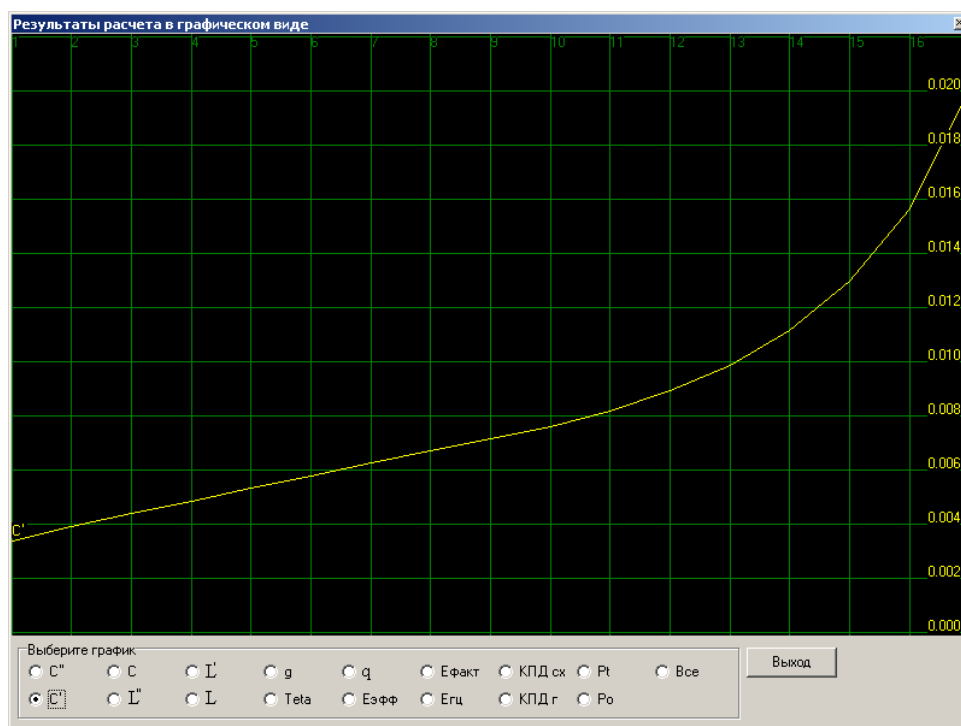


Рисунок 2.7 - Окно графического отображения результатов расчета каскада

2.1.5. Задачи для обучения персонала

Для облегчения восприятия технологическим персоналом идей оптимизации каскадов был разработан ряд задач. Они подразделяются на два типа, первый из которых разбит на четыре группы: каскад из ступеней с одинаковым количеством газовых центрифуг; каскад с двумя потоками питания; каскад из нескольких типов ступеней по количеству газовых центрифуг; каскад с ограничениями на давления в трассах. Второй тип задач разбит на две группы: каскад из одинакового типа ступеней по количеству газовых центрифуг; каскад из нескольких типов ступеней по количеству газовых центрифуг.

В задачах первого типа изучается зависимость характеристик эффективности каскада от:

- Количества ступеней с одинаковым и различным количеством газовых центрифуг;

- Номера ступени подачи питания;
- Ограничений на давления в трассах;
- Модельных коэффициентов разделительной характеристики газовой центрифуги.

Первый тип задач решается путем перебора числа ступеней и точек подачи питания. Решение задач второго типа для ступеней с одинаковым количеством газовых центрифуг производится путем подбора внешних концентраций каскада. Рассматривается зависимость характеристик эффективности каскада от внешних концентраций каскада.

Для ступеней с различным количеством газовых центрифуг изучается зависимость характеристик эффективности каскада от внешних концентраций и распределения газовых центрифуг по ступеням.

По задачам обучения составлено более 430 контрольных вопросов, по которым проводились занятия на разделительных производствах. Примеры вопросов приведены в Приложении А. Описание задач представлено в Приложении Б.

2.2. Моделирование систем каскадов газовых центрифуг методом матричного описания связей ступеней в общей схеме

Оптимизация каскада для разделения бинарной смеси изотопов может быть произведена методами [33, 34]. Для системы из нескольких каскадов, связанных друг с другом, задача осложняется необходимостью выбора параметров межкаскадных потоков. Эта трудность может быть преодолена представлением системы каскадов как одного каскада с произвольной схемой соединения ступеней.

2.2.1. Особенности расчета и оптимизации системы каскадов

Для расчета систем каскадов необходимо ввести общую нумерацию всех ступеней каскадов, входящих в систему. Нумеровать ступени целесообразно так, чтобы отвал системы производился из ступени с первым номером, а отбор системы – из ступени с последним номером. В качестве межкаскадных потоков надо выбирать соответствующие потоки отвала или отбора ступеней с промежуточными номерами. После этого необходимо описать все связи ступеней в общей схеме с помощью матриц α и β . Такой метод означает, что система каскадов представляется одним каскадом со сложной схемой соединения ступеней. В отличие от отдельного каскада при оптимизации следует предусматривать варьирование элементов матриц α и β , определяющих межкаскадные потоки.

При заданных матрицах α и β и внешних параметрах оптимизацию внутренних параметров каскада целесообразно производить в двух циклах. Во внешнем цикле подбираются конструкционные параметры каскада и коэффициенты разделения ступеней – $n, p, q_1, \dots, q_n$, во внутреннем – концентрации отвала ступеней со 2-й по $n-1$. По этим переменным рассчитываются потоки отвала и другие зависимые параметры ступеней, определяется целевая функция оптимизации.

Для исследования особенностей оптимизации систем противоточных симметричных каскадов была разработана компьютерная программа и проведен вычислительный эксперимент. Рассматривалось разделение бинарной смеси изотопов гексафторида урана в системе двух каскадов при параллельно и противоточно идущих межкаскадных потоках. В качестве разделительной характеристики $q_i(l_i, \theta_i)$ была принята зависимость

$$q_i = \exp(a_0 + a_1 \theta_i - a_2 \theta_i^2) l_i^{-a_3}, i = \overline{1, n}, \quad (2.37)$$

где $a_0 = 0,5$; $a_1 = 0,5$; $a_2 = 0,5$; $a_3 = 0,1$ – константы, выбранные с учетом подстановки потока питания газовой центрифуги в мг/с. Из данной характеристики по коэффициентам разделения, коэффициентам деления потока и потокам питания

ступеней, найденным при оптимизации, определялось соответствующее количество газовых центрифуг. Оптимизация проводилась численным методом Хука-Дживса по двум критериям. Первый из них – минимизация суммарного количества газовых центрифуг системы при заданных внешних параметрах, второй – максимизация потока отбора системы при заданных количествах газовых центрифуг в ступенях. Внешняя концентрация системы во всех расчетах была равна: $C^P=0,711\%$; $C^W=0,2\%$; $C^F=0,4\%$.

2.2.2. Результаты моделирования систем каскадов газовых центрифуг

Были рассмотрены разные системы двух каскадов с параллельно идущими межкаскадными потоками при потоке отбора $P = 10$ г/с. При оптимизации варьировалось число ступеней в каскадах и точки подачи межкаскадных потоков. Лучшей оказалась система из двух каскадов, состоящих из 8 и 11 ступеней, представленная на рисунке 2.8.

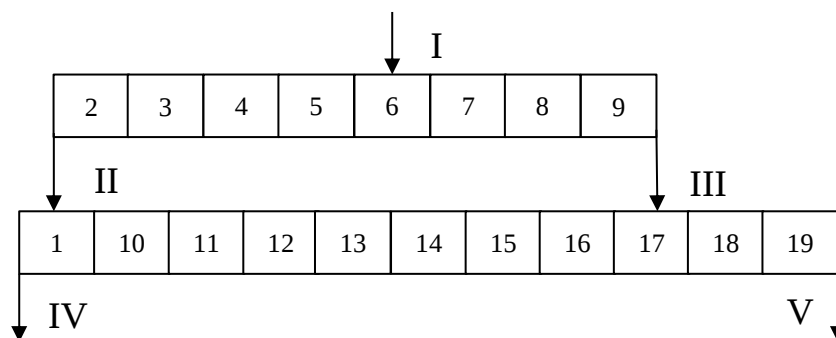


Рисунок 2.8. Схема системы каскадов с параллельно идущими межкаскадными потоками: I – питание системы, II, III – отвал и отбор первого каскада, IV, V – отвал и отбор системы, 1-19 – номера ступеней в системе.

Основное питание подается в ступень с номером 6 верхнего каскада. Отвал верхнего каскада идет в ступень с номером 1 нижнего, отбор верхнего – в ступень с номером 17 нижнего. Оптимизация проводилась по критерию минимума

суммарного количества центрифуг системы. Результаты расчета приведены в таблице 2.1. Суммарное количество газовых центрифуг, полученное при оптимизации, равно 14521 шт. Коэффициенты деления потока ступеней близки между собой, а полные коэффициенты разделения по каскадам несколько отличаются. Это вызвано дискретностью выбора числа ступеней и их связей в системе.

Таблица 2.1 - Оптимальные параметры системы каскадов с параллельно идущими межкаскадными потоками

Номер ступени	L'' , г/с	L' , г/с	C'' , %	θ	q	N
Первый каскад						
2	10,75	9,63	0,221	0,473	1,217	281
3	20,38	18,38	0,244	0,474	1,218	539
4	29,13	26,35	0,269	0,475	1,218	774
5	37,1	33,66	0,297	0,476	1,218	987
6	44,41	40,5	0,327	0,477	1,218	1181
7	51,25	47,33	0,361	0,48	1,217	1355
8	32,53	30,3	0,398	0,482	1,214	844
9	15,5	14,8	0,438	0,488	1,21	392
Второй каскад						
1	15,55	14,55	0,2	0,483	1,238	491
10	19,36	17,89	0,224	0,48	1,234	591
11	22,69	20,83	0,25	0,479	1,232	678
12	25,64	23,45	0,279	0,478	1,230	756
13	28,25	25,78	0,31	0,477	1,229	825
14	30,58	27,87	0,345	0,477	1,229	886
15	32,67	29,79	0,384	0,477	1,228	942
16	34,59	31,61	0,427	0,477	1,227	991
17	36,41	33,55	0,474	0,480	1,226	1036
18	23,55	21,27	0,525	0,475	1,224	658
19	11,27	10	0,581	0,47	1,226	316

В качестве другого примера были рассмотрены разные системы двух каскадов с противоточно идущими межкаскадными потоками при потоке отбора $P = 10$ г/с. При оптимизации варьировалось число ступеней в каскадах и точки подачи межкаскадных потоков. Лучшей оказалась система из двух каскадов, состоящих из 8 ступеней (рисунок 2.9). Основное питание подается в ступень с

номером 11 верхнего каскада. Отвал верхнего каскада идет в ступень с номером 3 нижнего, а отбор нижнего – в ступень с номером 14 верхнего. Оптимизация проводилась по критерию минимума суммарного количества центрифуг системы. Результаты расчета приведены в таблице 2.2.

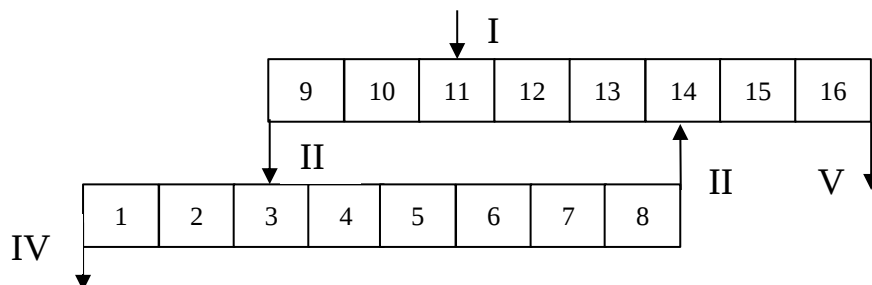


Рисунок 2.9. Схема системы каскадов с противоточно идущими межкаскадными потоками: I – питание системы, II – отвал первого каскада, III – отбор второго каскада, IV, V – отвал и отбор системы, 1-16 – номера ступеней в системе

Таблица 2.2 - Оптимальные параметры системы каскадов с противоточно идущими межкаскадными потоками

Номер ступени	L'' , г/с	L' , г/с	C'' , %	θ	q	N
Первый каскад						
9	21,13	20,91	0,285	0,497	1,242	707
10	42,04	40,18	0,319	0,489	1,233	1286
11	61,31	58,47	0,356	0,488	1,226	1779
12	54,04	49,96	0,393	0,48	1,221	1484
13	45,54	41,51	0,434	0,477	1,219	1223
14	37,09	33,39	0,479	0,474	1,219	989
15	23,39	21,1	0,528	0,474	1,220	628
16	11,1	10	0,583	0,474	1,220	299
Второй каскад						
1	15,55	15,91	0,2	0,506	1,252	575
2	31,46	30,56	0,225	0,493	1,24	1027
3	46,11	44,21	0,253	0,489	1,232	1403
4	38,63	35,62	0,281	0,48	1,227	1106
5	30,04	27,21	0,311	0,475	1,225	843
6	21,63	19,34	0,345	0,472	1,225	606
7	13,77	12,12	0,382	0,468	1,227	390
8	6,54	5,58	0,423	0,46	1,232	190

Суммарное количество газовых центрифуг, полученное при оптимизации 14537 шт., что несколько больше, чем в предыдущем расчете, но это компенсируется меньшим количеством ступеней в системе и их более близкими параметрами.

Для оптимизации системы с заданным количеством газовых центрифуг в ступенях была выбрана система двух каскадов, состоящих из 8 и 11 ступеней (аналогично рисунку 2.8). Оптимизация проводилась поиском максимума потока отбора системы. При разных его значениях минимизировалась сумма квадратов разностей рассчитываемых и заданных количеств газовых центрифуг ступеней. Суммарное количество центрифуг составило 14400 шт. Их распределение по ступеням было определено, исходя из возможности деления пополам 16 блоков газовых центрифуг по 900 шт. Результаты расчета приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Оптимальные параметры системы каскадов при заданном количестве газовых центрифуг ступеней

Номер ступени	L'' , г/с	L' , г/с	C'' , %	θ	q	N
Первый каскад						
2	10.94	9.14	0.242	0.455	1.277	450
3	20.08	15.9	0.273	0.442	1.203	450
4	26.84	23.66	0.293	0.469	1.248	900
5	34.6	32.34	0.327	0.483	1.214	900
6	43.28	45.91	0.357	0.515	1.18	900
7	32.74	34.71	0.377	0.515	1.213	900
8	21.54	22.41	0.412	0.51	1.182	450
9	9.23	13.18	0.422	0.588	1.259	450
Второй каскад						
1	14.68	16.37	0.2	0.527	1.311	900
10	20.11	18.64	0.227	0.481	1.282	900
11	22.38	20.08	0.256	0.473	1.27	900
12	23.82	21.22	0.285	0.471	1.263	900
13	24.96	22.28	0.318	0.472	1.257	900
14	26.02	23.52	0.353	0.475	1.251	900
15	27.26	25.32	0.391	0.482	1.244	900
16	29.06	27.9	0.433	0.49	1.234	900
17	31.63	29.65	0.48	0.484	1.225	900
18	20.21	20.53	0.529	0.504	1.191	450
19	11.09	9.44	0.559	0.46	1.274	450

Поток отбора получился равным $P = 9,44$ г/с, что меньше, чем в расчете из таблицы 2.1. Это объясняется меньшей эффективностью рассмотренной конфигурации системы каскадов из ограничения по количеству центрифуг в ступенях.

Таким образом, проведенные расчеты показали эффективность разработанного метода для систем из двух каскадов. Аналогичным образом могут быть оптимизированы системы из большого числа каскадов, соединенных сложным образом.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ МНОГОПОТОЧНЫХ КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ УРАНА

3.1. Аналитическая оценка содержания минорных изотопов урана в каскадах, оптимизированных на обогащение ^{235}U

На практике часто возникает необходимость без детальных поступенных расчетов каскада оценить содержание минорных изотопов урана в потоках каскадов, оптимизируемых на обогащение ^{235}U . Такие каскады могут иметь несколько питаний и отборов, что существенно затрудняет проведение расчетов.

В работах [67, 68] предложена расчетная модель каскада в виде набора участков ступеней, на каждом из которых точка подачи питания может быть также и точкой отбора. Такая модель позволяет получить общие аналитические соотношения для оптимального каскада, пригодные для расчета концентраций минорных изотопов урана при произвольном числе потоков питания и отбора каскада.

3.1.1. Основные параметры и уравнения каскада

Расчетная модель каскада, состоящего из произвольного количества n участков ступеней, представлена на рисунке 3.1. Каждый участок характеризуется заданными концентрациями ^{235}U и имеет на правом конце потоки питания и отбора. Исключение составляет последний участок, имеющий только поток отбора. В этой модели считается, что на конце каждого участка не происходит смешения по ^{235}U . Потоки питания или отбора принимаются в расчете равными нулю, если они отсутствуют у конкретно рассматриваемого каскада.

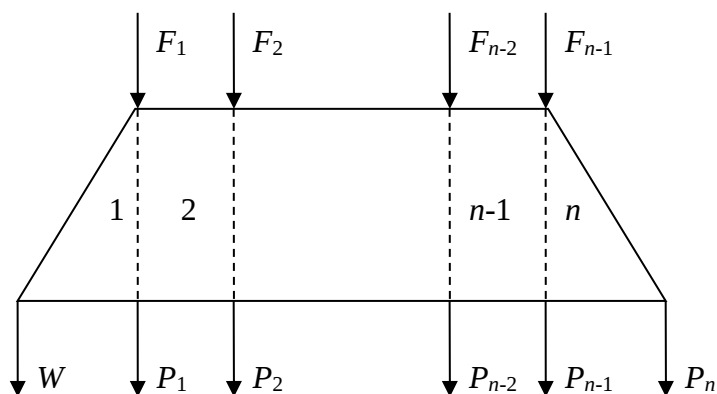


Рисунок 3.1 - Схема каскада из n участков ступеней

Обозначим поток отвала каскада как W , потоки питания – $F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$ и потоки отбора – $P_1, P_2, \dots, P_n$. Введем концентрации ^{235}U на отвале – C^W и на правых концах участков – $C_1, \dots, C_n$, а также концентрации минорного изотопа урана (один из изотопов ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U) в потоках отвала, питаний и отборов – $C_m^W, C_m^{F1}, C_m^{F2}, \dots, C_m^{Fn-1}, C_m^{P1}, C_m^{P2}, \dots, C_m^{Pn}$. Перечисленные параметры каскада являются внешними и связаны уравнениями баланса:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n-1} F_j &= W + \sum_{j=1}^n P_j; \quad \sum_{j=1}^{n-1} C_j F_j = W C^W + \sum_{j=1}^n C_j P_j; \\ \sum_{j=1}^{n-1} C_m^{Fj} F_j &= W C_m^W + \sum_{j=1}^n C_m^{Pj} P_j. \end{aligned} \quad (3.1)$$

В основной постановке задачи с учетом уравнений (3.1) должны быть заданы значения потоков – $W, F_1, F_2, \dots, F_{n-1}, P_1, P_2, \dots, P_n$, концентрации ^{235}U – $C^W, C_1, \dots, C_n$ и концентрации минорного изотопа урана в питаниях каскада – $C_m^{F1}, C_m^{F2}, \dots, C_m^{Fn-1}$. Требуется найти концентрации минорного изотопа в отвале и отборах – $C_m^W, C_m^{P1}, C_m^{P2}, \dots, C_m^{Pn}$.

Эти величины рассчитываются по соответствующим концентрациям ступеней, которые относятся к внутренним параметрам каскада и зависят от принятого критерия его эффективности. При оптимизации каскада на обогащение ^{235}U оценка $C_m^W, C_m^{P1}, C_m^{P2}, \dots, C_m^{Pn}$ может быть произведена аналогично [12, 46] –

исходя из дифференциальных уравнений, описывающих изменения концентраций изотопов по ступеням каскада при малых обогащениях:

$$\frac{dC}{df} = \varepsilon_0(\bar{\mu} - \mu)C - \frac{2(\tau_{5j} - \tau_j C)}{L}; \quad (3.2)$$

$$\frac{dC_m}{df} = \varepsilon_0(\bar{\mu} - \mu_m)C - \frac{2(\tau_{mj} - \tau_j C_m)}{L}, \quad (3.3)$$

где C , C_m – концентрация ^{235}U и оцениваемого минорного изотопа в питании ступени; f – номер ступени (для выбранной модели эта величина непрерывная) при их отсчете от отвала каскада; ε_0 – полный коэффициент обогащения на единицу разности массовых чисел; $\bar{\mu}$ – среднее массовое число смеси, определяемое суммированием по всем изотопам; μ , μ_m – массовое число для ^{235}U и оцениваемого минорного изотопа; L – поток питания f -й ступени; τ_j , τ_{5j} , τ_{mj} – транзитный поток смеси, ^{235}U и оцениваемого минорного изотопа соответственно, определяемый в направлении отбора каскада на j -м участке:

$$\tau_1 = -W; \quad \tau_j = -W - \sum_{k=1}^{j-1} (P_k - F_k); \quad (3.4)$$

$$\tau_{51} = -WC^W; \quad \tau_{5j} = -WC^W - \sum_{k=1}^{j-1} (P_k C^{P_k} - F_k C^{F_k}); \quad (3.5)$$

$$\tau_{m1} = -WC^W; \quad \tau_{mj} = -WC_m^W - \sum_{k=1}^{j-1} (P_k C_m^{P_k} - F_k C_m^{F_k}). \quad (3.6)$$

Необходимым условием использования такого подхода является существенная малость концентраций минорных изотопов урана по сравнению с концентрациями ^{235}U . В таком случае распределение изотопов ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U по ступеням определяется содержанием ^{235}U , а его распределение в оптимальном каскаде практически соответствует идеальному для разделения бинарной смеси ^{235}U , ^{238}U . Например, метод применим для расчета каскадов с питанием регенерированным ураном марки «РС», но не применим для каскадов с питанием

регенерированным ураном марки «РТ», содержание ^{236}U в котором сопоставимо с содержанием ^{235}U .

3.1.2. Решение задачи оптимизации

Уравнение (3.3) для концентрации минорного изотопа может быть преобразовано к виду, допускающему получение аналитических оценок $C_m^W, C_m^{P1}, C_m^{P2}, \dots, C_m^{Pn}$. Для этого величина $(\bar{\mu} - \mu_m)$ выражается как $(\bar{\mu} - \mu_m) \approx 3(1 - C) - (\mu_m - \mu)$, а потоки ступеней на j -м участке определяются по формулам идеального каскада, т.е.

$$L = \frac{4(\tau_{5j} - \tau_j C)}{\varepsilon C(1 - C)}, \quad (3.7)$$

где $\varepsilon = 3\varepsilon_0$ – полный коэффициент обогащения ^{235}U по отношению к ^{238}U . Отсюда оптимальное изменение концентрации ^{235}U по ступеням равно $dC_m/df = 1/2\varepsilon C(1 - C)$ и, переходя в (3.3) от dC_m/df к dC_m/dC , получим:

$$\frac{dC_m}{dC} = \frac{2C_m}{C} \left[1 - \frac{\Delta\mu_m}{3(1 - C)} \right] - \frac{\tau_{mj} - \tau_j C_m}{\tau_{5j} - \tau_j C}, \quad (3.8)$$

где $\Delta\mu_m = \mu_m - \mu$. Решение этого уравнения записывается в виде

$$C_m = C^2 R^{-\frac{2}{3}\Delta\mu_m} \frac{\tau_{mj}(R^d + K^{(j)})}{\left(1 - \frac{2}{3}\Delta\mu_m\right)(\tau_{5j} - \tau_j C)}, \quad (3.9)$$

где $d = 2/3\Delta\mu_m - 1$, $R = C/(1 - C)$, $K^{(j)}$ – константа интегрирования на j -м участке.

На первом участке, подставляя выражение для транзитного потока минорного изотопа $\tau_{m1} = -WC_m^W$ и раскрывая неопределенность 0 на 0 при $C = C^W$, получим $K^{(1)} = -R_W^d$. Аналогично на последнем n -м участке, раскрывая неопределенность при $C = C_n$ для выполнения $C_m = C_m^{Pn}$, находим $K^{(n)} = -R_n^d$.

Для удобства введем обозначение

$$\alpha^{(j)}(C) = \frac{C^2 R^{-\frac{2}{3}\Delta\mu_m}}{\left(1 - \frac{2}{3}\Delta\mu_m\right)(\tau_{5j} - \tau_j C)}. \quad (3.10)$$

Уравнение (3.9) при подстановке в него концентрации изотопа ^{235}U $C = C_1$ и транзитного потока τ_{mj} описывает зависимость концентрации C_m^{P1} от минорной концентрации отвала: $C_m^{P1} = \alpha^{(1)}(C_1)(-WC_m^W)(R_1^d - R_W^d)$. На границах второго участка получим

$$\begin{aligned} C_m^{P1} &= \alpha^{(2)}(C_1)(-WC_m^W - P_1 C_m^{P1} + F_1 C_m^{F1})(R_1^d + K^{(2)}); \\ C_m^{P2} &= \alpha^{(2)}(C_1)(-WC_m^W - P_1 C_m^{P1} + F_1 C_m^{F1})(R_2^d + K^{(2)}). \end{aligned} \quad (3.11)$$

Отсюда, приравняв C_m^{P1} на границах первого и второго участков, находим $K^{(2)}$. Затем, подставив $K^{(2)}$ в (3.11), выражаем C_m^{P2} как функцию от τ_{m1} и τ_{m2} , а следовательно, от C_m^W .

Аналогично определяются константы интегрирования и находятся отборные концентрации минорного изотопа на других участках. Общее выражение для них записывается в виде

$$C_m^{Pj} = \alpha^{(j)}(C_j) \sum_{k=1}^j (R_k^d - R_{k-1}^d), j = \overline{1, n-1}, \quad (3.12)$$

где $R_0^d = R_W^d$.

На левой границе последнего участка исходя из уравнения баланса минорного изотопа (3.1) получим $C_m^{P_{n-1}} = \alpha^{(n-1)}(C_{n-1})(P_n C_m^{P_n} - F_n C_m^{F_n})(R_{n-1}^d - R_n^d)$. Отсюда с учетом (3.12) концентрация $C_m^{P_n}$ равна

$$C_m^{P_n} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \tau_m^{(j)} (R_j^d - R_{j-1}^d)}{P_n (R_{n-1}^d - R_n^d)}. \quad (3.13)$$

Соотношения (3.12) и (3.13) определяют зависимости концентраций отбора минорного изотопа от концентрации отвала C_m^W . Ее величина рассчитывается при раскрытии выражений для транзитных потоков и подстановке всех концентраций

в уравнение баланса минорного изотопа. В результате преобразований для каскада из двух участков

$$C_m^W = \frac{F_1 C_m^{F_1} (R_2^d - R_1^d)}{W \left((R_2^d - R_W^d) - \alpha^{(1)}(C_1) P_1 (R_1^d - R_W^d) (R_2^d - R_1^d) \right)}.$$

Для каскада из трех участков

$$C_m^W = \frac{F_1 C_m^{F_1} \left((R_2^d - R_1^d) - \tilde{\alpha}^{(2)} (R_3^d - R_2^d) \right) + F_2 C_m^{F_2} (R_3^d - R_2^d)}{W \left((R_3^d - R_W^d) - \sum_{j=1}^2 \tilde{\alpha}^{(j)} (R_3^d - R_j^d) + \tilde{\alpha}^{(1)} \tilde{\alpha}^{(2)} (R_3^d - R_2^d) \right)},$$

где $\tilde{\alpha}^{(k)} = \alpha^{(k)}(C_k) P_k (R_k^d - R_{k-1}^d)$. Аналогично определяются формулы расчета C_m^W для каскада, состоящего из большего числа участков.

Для расчета содержания минорных изотопов в отборах и отвале каскада необходимо рассчитать сначала концентрацию минорного изотопа в отвале. Затем, двигаясь последовательно по участкам каскада от отвала к отбору, рассчитать концентрации минорного изотопа в дополнительных отборах и основном отборе по формулам (3.12) и (3.13).

3.1.3. Исследование свойств модельных каскадов

Проверка аналитической методики проводилась на данных работы [69] по очистке обедненных отвалов в дополнительном отборе каскада с двумя питаниями. Разница в концентрациях $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ для случаев обогащения урана с различной концентрацией ^{235}U , как правило, не превышает долей процента (таблицы 3.1, 3.2).

Таблица 3.1 - Очистка в каскаде отвала промышленного природного гексафторида урана

Параметр	Масса UF ₆ , т	²³⁵ U, %	²³⁴ U, %	²³² U, %	²³⁶ U, %
питание 1	100	0,711	0,0054		
питание 2	10	0,35	0,0018	$1,3 \cdot 10^{-10}$	0,0014
Численный расчет [69]:					
отбор 1	10	0,35	0,0014	$6,1 \cdot 10^{-12}$	0,0002
отбор 2	14,2	4,4	0,0369	$8,5 \cdot 10^{-11}$	0,0004
отвал	85,8	0,1	0,0002	$3,1 \cdot 10^{-13}$	0,0001
Аналитический расчет:					
отбор 1	10	0,35	0,0014	$6,4 \cdot 10^{-12}$	0,0002
отбор 2	14,2	4,4	0,0369	$8,5 \cdot 10^{-11}$	0,0004
отвал	85,8	0,1	0,0002	$3,2 \cdot 10^{-13}$	0,0001

Таблица 3.2 - Очистка в каскаде отвала переработанного гексафторида урана, полученного из облученного топлива промышленных реакторов

Параметр	Масса UF ₆ , т	²³⁵ U, %	²³⁴ U, %	²³² U, %	²³⁶ U, %
питание 1	100	0,711	0,0054		
питание 2	10	0,4	0,0028	$3,9 \cdot 10^{-10}$	0,01
Численный расчет [69]:					
отбор 1	10	0,4	0,0017	$1,7 \cdot 10^{-11}$	0,0012
отбор 2	14,2	4,4	0,0373	$2,6 \cdot 10^{-10}$	0,0033
отвал	85,8	0,1	0,0002	$6,7 \cdot 10^{-13}$	0,0005
Аналитический расчет:					
отбор 1	10	0,4	0,0017	$1,9 \cdot 10^{-11}$	0,0012
отбор 2	14,2	4,4	0,0373	$2,6 \cdot 10^{-10}$	0,0032
отвал	85,8	0,1	0,0002	$6,4 \cdot 10^{-13}$	0,0005

3.2. Аналитическая оценка содержания изотопов слабообогащенного регенерированного урана в каскадах, оптимизированных на обогащение одного из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$

3.2.1. Описание модели

В работах [70, 71] предложен способ оценки содержания изотопов во внешних потоках оптимальных многопоточных каскадов для случая слабообогащенного регенерированного урана, который характеризуется повышенной концентрацией $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Рассматриваемые каскады могут быть оптимизированы по любому из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$.

Расчетная модель каскада в данном случае аналогична рассмотренной в п. 3.1.1. Отличие заключается в том, что C означает концентрацию целевого изотопа из числа $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$, по которому производится оптимизация каскада. Соответственно C_m – концентрация оцениваемого изотопа из указанного набора. Решение задачи основано на рассмотрении уравнений баланса (3.1) и изменения концентраций изотопов по ступеням (3.2) и (3.3). При этом вместо τ_{5j} в уравнение (3.2) необходимо ввести τ_{0j} – транзитный поток целевого изотопа в направлении отбора на j -м участке, а под τ_{mj} понимать соответствующий поток оцениваемого изотопа.

Для случая слабообогащенного регенерированного урана концентрация изотопа ^{235}U в ступенях каскада не превышает 5 %, минорных $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в сумме составляет не более (1 – 2) %. Исходя из этого, среднее массовое число изотопной смеси определяется ^{238}U и изменяется по ступеням каскада слабо. Его можно принять константой и определять усредненным по всем питаниям, подаваемым в каскад.

3.2.2. Решение задачи оптимизации

Оптимальные потоки ступеней рассчитываются в соответствии с критерием оптимизации. Если в качестве него принять минимизацию суммарного потока при заданной внешней концентрации целевого изотопа, то из условия

$$\sum_{j=1}^n \int_{C_{j-1}}^{C_j} \frac{L dC}{dC/df} \rightarrow \min \quad (3.14)$$

с учетом $C_0 = C^W$ следует

$$L = \frac{4(\tau_{0j} - \tau_j C)}{\varepsilon_0(\bar{\mu} - \mu)C}; \quad (3.15)$$

$$\frac{dC}{df} = \frac{1}{2} \varepsilon_0(\bar{\mu} - \mu)C. \quad (3.16)$$

Отсюда, переходя в уравнении (3.3) от dC_m/df к dC_m/dC , получим уравнение для определения концентрации оцениваемого изотопа урана:

$$\frac{dC_m}{dC} = 2 \frac{(\bar{\mu} - \mu_m) C_m}{(\bar{\mu} - \mu) C} - \frac{\tau_{mj} - \tau_j C_m}{\tau_{0j} - \tau_j C}. \quad (3.17)$$

Решение этого уравнения можно представить в виде

$$C_m = \tau_{mj} \frac{C^{1-d}(K^{(j)} + C^d)}{(-d)(\tau_{0j} - \tau_j C)}, \quad (3.18)$$

где $K^{(j)}$ – константа интегрирования, $d = 1 - 2(\bar{\mu} - \mu_m)/(\bar{\mu} - \mu)$.

На первом участке, подставляя выражение для транзитного потока оцениваемого изотопа $\tau_{m1} = -WC_m^W$ и раскрывая неопределенность 0 на 0 при $C = C^W$, получим $K^{(1)} = -(C^W)^d$. Аналогично на последнем n -м участке, раскрывая неопределенность при $C = C_n$, находим $K^{(n)} = -C_n^d$. Для удобства введем обозначение $\alpha^{(j)}(C_i) = C_i^{1-d}/(-d)(\tau_{0j} - \tau_j C_i)$.

Уравнение (3.18) при подстановке в него концентрации ^{235}U C_1 и транзитного потока τ_{m1} описывает зависимость концентрации оцениваемого изотопа в потоке

отбора C_m^{P1} от концентрации этого изотопа в потоке отвала:

$$C_m^{P1} = \alpha^{(1)}(C_1)(-WC_m^W)(C_1^d - (C^W)^d).$$

На границах второго участка получим

$$C_m^{P1} = \alpha^{(2)}(C_1)(-WC_m^W - P_1 C_m^{P1} + F_1 C_m^{F1})(C_1^d + K^{(2)}); \quad (3.19)$$

$$C_m^{P2} = \alpha^{(2)}(C_1)(-WC_m^W - P_1 C_m^{P1} + F_1 C_m^{F1})(C_2^d + K^{(2)}).$$

Значение $\alpha^{(1)}(C_1) = \alpha^{(2)}(C_1)$. Отсюда, приравняв концентрацию оцениваемого изотопа в потоке отбора C_m^{P1} на границах первого и второго участков, находится константа интегрирования $K^{(2)}$. Затем, при подстановке ее в уравнение (3.13), выражается концентрация оцениваемого изотопа в потоке отбора C_m^{P2} как функция от τ_{m1} и τ_{m2} , следовательно, от C_m^W .

Аналогично определяются константы интегрирования $K^{(3)}, K^{(4)}, \dots, K^{(n-1)}$ и концентрация потока отбора оцениваемого изотопа на других участках. Общее выражение для них записывается в виде

$$C_m^{Pj} = \alpha^{(j)}(C_j) \sum_{k=1}^j \tau_{mk} (C_k^d - C_{k-1}^d), \quad j = \overline{1, n-1}, \quad (3.20)$$

где транзитный поток оцениваемого изотопа τ_{mj} является функцией концентрации потока отвала оцениваемого изотопа C_m^W .

На левой границе n -го участка исходя из уравнения баланса оцениваемого изотопа (3.1): $C_m^{Pn-1} = \alpha^{(n-1)}(C_{n-1})(P_n C_m^{Pn} - F_n C_m^{Fn})(C_{n-1}^d - C_n^d)$. Отсюда с учетом выражения (3.20) концентрация оцениваемого изотопа C_m^{Pn} в потоке отбора P_n равна

$$C_m^{Pn} = \frac{\sum_{k=1}^j \tau_{mk} (C_k^d - C_{k-1}^d)}{P_n (C_{n-1}^d - C_n^d)}. \quad (3.21)$$

По соотношениям (3.20), (3.21) определяется зависимость концентрации оцениваемого изотопа C_m^{Pn} в потоке отбора P_n от концентрации в потоке отвала C_m^W при подстановке выражений для всех концентраций отбора в уравнение

баланса оцениваемого изотопа. В результате преобразований для каскада из двух участков получим

$$C_m^W = \frac{F_1 C_m^{F_1} (C_2^d - C_1^d)}{W[(C_2^d - C_W^d) - \alpha^{(1)}(C_1)P_1(C_1^d - C_W^d)(C_2^d - C_1^d)]}.$$

Аналогично для каскада из трех участков

$$C_m^W = \frac{F_1 C_m^{F_1} Z_1 + F_2 C_m^{F_2} (C_3^d - C_2^d)}{W Z_2},$$

где

$$\begin{aligned} Z_1 &= (C_3^d - C_1^d) - \alpha^{(2)}(C_2)P_2(C_2^d - C_1^d)(C_3^d - C_2^d); \\ Z_2 &= (C_3^d - C_W^d) - \sum_{k=1}^2 [\alpha^{(k)}(C_k)P_k(C_k^d - C_W^d)(C_3^d - C_k^d)] \\ &\quad + \alpha^{(1)}(C_1)\alpha^{(2)}(C_2)P_1P_2(C_1^d - C_W^d)(C_2^d - C_1^d)(C_3^d - C_2^d). \end{aligned}$$

Для расчета содержания оцениваемых изотопов в потоках отбора каскада необходимо сначала рассчитать концентрацию оцениваемого изотопа в отвале. Затем, двигаясь последовательно по участкам каскада от отвала к отбору, рассчитать концентрацию оцениваемого изотопа в дополнительных потоках отбора и потоке основного отбора по формулам (3.20) и (3.21).

3.2.3. Исследование свойств модельных каскадов

Расчеты показали хорошее согласие разработанного аналитического метода с численной оптимизацией каскада по методике [61]. Различие в концентрациях оцениваемых изотопов для случаев обогащения регенерированного урана, как правило, не превышает долей процента для большинства изотопов (таблицы 3.3, 3.4). Различие в результатах расчетов на несколько процентов для ^{232}U объясняется его малой концентрацией, при этом погрешность при использовании численного метода возрастает.

Таблица 3.3 – Параметры каскада из двух участков при оптимизации по ^{235}U

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Питание	100	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,85	0,35
Отвал	86,59				
численно [61]		$7,6 \cdot 10^{-9}$	0,00308	0,3	0,205
аналитически		$7,1 \cdot 10^{-9}$	0,00302	0,3	0,206
Отбор	13,41				
численно [61]		$1,07 \cdot 10^{-6}$	0,0994	4,4	1,277
аналитически		$1,07 \cdot 10^{-6}$	0,0998	4,4	1,278

Таблица 3.4 – Параметры каскада из двух участков при оптимизации по ^{236}U

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Питание	100	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,85	0,35
Отвал	86,59				
численно [61]		$4,8 \cdot 10^{-8}$	0,00814	0,539	0,27
аналитически		$4,5 \cdot 10^{-8}$	0,00798	0,535	0,27
Отбор	13,41				
численно [61]		$9,8 \cdot 10^{-7}$	0,0799	3,379	1,0
аналитически		$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,0812	3,406	1,0

Расчеты отразили характерные свойства оптимальных каскадов с дополнительным потоком отбора и питания в одной точке. Для изотопа ^{236}U концентрация в дополнительном отборе увеличивается по сравнению с питанием. Для ^{232}U и ^{234}U – уменьшается (таблица 3.5). Это свойство связано с разницей массовых чисел указанных изотопов и ^{235}U .

Таблица 3.5 - Параметры каскада из двух участков с дополнительным отбором, оптимизированного по ^{235}U

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Питание	100	$1,50 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,85	0,35
Отвал	77,93	$7,45 \cdot 10^{-9}$	0,003	0,3	0,204
Дополнительный отбор	10	$8,72 \cdot 10^{-8}$	0,014	0,85	0,388
Отбор	12,07	$1,12 \cdot 10^{-6}$	0,101	4,4	1,262

3.3. Расчет каскада с несколькими питаниями и отборами по срезам парциальных потоков

3.3.1. Основные параметры и уравнения модели

В работах [72, 73] получены соотношения для определения параметров каскада по изменяющимся по ступеням срезам парциальных потоков многокомпонентной смеси. Они обобщают методики [40, 42] на случай нескольких потоков питания и отбора.

Принципиальная схема многопоточного каскада, состоящего из n ступеней, представлена на рисунке 3.2. Внешние питания подаются в каждую ступень. Дополнительные отборы каскада забираются из отвалов второй и последующих ступеней. Внешние параметры каскада, показанные на схеме, удовлетворяют уравнениям баланса вещества и каждого компонента смеси:

$$\sum_{j=1}^n F_j = \sum_{j=2}^n P_j + P + W, \quad \sum_{j=1}^n F_j C_{ij}^F = \sum_{j=2}^n P_j C_{ij}^P + P C_i^P + W C_i^W, \quad i = \overline{1, m}, \quad (3.22)$$

где F_j , P_j , P , W – соответственно потоки питания в j -ю ступень, дополнительного отбора из j -й ступени, основного отбора и отвала каскада; C_{ij}^F , C_i^{Pj} , C_i^P , C_i^W –

концентрации i -го изотопа в этих потоках; m – количество компонентов изотопной смеси.

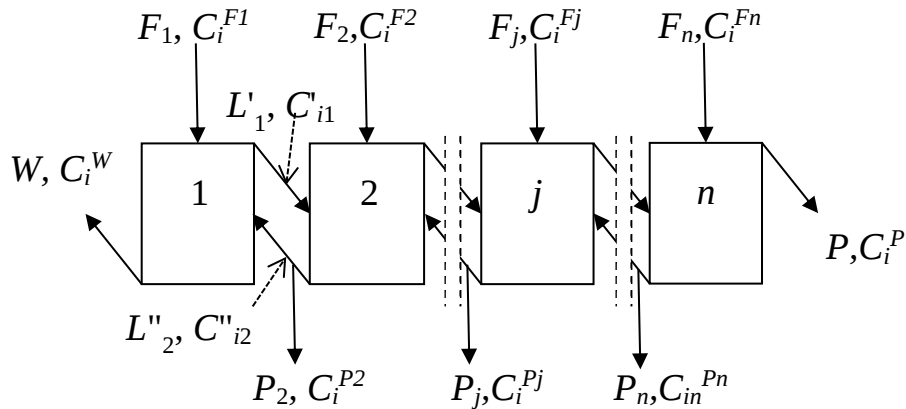


Рисунок 3.2 - Схема многопоточного каскада

Такие же уравнения справедливы для внутренних параметров каждой ступени. Пусть L_j , L'_j , L''_j – потоки питания, отбора, отвала j -й ступени; C_{ij} , C'_{ij} , C''_{ij} – соответствующие концентрации i -го изотопа. Тогда

$$L_j = L'_j + L''_j, \quad L_j C_{ij} = L'_j C'_{ij} + L''_j C''_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3.23)$$

Подобным образом определяются связи межступенных потоков, которые заданы схемой на рисунке 3.2:

$$\begin{aligned} L_1 &= L'_2 + F_1 - P_2, \quad L_1 C_{i1} = L'_2 C'_{i2} + F_1 C_i^{F1} - P_2 C_i^{P2}, \quad i = \overline{1, m}; \\ L_j &= L'_{j-1} + L''_{j+1} + F_j - P_{j+1}, \quad j = \overline{2, n-1}; \\ L_j C_{ij} &= L'_{j-1} C'_{ij-1} + L''_{j+1} C''_{ij-1} + F_j C_i^{Fj} - P_{j+1} C_i^{P_{j+1}}, \quad j = \overline{2, n-1}, \quad i = \overline{1, m}; \\ L_n &= L'_{n-1} + F_n, \quad L_n C_{in} = L'_{n-1} C'_{in-1} + F_n C_i^{Fn}, \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Полные коэффициенты разделения по определению равны

$$q_{ij} = \frac{C'_{ij} C''_{mj}}{C''_{ij} C'_{mj}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.25)$$

где m – выбранный опорный компонент. Компоненты изотопной смеси обычно нумеруются в порядке возрастания массового числа. Тогда m – номер наиболее тяжелого изотопа. Величины q_{ij} рассчитываются по известным зависимостям от потока питания L_i , количества разделительных элементов в ступени N_i , и

коэффициента деления потока $\theta_j = L'_j / L_j$. Упрощенно можно усреднить q_{ij} в рабочей области изменения параметров ступеней и использовать их как известные константы.

При определении общего числа внутренних и внешних независимых параметров необходимо учитывать их связи, накладываемые граничными условиями

$$L''_1 = W, \quad L'_n = P, \quad C''_{i1} = C_i^W, \quad C''_{ij} = C_i^{Pj}, \quad C'_{in} = C_i^P, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{2, n}. \quad (3.26)$$

Кроме того, часть уравнений, связывающих внешние параметры, являются зависимыми. Поэтому общее число независимых внешних и внутренних параметров каскада на рисунке 3.2 составляет $n(m+2) - 1$.

При задании всех потоков и концентраций внешних питаний, потоков дополнительных отборов каскада (в том числе нулевых – в случае отсутствия питания или дополнительного отбора), остается n внутренних параметров, которые могут быть заданы или определены путем решения оптимизационной задачи по принятому критерию эффективности.

3.3.2. Расчет параметров каскада

Можно перейти от перечисленных параметров каскада к парциальным потокам компонентов изотопной смеси. Для i -го изотопа в питании, отборе и отвале j -й ступени они равны $L_{ij} = L_j C_{ij}$, $L'_{ij} = L_j C'_{ij}$, $L''_{ij} = L''_j C''_{ij}$. Тогда срез парциальных потоков представляются в виде

$$\varphi_{ij} = L'_{ij} / L_{ij} = \sigma_j q_{ij} / (1 + \sigma_j q_{ij}), \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.27)$$

где σ_j – коэффициенты, определяющие соотношение между обогащениями в отвале и отборе j -й ступени, которые не зависят от рассматриваемого изотопа.

Отсюда следует, что в качестве n независимых параметров каскада, по которым может производиться его расчет, удобно использовать коэффициенты $\sigma_j, j = \overline{1, n}$. Из (3.27) так же видно, что срез парциальных потоков ступеней при

заданных σ_j и q_{ij} не зависят от L_{ij} , что позволяет найти аналитическое решение для парциальных потоков. Согласно уравнениям баланса в сечении перед $(j+1)$ -й ступенью каскада можно записать транзитный поток i -го компонента в сторону отвала в виде

$$\begin{aligned} W_{ij+1} &= L''_{ij+1} - L'_{ij} = L_{ij+1} - L'_{ij+1} - L'_{ij} = \\ &= \left(1 - \frac{L'_{ij+1}}{L_{ij+1}}\right) L_{ij+1} - \frac{L'_{ij}}{L_{ij}} L_{ij}, \quad j = \overline{0, n}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

тогда

$$L''_{ij+1} - L'_{ij} = (1 - \varphi_{ij+1}) L_{ij+1} - \varphi_{ij} L_{ij} = W_{ij+1}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (3.29)$$

Здесь $L_{i0} = L'_{i0} = 0$ и $L_{in+1} = L''_{in+1} = 0$, что соответствует граничным условиям. Поток W_{ij+1} рассчитывается по формулам

$$W_{i1} = WC_i^W, \quad W_{ij+1} = WC_i^W - \sum_{s=1}^j (F_s C_i^{F_s} - P_{s+1} C_i^{P_{s+1}}), \quad j = \overline{1, n-1}. \quad (3.30)$$

Уравнение (3.29) – линейное разностное с переменными коэффициентами, зависящими для i -го изотопа только от номера ступени. Парциальные потоки i -го изотопа в питании первых ступеней равны

$$\begin{aligned} L_{i1} &= W_{i1} \frac{1}{1 - \varphi_{i1}}; \\ L_{i2} &= W_{i2} \frac{1}{1 - \varphi_{i2}} + W_{i1} \frac{\varphi_{i1}}{(1 - \varphi_{i1})(1 - \varphi_{i2})}; \\ L_{i3} &= W_{i3} \frac{1}{1 - \varphi_{i3}} + W_{i2} \frac{\varphi_{i2}}{(1 - \varphi_{i2})(1 - \varphi_{i3})} + W_{i1} \frac{\varphi_{i1} \varphi_{i2}}{(1 - \varphi_{i1})(1 - \varphi_{i2})(1 - \varphi_{i3})}. \end{aligned}$$

Следовательно, можно записать общую формулу

$$L_{ij} = \frac{1}{\varphi_{ij}} \sum_{l=1}^j W_{il} \prod_{s=l}^j \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (3.31)$$

Если подставить (3.31) в граничное условие (3.29) при $j = n$, то парциальный поток i -го изотопа на отвале каскада W_i выражается в виде

$$W_i = WC_i^W = \sum_{j=1}^n \left[\left(F_j C_{ij}^F - P_{j+1} C_i^{P_{j+1}} \right) \frac{1 + \sum_{l=j+1}^n \prod_{s=l}^n \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}}{1 + \sum_{l=1}^n \prod_{s=l}^n \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}} \right], \quad i = \overline{1, m}, \quad (3.32)$$

где $P_n = P$, $C_i^{P_n} = C_i^P$, $P_{n+1} = 0$, $C_i^{P_{n+1}} = 0$.

Из уравнений баланса определяется парциальный поток i -го изотопа на отборе

$$P_i = PC_i^P = \sum_{j=1}^n (F_j C_{ij}^F - P_{j+1} C_i^{P_{j+1}}) - W_i, i = \overline{1, m}. \quad (3.33)$$

Формулы (3.27) – (3.33) позволяют рассчитать парциальные потоки всех компонентов изотопной смеси по различным задаваемым коэффициентам σ_j и q_{ij} , количеству ступеней n и характеристикам питания и отбора F_j , C_{ij}^F , P_j , $C_i^{P_j}$. По найденным значениям этих переменных определяются другие параметры каскада:

$$P = \sum_{i=1}^m P_i, W = \sum_{i=1}^m W_i, C_i^P = \frac{P_i}{P}, L_j = \sum_{i=1}^m L_{ij}, C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L}, L'_{ij} = \phi_{ij} L_{ij}, L'_j = \sum_{i=1}^m L'_{ij},$$

и т.д.

В частном случае отсутствия дополнительных отборов каскада получаемые соотношения аналогичны формулам [42], а для ординарного каскада – [40]. Если же взять одинаковые σ_j по ступеням, то выражения (3.27) – (3.33) будут описывать квазиидеальный каскад с произвольным количеством питаний и дополнительных отборов.

Для расчета каскада по формулам (3.27) – (3.33) требуется предварительно задать все концентрации в дополнительных отборах каскада. Эти концентрации, однако, не являются независимыми. Они равны соответствующим концентрациям отвала ступеней и также определяются в результате расчета. В связи с этим целесообразно использовать итерационную процедуру подбора этих величин.

Первый расчет каскада производится без дополнительных потоков отбора. Полученные значения концентраций отвала ступеней принимаются в качестве начальных приближений для концентраций дополнительных отборов во втором расчете. Далее концентрации дополнительных потоков отбора задаются равными средним арифметическим величинам между рассчитанными концентрациями отвала соответствующих ступеней для двух последних итераций. Подбор прекращается, когда для каждой концентрации разность между значениями,

полученными на предыдущей и текущей итерации, не уменьшится до заданной величины.

3.4. Оптимизация каскадов по срезам парциальных потоков

При оптимизации каскадов целесообразно выбирать критерии, имеющие физический смысл, а также отражающие экономическую либо технологическую эффективность [60].

3.4.1. Оптимизация каскада по критерию максимума разделительной способности

Оптимизация каскада производится путем варьирования коэффициентов σ_j ступеней. Как показали расчеты, при любых критериях эффективности можно использовать метод Хука – Дживса.

Одной из задач, которая решается на основе разработанного подхода, является оптимизация по критерию [42, 45]

$$\Psi = E / \sum_{j=1}^n L_j \rightarrow \max, \quad (3.34)$$

где E – эффективная разделительная способность каскада, рассчитываемая по его внешним параметрам. Для каскада, приведенного на рисунке 3.2, ее величина равна

$$E = WV(C_1^W, C_2^W, \dots, C_m^W) + \sum_{j=2}^n P_j V(C_1^{Pj}, C_2^{Pj}, \dots, C_m^{Pj}) + \\ + PV(C_1^P, C_2^P, \dots, C_m^P) - \sum_{j=1}^n F_j V(C_1^{Fj}, C_2^{Fj}, \dots, C_m^{Fj}). \quad (3.35)$$

Здесь $V(\dots)$ – потенциал разделения, зависящий от концентраций изотопов и особенностей рассматриваемого процесса разделения.

В наиболее простом случае, когда многокомпонентность смеси обусловлена небольшим количеством “примесных” изотопов, а основными являются два компонента, может быть использован потенциал разделения вида [44]:

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \left(\frac{\Delta M_{m1}}{\Delta M_{rs}} \right)^2 (C_r - C_s) \ln \frac{C_r}{C_s} + \sum_{i=1, i \neq r, s}^n \left(\frac{\Delta M_{m1}}{\Delta M_{rs}} \right)^2 C_i \ln \frac{C_r}{C_i}, \quad (3.36)$$

где $\Delta M_{ji} = M_j - M_i$ – разность массовых чисел j -го и i -го изотопов; r и s – номера целевого и второго компонента смеси, на разделение которых затрачивается основная часть разделительной способности каскада.

В таблицах 3.6 и 3.7 для примера приведены результаты расчетов оптимального каскада, состоящего из 10 ступеней с одним питанием и двумя дополнительными потоками отбора.

Таблица 3.6 - Внешние параметры каскадов, оптимизированных по критерию (3.34)

Параметр		Каскад без дополнительных потоков отбора	Каскад с дополнительными потоками отбора
$C^W, \%$	^{235}U	0,331	0,333
	^{234}U	0,002	0,002
$C^P, \%$	^{235}U	1,741	1,732
	^{234}U	0,017	0,017
$C^{P2}, \%$	^{235}U	-	0,388
	^{234}U	-	0,002
$C^{P6}, \%$	^{235}U	-	0,709
	^{234}U	-	0,005
$W, \text{г/с}$		7,306	5,606
$P, \text{г/с}$		2,695	2,394
$\Sigma L_j, \text{г/с}$		278,6	237,9
E		5,715	4,920
ψ		0,021	0,021

Разделяемая смесь гексафторида урана состояла из трех изотопов: ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U . При расчете потенциала разделения в качестве целевого изотопа выбран ^{235}U . Второй компонент смеси, на разделение которого затрачивается основная

часть разделительной способности каскада – ^{238}U . Подача питания осуществлялась в ступень №5. Дополнительные потоки отбора каскада – в ступенях №2 и №6.

Таблица 3.7 - Внутренние параметры каскада с дополнительными отборами, полученные при оптимизации

Сту- пень	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ_j	1,157	1,274	1,163	1,163	1,169	1,232	1,166	1,168	1,175	1,227
Концентрации ^{234}U , %										
C_j	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009	0,011	0,014
C'_j	0,003	0,003	0,004	0,005	0,007	0,008	0,009	0,011	0,014	0,017
C''_j	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009	0,011
Концентрации ^{235}U , %										
C_j	0,388	0,454	0,525	0,610	0,710	0,828	0,957	1,111	1,289	1,497
C'_j	0,451	0,525	0,610	0,709	0,825	0,958	1,113	1,291	1,497	1,732
C''_j	0,333	0,388	0,451	0,524	0,610	0,709	0,823	0,956	1,109	1,283
Потоки UF_6 , г/с										
L	10,40	20,18	30,48	38,50	45,50	33,82	25,57	17,62	10,80	5,03
L'	4,79	9,79	14,09	17,80	21,09	16,13	11,84	8,17	5,03	2,39
L''	5,61	10,40	16,39	20,70	24,41	17,70	13,73	9,45	5,78	2,63

Для всех ступеней приняты одинаковые полные коэффициенты разделения ^{234}U относительно ^{238}U $q_1 = 1,5$ и ^{235}U относительно ^{238}U : $q_2 = 1,355$. В качестве исходных данных использовались следующие параметры: $P_2 = 1$ г/с, $P_6 = 1$ г/с, $F = 10$ г/с, $C^F_1 = 0,0058$ %, $C^F_2 = 0,711$ %. Для сравнения выбран каскад с аналогичными исходными параметрами и критерием оптимизации, без дополнительных потоков отбора. В каскаде с дополнительными отборами потоки основного отбора и отвала, а также концентрация изотопа ^{235}U в основном отборе имеют более низкие значения, чем в каскаде, выбранном для сравнения. Концентрация изотопа ^{235}U в отвале имеет более высокое значение.

3.4.2. Оптимизация каскада при заданных концентрациях целевого компонента

В работах [74, 75] сохранена общая вычислительная схема [72], но часть переменных выбирается из условия обеспечения заданных внешних концентраций целевого компонента в отборе и отвале каскада. На основе видоизмененной схемы проведен вычислительный эксперимент для ординарных каскадов для разделения изотопов урана, показавший эффективность расчетов.

В качестве критерия эффективности каскада была принята минимизация суммарного потока ступеней при заданных внешних концентрациях целевого компонента

$$\sum_{j=1}^n L_j \rightarrow \min. \quad (3.37)$$

Оптимизационный расчет проводился в два цикла. Внешний цикл отвечает за оптимизацию каскада по критерию (3.37). В качестве параметров использовались коэффициенты σ_j , при этом $j = \overline{2, n-1}$. Внутренний цикл отвечает за сшивку каскада по заданным концентрациям отбора и отвала целевого компонента. В качестве параметров использовались коэффициенты σ_1 и σ_n . Критерием сшивки является

$$k_W \frac{|C_i^W - C_i^{W*}|}{C_i^{W*}} + k_P \frac{|C_i^P - C_i^{P*}|}{C_i^{P*}} \rightarrow \min, \quad (3.38)$$

где C_i^W и C_i^P – рассчитанная концентрация целевого i -го компонента, C_i^{W*} и C_i^{P*} – заданная концентрация целевого компонента, k_W и k_P – весовые коэффициенты, $k_W \in [0,1]$, $k_P \in [0,1]$.

Расчеты показали, что для выбранного критерия и параметров оптимизации применим метод Хука-Дживса. В качестве начальных значений для оптимизации были рассчитаны коэффициенты σ_j при заданных параметрах R -каскада по двум выбранным ключевым компонентам.

Вычислительный эксперимент показал, что в случае постоянных коэффициентов k_W и k_P для многих конфигураций каскадов не удастся найти решение, удовлетворяющее заданной концентрации целевого изотопа с необходимой точностью. Для сходимости таких конфигураций с заданной внешней концентрацией, необходимо варьировать коэффициенты k_W и k_P .

Результаты оптимизации одного из каскадов представлены в таблицах 3.8, 3.9. Расчет произведен для каскада из 11 ступеней и пятикомпонентной смеси изотопов урана. В качестве ключевых изотопов для расчета начальных значений по R -каскаду выбраны ^{235}U и ^{238}U . Подача питания осуществлялась в ступень №5. Были заданы: $F = 10$ г/с, $C_1^F = 1 \cdot 10^{-9}$ %, $C_2^F = 0,0058$ %, $C_3^F = 0,711$ %, $C_4^F = 0,002$ %, $C_5^F = 99,281$ %, $k_W = k_P = 1$, $q_{235-238} = 2$, $C_3^W = 0,4$ %, $C_3^P = 5,0$ %.

Таблица 3.8 - Внешние параметры оптимального трехпоточного каскада

Параметр	Значение		
Концентрация, %	Отвал	Питание	Отбор
^{232}U	$1,03 \cdot 10^{-10}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$
^{234}U	0,002	0,0058	0,058
^{235}U	0,4	0,711	5,0
^{236}U	0,0015	0,002	0,008
Потоки UF_6 , г/с	9,32	10	0,68
$\sum_{j=1}^n L_j$, г/с	361,37		

Таблица 3.9 - Внутренние параметры оптимального трехпоточного каскада

Ступень	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
σ_j	2,78	1,42	0,94	1,09	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,66
Концентрация ^{235}U , %											
Питание	0,51	0,61	0,74	0,9	1,05	1,35	1,72	2,17	2,71	3,39	4,04
Отбор	0,57	0,72	0,90	1,08	1,27	1,63	2,08	2,62	3,27	4,04	5,00
Отвал	0,4	0,51	0,64	0,76	0,9	1,16	1,48	1,87	2,34	2,89	3,59
Потоки UF_6 , г/с											
Питание	27,7	55,5	61,9	60,6	59,7	38,9	24,9	15,6	9,4	5,2	2,1
Отбор	18,4	27,8	24,8	26,4	23,9	15,6	10,0	6,3	3,8	2,1	0,7
Отвал	9,3	27,7	37,1	34,2	35,7	23,3	14,9	9,4	5,6	3,1	1,4

ГЛАВА 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА В КАСКАДАХ

4.1. Очистка регенерированного урана в дополнительном отборе *R*-каскада и его обогащение в ординарном каскаде

В работах [76, 77] разработан способ очистки регенерированного урана в дополнительном потоке отбора *R*-каскада с последующим обогащением очищенного продукта в ординарном каскаде. Расчеты проведены на основе методики [72]. Основной эффект заключается в понижении концентрации ^{232}U , ^{234}U в дополнительном отборе *R*-каскада, построенного по различным ключевым компонентам.

4.1.1. Исходные данные для расчета каскадов

Рассчитываемые каскады состояли из 51 ступени с подачей питания в ступень с номером 45. Данная конфигурация каскада была задана исходя из принятых коэффициентов разделения смеси и необходимости обеспечения концентрации ^{235}U в пределах до 5 % на основном отборе и 0,04 – 0,3 % на отвале. При таких концентрациях на отвале продукт основного отбора удовлетворяет требованиям ASTM C 996–15 [65] для низкообогащенного регенерированного урана и может быть использован для изготовления соответствующего реакторного топлива. Поток питания F составлял 10 г/с и состоял из смеси изотопов: ^{232}U – $1,5 \cdot 10^{-7}$ %, ^{234}U – $1,6 \cdot 10^{-2}$ %, ^{235}U – 0,85 %, ^{236}U – 0,35 %. Выбранные концентрации питания соответствуют характерному изотопному составу регенерированного урана. Номер ступени дополнительного отбора k варьировался от 2 до 48, величина его потока P_k – от 1 г/с до 4 г/с с шагом в 0,1 г/с. Коэффициент разделения на единицу разности молекулярных масс был принят равным 1.091. Во всех каскадах концентрация ^{235}U

в отборе не превышала 5 %. Коэффициенты σ_j задавались одинаковыми по ступеням каждого из каскадов исходя из формулы для R -каскадов [4]

$$\sigma_j = \frac{1}{\sqrt{q}}, \quad (4.1)$$

где q определялся по массовым числам ключевых компонентов.

В каждом варианте расчета дополнительный отбор R -каскада подавался на питание ординарного каскада, параметры которого рассчитывались по аналитическим формулам [70]. На отвале этого каскада была задана концентрация ^{235}U – 0,3 %, в отборе – 4,4 %. Концентрация ^{235}U в отборе ординарного каскада принята исходя из требуемого его содержания в топливе 3,2 – 3,6 % с учетом паразитного захвата нейтронов изотопом ^{236}U и коэффициента компенсации 0,2 – 0,3. Содержание минорного изотопа ^{232}U в отборе данного каскада ограничивалась $1 \cdot 10^{-8}$ %, ^{234}U – $4,8 \cdot 10^{-2}$ %. Указанные концентрации изотопов соответствуют требованиям спецификации ASTM C 996–15 к низкообогащенному промышленному урану с концентрацией ^{235}U 4,4 %.

4.1.2. Результаты расчета каскадов

В процессе расчетов было установлено, что при увеличении потока дополнительного отбора в нем снижается концентрация компонентов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. При увеличении номера ступени дополнительного отбора концентрации компонентов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в нем увеличиваются [77]. В таблицах 4.1, 4.2 для примера приведены соответствующие расчеты R -каскада по ключевым компонентам ^{232}U и ^{236}U . Введены обозначения: P_k – поток дополнительного отбора из ступени R -каскада с номером k , C_{ik}^P – концентрация i -го компонента в потоке P_k , P – поток основного отбора R -каскада, C_i^P – концентрация i -го компонента в потоке P , $P2$ – поток отбора ординарного каскада, $C2_i^P$ – концентрация i -го компонента в потоке $P2$.

Таблица 4.1 - Концентрации изотопов в дополнительном отборе из ступени № 14
R-каскада по компонентам $^{232,236}\text{U}$ при различных потоках P_k

$P_k, \text{ г/с}$	$C_{ik}^P, \%$			
	^{232}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U
1.7	$6,45 \cdot 10^{-10}$	$7,03 \cdot 10^{-3}$	0,8498	0,4057
1.8	$6,41 \cdot 10^{-10}$	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,8394	0,4030
1.9	$6,36 \cdot 10^{-10}$	$6,81 \cdot 10^{-3}$	0,8292	0,4004
2.0	$6,32 \cdot 10^{-10}$	$6,70 \cdot 10^{-3}$	0,8193	0,3978
2.1	$6,28 \cdot 10^{-10}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$	0,8096	0,3952
2.2	$6,24 \cdot 10^{-10}$	$6,50 \cdot 10^{-3}$	0,8002	0,3927
2.3	$6,20 \cdot 10^{-10}$	$6,40 \cdot 10^{-3}$	0,7909	0,3902
2.4	$6,16 \cdot 10^{-10}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	0,7819	0,3878
2.5	$6,12 \cdot 10^{-10}$	$6,21 \cdot 10^{-3}$	0,7731	0,3853
2.6	$6,09 \cdot 10^{-10}$	$6,12 \cdot 10^{-3}$	0,7644	0,3829
2.7	$6,05 \cdot 10^{-10}$	$6,03 \cdot 10^{-3}$	0,7560	0,3806
2.8	$6,01 \cdot 10^{-10}$	$5,95 \cdot 10^{-3}$	0,7477	0,3782
2.9	$5,97 \cdot 10^{-10}$	$5,87 \cdot 10^{-3}$	0,7397	0,3759
3.0	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$5,79 \cdot 10^{-3}$	0,7318	0,3736

Из этих результатов следует, что для каждого выбранного значения потока P_k дополнительного отбора *R*-каскада существует оптимальный номер ступени, при котором поток отбора P_2 ординарного каскада при последующем обогащении будет максимален с учетом принятых ограничений. На рисунке 4.1 для различных *R*-каскадов приведены графики зависимостей максимальных потоков P_2 от P_k .

Следует отметить, что при выполнении ограничений на концентрации $^{232, 234}\text{U}$ содержание ^{236}U в потоке отбора ординарного каскада увеличивается с ростом P_k (рисунок 4.2). В связи с этим можно снизить поток отбора ординарного каскада для того, чтобы уменьшить концентрацию ^{236}U [78].

Таблица 4.2 - Концентрации изотопов в дополнительном отборе R -каскада по компонентам $^{232,236}\text{U}$ при $P_k=2,7$ г/с и различных k

k	$C_{ik}^P, \%$			
	^{232}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U
2	$5,58 \cdot 10^{-11}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	0,469	0,287
3	$6,96 \cdot 10^{-11}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$	0,504	0,300
4	$8,64 \cdot 10^{-11}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$	0,537	0,312
5	$1,07 \cdot 10^{-10}$	$3,54 \cdot 10^{-3}$	0,568	0,324
6	$1,31 \cdot 10^{-10}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	0,597	0,334
7	$1,60 \cdot 10^{-10}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$	0,623	0,343
8	$1,95 \cdot 10^{-10}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	0,648	0,351
9	$2,37 \cdot 10^{-10}$	$4,69 \cdot 10^{-3}$	0,670	0,358
10	$2,87 \cdot 10^{-10}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	0,691	0,364
11	$3,47 \cdot 10^{-10}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$	0,709	0,369
12	$4,18 \cdot 10^{-10}$	$5,50 \cdot 10^{-3}$	0,726	0,373
13	$5,03 \cdot 10^{-10}$	$5,77 \cdot 10^{-3}$	0,742	0,377
14	$6,05 \cdot 10^{-10}$	$6,03 \cdot 10^{-3}$	0,756	0,381

С увеличением потока P_k повышается поток питания ординарного каскада. Одновременно понижается концентрация ^{235}U в питании. Эти два фактора действуют противоположно с точки зрения получения потока отбора P_2 при заданных концентрациях на отборе и отвале ординарного каскада. Первый из них способствует увеличению P_2 , второй – его уменьшению. В результате при некотором оптимальном значении P_k наблюдается максимум P_2 (рисунок 4.1).

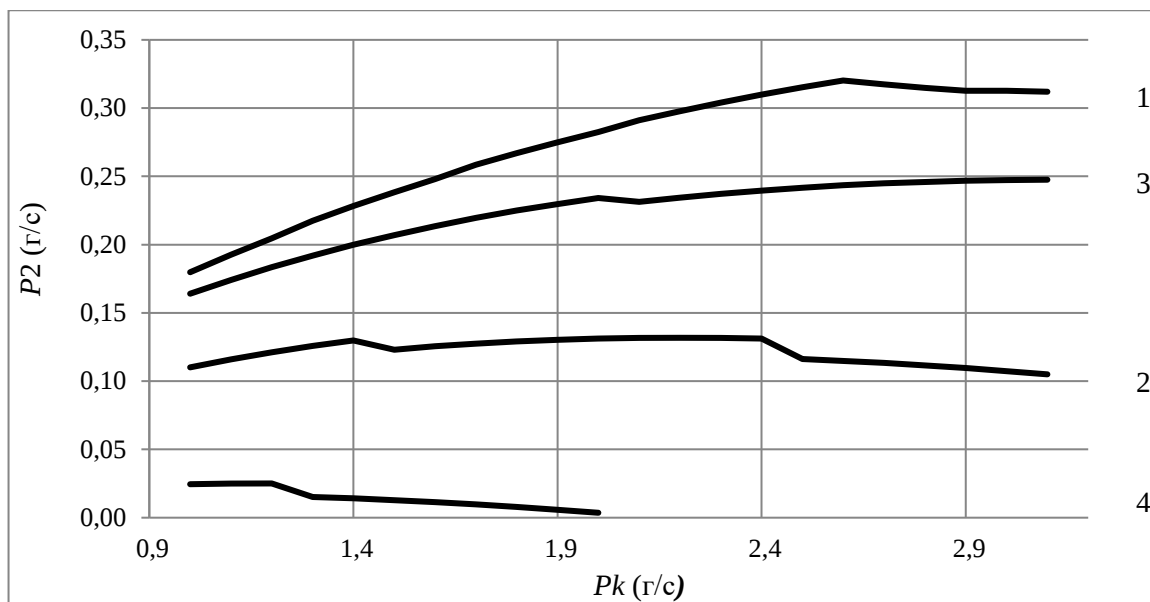


Рисунок 4.1 - Зависимость потока отбора ординарного каскада от потока дополнительного отбора R -каскада: 1 – по компонентам $^{232,236}\text{U}$; 2 – по $^{232,238}\text{U}$; 3 – по $^{234,235}\text{U}$; 4 – по $^{235,236}\text{U}$.

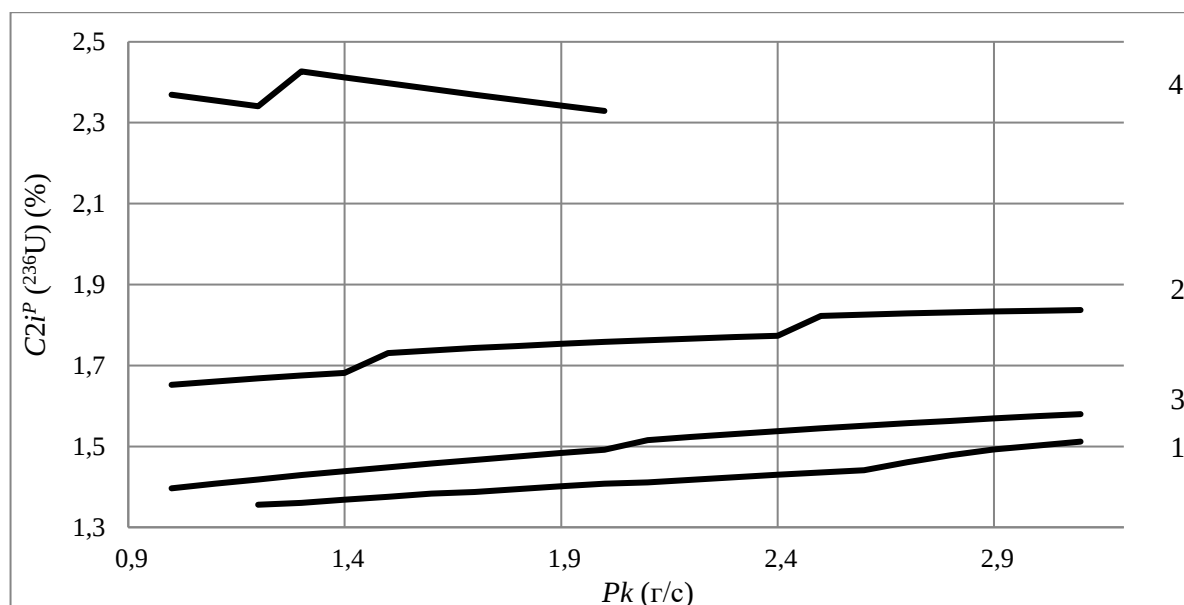


Рисунок 4.2 - Зависимость концентрации ^{236}U в отборе ординарного каскада от потока дополнительного отбора R -каскада: 1 – по компонентам $^{232,236}\text{U}$; 2 – по $^{232,238}\text{U}$; 3 – по $^{234,235}\text{U}$; 4 – по $^{235,236}\text{U}$.

В таблицах 4.3 и 4.4 приведены параметры дополнительных отборов R -каскадов, соответствующих наибольшим значениям потока P_2 , при которых выполняются принятые ограничения по $^{232,234}\text{U}$. Они свидетельствуют о том, что наилучшим является R -каскад по компонентам $^{232,236}\text{U}$. При этом поток отбора

ординарного каскада содержит наименьшее количество изотопа ^{236}U . Суммарный поток ΣL в этом R -каскаде также заметно ниже, чем в других случаях. Изотопный состав основных отборов R -каскадов, наилучших с точки зрения потока P_2 , соответствует требованиям спецификации ASTM C 996–15 к низкообогащенному регенерированному урану.

Таблица 4.3 - Параметры R -каскадов и ординарных с наибольшим значением потока отбора P_2

R -каскад	k	P_k , г/с	ΣL , г/с	C_{ik}^P , %				$C_i^P(^{235}\text{U})$, %	P_2 , г/с
				^{232}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U		
$^{232,236}\text{U}$	14	4,4	2356,6	$5,47 \cdot 10^{-10}$	$4,86 \cdot 10^{-3}$	0,636	0,344	4,948	0,36
$^{232,238}\text{U}$	29	3,0	2821,1	$1,74 \cdot 10^{-9}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$	0,523	0,339	3,939	0,16
$^{234,235}\text{U}$	26	3,2	2575,8	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$5,15 \cdot 10^{-3}$	0,656	0,362	4,496	0,28
$^{235,236}\text{U}$	32	1,4	3093,9	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	0,485	0,368	3,412	0,06

Таблица 4.4 - Параметры ординарных каскадов с наибольшим значением потока P_2 , соответствующих R -каскадам с различными ключевыми компонентами

R -каскад	P_2 , г/с	C_2^P , %		
		^{232}U	^{234}U	^{236}U
$^{232,236}\text{U}$	0,36	$2,46 \cdot 10^{-9}$	$4,31 \cdot 10^{-2}$	1,44
$^{232,238}\text{U}$	0,16	$8,98 \cdot 10^{-9}$	$3,96 \cdot 10^{-2}$	1,77
$^{234,235}\text{U}$	0,28	$8,83 \cdot 10^{-9}$	$4,40 \cdot 10^{-2}$	1,58
$^{235,236}\text{U}$	0,06	$9,89 \cdot 10^{-9}$	$3,54 \cdot 10^{-2}$	2,34

Разработанный метод позволяет производить очистку регенерированного урана от минорных изотопов 232 , ^{234}U в дополнительном отборе R -каскада при концентрации ^{235}U до 5 % в основном отборе. Очищенный продукт может быть обогащен в отдельном каскаде при выполнении требований ASTM C 996–15 по этим изотопам для низкообогащенного промышленного урана. Наилучшим с точки зрения получения максимального потока обогащенного очищенного продукта является R -каскад, построенный по ключевым компонентам 232 , ^{236}U .

4.2. Очистка регенерированного гексафторида урана в двухкаскадной схеме при обогащении ^{235}U менее 5%

4.2.1. Общие принципы построения схем каскадов

В работах [79, 80] предложены две схемы построения двойных каскадов. Обе схемы позволяют эффективно произвести очистку регенерированного урана от ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U . В первой схеме второй каскад питается отвалом первого, во второй – питанием второго каскада является отбор первого. Общие принципы построения этих схем аналогичны методам [16, 17]. Очищенному регенерированному гексафториду урана соответствует отбор (первая схема) и отвал (вторая схема) второго трехпоточного каскада. Первый каскад имеет два потока питания, один отбор и один отвал. На его питания подаются природный и регенерированный гексафторид урана. Низкообогащенный гексафторид урана с концентрацией ^{235}U менее 5 % получается в отборе первого каскада (первая схема) и отборе второго каскада (вторая схема).

Расчет каскадов газовых центрифуг производился по срезам парциальных потоков [72-75, 81]. Полный коэффициент разделения ступеней по компонентам ^{235}U , ^{238}U для газовых центрифуг был задан равным 1,3. Потоки каскадов рассчитывались исходя из заданной на внешнем питании исходной массы гексафторида урана, расходуемой в течение одного года работы.

В качестве начального приближения для коэффициентов σ_i был использован R -каскад по компонентам ^{235}U , ^{238}U .

4.2.2. Двойной каскад с питанием второго каскада отвалом первого

Первая схема представлена на рисунке 4.3. В этой схеме отвал первого каскада подается на питание второго.

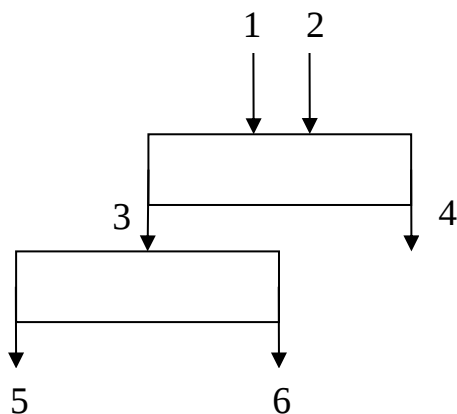


Рисунок 4.3 - Двухкаскадная схема для очистки регенерированного урана с питанием второго каскада из отвала первого: 1, 2 – питание природным и регенерированным ураном, 3, 4 – отвал и отбор первого каскада, 5, 6 – отвал и отбор второго каскада

В отборе первого каскада получается низкообогащенный уран, в отборе второго каскада – уран с концентрацией изотопа ^{235}U , совпадающей с концентрацией этого изотопа в питании регенерированным ураном, но с уменьшенной концентрацией изотопов ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U . Поток отбора второго каскада задавался равным потоку питания регенерированным ураном. Этот отбор соответствует очищенному регенерированному гексафториду урана. Данные параметры схемы эквивалентны отсутствию дополнительных затрат работы разделения на очистку. С учетом этого по уравнениям баланса вещества и изотопа определялись внешние потоки каскадов и концентрацию ^{235}U в отвале первого.

В таблице 4.5 представлен пример расчета двойного каскада по схеме, соответствующей рисунку 4.3. На питание первого каскада подавалось 1000 т природного и 10 т регенерированного гексафторида урана. Распределение концентраций в первом потоке питания: ^{234}U – 0,0054 %, ^{235}U – 0,711 %. Во втором потоке питания: ^{232}U – $1,5 \cdot 10^{-7}$ %, ^{234}U – 0,016 %, ^{235}U – 0,85 %, ^{236}U – 0,35 %.

Заданная концентрация ^{235}U в низкообогащенном гексафториде урана – 3,6 %, в отвале второго каскада – 0,1 %. Первый каскад состоял из 28 ступеней, природный гексафторид уран подавался в ступень с номером 16, регенерированный – в ступень с номером 17. Второй каскад состоял из 17 ступеней, питание подавалось в ступень с номером 2.

Таблица 4.5 - Параметры двухкаскадной схемы с питанием второго каскада из отвала первого

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Первый каскад:					
питание 1	1000		0,0054	0,711	
питание 2	10	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,85	0,35
отбор	174,57	$8,58 \cdot 10^{-9}$	0,0306	3,6	0,0143
отвал	835,43	$3,44 \cdot 10^{-12}$	0,0003	0,109	0,0012
Второй каскад:					
питание	835,43	$3,44 \cdot 10^{-12}$	0,0003	0,109	0,0012
отбор	10	$6,56 \cdot 10^{-11}$	0,003	0,85	0,0055
отвал	825,43	$2,69 \cdot 10^{-12}$	0,0003	0,1	0,0011

В отборе второго каскада существенно снизилась концентрация минорных изотопов: ^{232}U – $6,65 \cdot 10^{-11}$ %, ^{234}U – 0,003 %, ^{236}U – 0,0055 %. Таким образом, произошла очистка регенерированного гексафторида урана. Полученные продукты в отборах первого и второго каскадов удовлетворяют требованиям международной спецификации ASTM C 996–15 (^{232}U – $1 \cdot 10^{-8}$ %, ^{234}U – 11 000 мкг/г ^{235}U , ^{236}U – 0,025 %) для низкообогащенного промышленного гексафторида урана.

4.2.3. Двойной каскад с питанием второго каскада отбором первого

Вторая схема двойного каскада представлена на рисунке 4.4. В отборе второго каскада получается низкообогащенный уран, в отвале – уран с концентрацией изотопа ^{235}U , совпадающей с концентрацией этого изотопа в питании регенерированным ураном. Поток отвала второго каскада равен потоку питания регенерированным ураном. С учетом этого из уравнений баланса вещества и изотопа определялись внешние потоки каскадов и концентрацию ^{235}U в отборе первого.

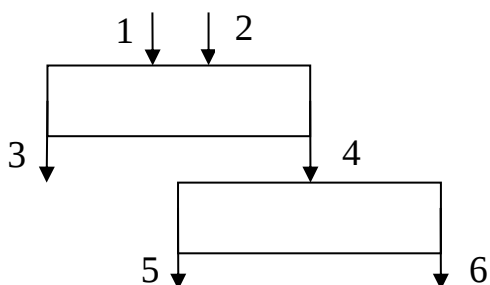


Рисунок 4.4 - Двухкаскадная схема для очистки регенерированного урана с питанием второго каскада из отбора первого: 1, 2 – питание природным и регенерированным ураном, 3, 4 – отвал и отбор первого каскада, 5, 6 – отвал и отбор второго каскада.

В таблице 4.6 приведен пример расчета двойного каскада по схеме, представленной на рисунке 4.4. Характеристики питания первого каскада аналогичны таблице 4.5. Заданная концентрация ^{235}U в низкообогащенном гексафториде урана – 3,6 %, в отвале первого каскада – 0,1 %. Первый каскад состоял из 28 ступеней, природный гексафторид урана подавался в ступень с номером 16, регенерированный – в ступень с номером 17. Второй каскад состоял из 11 ступеней, питание подавалось в последнюю ступень. В отвале второго каскада получились концентрации минорных изотопов: ^{232}U – $2,49 \cdot 10^{-10}$ %, ^{234}U – 0,0038 %, ^{236}U – 0,006 %. Это несколько больше, чем в отборе второго каскада в первой схеме. Тем не менее, это существенно лучше, чем в питании регенерированным гексафторидом урана. Полученные продукты в отборе и отвале

второго каскада удовлетворяют требованиям ASTM C 996–15 для низкообогащенного коммерческого гексафторида урана.

Таблица 4.6 - Параметры двухкаскадной схемы с питанием второго каскада из отбора первого

Параметр	Масса UF ₆ , т	²³² U, %	²³⁴ U, %	²³⁵ U, %	²³⁶ U, %
Первый каскад:					
питание 1	1000		0,0054	0,711	
питание 2	10	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,850	0,35
отбор	184,57	$8,11 \cdot 10^{-9}$	0,0291	3,451	0,0139
отвал	825,43	$2,68 \cdot 10^{-12}$	0,0002	0,1	0,0011
Второй каскад:					
питание	184,57	$8,11 \cdot 10^{-9}$	0,0291	3,451	0,0139
отбор	174,57	$8,57 \cdot 10^{-9}$	0,0305	3,6	0,0143
отвал	10	$2,49 \cdot 10^{-10}$	0,0038	0,85	0,006

В таблице 4.7 представлен расчет двухкаскадной схемы для случая, когда концентрация ²³⁵U в отвале первого каскада составляет 0,2%. Параметры питания схемы, число ступеней в каскадах и заданная концентрация ²³⁵U в отборе второго каскада аналогичны таблице 4.6. В этом случае по сравнению с рассмотренным примером из таблицы 4.6 концентрация ²³², ²³⁴U в отвале второго каскада несколько увеличивается: ²³²U до $2,78 \cdot 10^{-10}$ %, ²³⁴U до 0,0041 %. При этом концентрация ²³⁶U снижается до 0,0059 %.

В таблице 4.8 представлен расчет двухкаскадной схемы для случая, когда заданная концентрация ²³⁵U в низкообогащенном уране составляет 4,1 %. Параметры питания схемы, число ступеней в первом каскаде и заданная концентрация ²³⁵U в отвале первого каскада аналогичны таблице 4.6. Второй каскад состоял из 12 ступеней, питание подавалось в последнюю. В этом случае при некотором росте концентрации ²³⁶U до 0,0063 % в отвале второго каскада качество очистки регенерированного урана по ²³², ²³⁴U улучшается заметно: $1,96 \cdot 10^{-10}$ % по

^{232}U и 0,0035 % по ^{234}U . Таким образом, увеличение концентрации ^{235}U в отборе второго каскада более предпочтительно, чем ее уменьшение в отвале первого каскада.

Таблица 4.7 - Параметры двухкаскадной схемы при измененной концентрации ^{235}U в отвале первого каскада

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Первый каскад:					
питание 1	1000		0,0054	0,711	
питание 2	10	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,850	0,35
отбор	160,29	$9,24 \cdot 10^{-9}$	0,0309	3,428	0,0136
отвал	849,706	$2,14 \cdot 10^{-11}$	0,0001	0,2	0,0016
Второй каскад:					
питание	160,29	$9,24 \cdot 10^{-9}$	0,0309	3,428	0,0136
отбор	150,29	$9,84 \cdot 10^{-9}$	0,0327	3,6	0,0141
отвал	10	$2,87 \cdot 10^{-10}$	0,0041	0,85	0,0059

Таблица 4.8 - Параметры двухкаскадной схемы при измененной концентрации ^{235}U в отборе второго каскада

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Первый каскад:					
питание 1	1000		0,0054	0,711	
питание 2	10	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,850	0,35
отбор	162,75	$9,2 \cdot 10^{-9}$	0,033	3,9	0,0154
отвал	847,25	$2,61 \cdot 10^{-12}$	0,0002	0,1	0,0012
Второй каскад:					
питание	162,75	$9,2 \cdot 10^{-9}$	0,033	3,9	0,0154
отбор	152,75	$9,78 \cdot 10^{-9}$	0,035	4,1	0,016
отвал	10	$1,96 \cdot 10^{-10}$	0,0035	0,85	0,0063

При сдвиге точки подачи питания регенерированным гексафторидом урана в сторону отвала первого каскада можно существенно увеличить его поток при сохранении одинаковых требований ASTM C 996–15 для продуктов, получаемых в отборе и отвале второго каскада. В таблице 4.9 представлены расчеты при подаче регенерированного гексафторида урана в первую ступень первого каскада. Концентрация ^{235}U питания, отбора и отвалов схемы, концентрация изотопов ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U в питаниях первого каскада и число ступеней в нем соответствует таблице 4.6. Вторым каскадом состоял из 11 ступеней, питание подавалось в ступень под номером 10. Поток питания природным гексафторидом урана составляет 1000 т, регенерированным – 25 т. В отвале второго каскада, который соответствует очищенному регенерированному урану, получилась несколько меньшая и близкая к таблице 4.6 концентрация изотопов: ^{232}U – $2,27 \cdot 10^{-10}$ %, ^{234}U – 0,0038 %, ^{236}U – 0,0013 %. Их содержание в отборе второго каскада меньше, чем в таблице 4.7: ^{232}U – $7,43 \cdot 10^{-9}$ %, ^{234}U – 0,0301 %, ^{236}U – 0,0031 %.

Таблица 4.9 - Параметры двухкаскадной схемы при его подаче в первую ступень первого каскада

Параметр	Масса UF_6 , т	^{232}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Первый каскад:					
питание 1	1000		0,0054	0,711	
питание 2	25	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,016	0,850	0,35
отбор	199,57	$6,53 \cdot 10^{-9}$	0,0268	3,256	0,0029
отвал	825,43	$2,96 \cdot 10^{-9}$	0,0005	0,1	0,0099
Второй каскад:					
питание	199,57	$6,53 \cdot 10^{-9}$	0,0268	3,256	0,0029
отбор	174,57	$7,43 \cdot 10^{-9}$	0,0301	3,6	0,0031
отвал	25	$2,27 \cdot 10^{-10}$	0,0038	0,85	0,0013

Разработанный метод позволяет производить в двухкаскадной схеме эффективную очистку регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ без дополнительных затрат работы разделения. Предложенный метод очистки запатентован [82].

4.3. Очистка регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с двумя питаниями

В работах [83, 84] приведены расчетные исследования по очистке регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с двумя питаниями. На основное питание каскада подается регенерированный уран, на второе – природный или отвалный. Концентрация дополнительного отбора совпадает с концентрацией регенерированного урана на питании, его поток меньше. Такая каскадная схема позволяет получать в основном отборе низкообогащенный регенерированный гексафторид урана, в дополнительном – продукт с такой же концентрацией ^{235}U и пониженной $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Полный коэффициент разделения ступеней на единицу разности массовых чисел компонентов задавался равным 1,091. Потоки каскадов рассчитывались исходя из заданной на внешнем питании исходной массы гексафторида урана, расходуемой в течение одного года работы. Суммарный поток питания ступеней характеризовал число разделительных элементов.

4.3.1. Очистка с использованием на втором питании природного гексафторида урана

По сравнению с каскадами с одним питанием [85, 86] использование природного гексафторида урана на втором питании уменьшает концентрацию $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ как в дополнительном отборе, так и в основном. В таблице 4.10

приведены расчеты квазиидеальных каскадов с двумя питаниями, скорректированных на заданные концентрации ^{235}U . Задание $\sigma = \sqrt{q_3} = 0,877$ определяет R-каскад по ключевым компонентам $^{235}, ^{238}\text{U}$. В этом случае скорректированный каскад практически совпадает с оптимальным по критерию минимума суммарного потока. Задание $\sigma = \sqrt{q_1} = 0,769$ определяет R-каскад по ключевым компонентам $^{232}, ^{238}\text{U}$.

Таблица 4.10 - Концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскадов с использованием на втором питании природного гексафторида урана

Параметр каскада	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %	^{232}U , %	^{236}U , %
Каскад №1	$\sigma = 0,877, n = 25, f = 13, p = 12$ при суммарном потоке 481,6 г/с:				
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	20	0,711	0,0054		
Отбор 1	10	0,85	0,011	$5,7 \cdot 10^{-8}$	0,35
Отбор 2	17,5	4,4	0,087	$8,2 \cdot 10^{-7}$	1,16
Отвал	92,5	0,15	0,001	$8,8 \cdot 10^{-10}$	0,12
Каскад №2	$\sigma = 0,769, n = 49, f = 43, p = 19$ при суммарном потоке 895,1 г/с:				
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	20	0,711	0,0054		
Отбор 1	10	0,85	0,004	$2,9 \cdot 10^{-10}$	0,36
Отбор 2	17,5	4,4	0,094	$8,6 \cdot 10^{-7}$	1,12
Отвал	92,5	0,15	0,0003	$1 \cdot 10^{-12}$	0,13

На основное питание подается регенерированный гексафторид урана с концентрациями, % ^{232}U $1,5 \cdot 10^{-7}$, ^{234}U 0,016, ^{236}U 0,35; на второе – природный, с концентрацией, %: ^{235}U 0,711, ^{234}U 0,0054. Питание природным гексафторидом урана составляет 20 т, что в 5 раз меньше питания регенерированным. При таком питании концентрация ^{236}U в дополнительном отборе составляет 0,35–0,36 %, что

соответствует регенерированному гексафториду урана на питании. Для каскада, рассчитанного при $\sigma = 0,877$, число ступеней $n = 25$, номер ступени основного питания $f = 13$, номер ступени второго питания $p = 12$. Концентрации в дополнительном отборе составляют, %: ^{232}U $5,7 \cdot 10^{-8}$, ^{234}U 0,011, ^{236}U 0,35. По $^{232}, ^{234}\text{U}$ это меньше, чем в питании. Каскад, рассчитанный при $\sigma = 0,769$, имеет число ступеней $n = 49$, номер ступени основного питания $f = 43$, номер ступени второго питания $p = 19$. Концентрации $^{232}, ^{234}\text{U}$ дополнительного отбора ниже, чем в предыдущем варианте, %: ^{232}U $2,9 \cdot 10^{-10}$, ^{234}U 0,004. Снижение этих концентраций характеризуется увеличением суммарного потока в 1.9 раз.

Наличие второго дополнительного отбора в каскаде позволяет снизить затраты работы разделения при условии, что концентрация ^{235}U и поток этого отбора совпадают с дополнительным питанием природным ураном. Каскады с тремя отборами рассчитывались аналитически в соответствии с методикой [70] (таблица 4.11). На основное питание подается регенерированный гексафторид урана, на второе – природный, с потоком 50 т и концентрацией, %: ^{235}U 0,711, ^{234}U 0,0054. В дополнительных отборах производится 50 т урана концентрацией ^{235}U 0,711 % и 10 т концентрацией ^{235}U 0,85 %.

Таблица 4.11 - Концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с использованием на втором питании природного гексафторида урана и тремя отборами

Параметр каскада	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %	^{232}U , %	^{236}U , %
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	50	0,711	0,0054		
Отбор 1	10	0,85	0,011	$6,6 \cdot 10^{-8}$	0,35
Отбор 2	50	0,711	0,0083	$3,6 \cdot 10^{-8}$	0,29
Отбор 3	14,8	4,4	0,086	$8,4 \cdot 10^{-7}$	0,94
Отвал	75,2	0,15	0,0009	$7,6 \cdot 10^{-10}$	0,09

Концентрации дополнительного отбора, соответствующего очищенному регенерированному урану, составляют, %: ^{232}U $6,6 \cdot 10^{-8}$, ^{234}U 0,011, ^{236}U 0,35. По сравнению с вариантом каскада №1 из таблицы 4.10 концентрации $^{232}, ^{234}\text{U}$ больше, но в 1,5 раза уменьшаются затраты работы разделения за счет второго дополнительного отбора.

4.3.2. Очистка с использованием на втором питании отвального гексафторида урана

Природный гексафторид урана является ценным сырьем и может использоваться для наработки низкообогащенного коммерческого гексафторида урана. Поэтому для экономии природного сырья и снижения концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в отборах каскада целесообразно использовать отвальный гексафторид урана.

В таблице 4.12 приведены расчеты скорректированных квазиидеальных каскадов с дополнительным питанием отвальным гексафторидом урана концентрацией ^{235}U 0,35 % и ^{234}U 0,0018 %. Расчеты проводились для $\sigma = 0,877$. Во всех каскадах число ступеней $n = 25$, номер ступени основного питания $f = 13$. Наименьшему смещению потоков в ступени подачи питания соответствует вариант с номером ступени второго питания $p = 6$. Для уменьшения концентрации ^{236}U в дополнительном отборе номер ступени второго питания второго и третьего каскадов выбран $p = 12$.

В случае каскада с наименьшим смещением потоков на второе питание подается 50 т отвального гексафторида урана. Концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ дополнительного отбора почти не отличаются от концентраций этих изотопов в каскаде с использованием природного гексафторида урана, %: $5,8 \cdot 10^{-8}$, 0,011, 0,36 соответственно. При этом поток основного отбора составляет 17,2 т, суммарный поток больше на 9 % – 526,9 г/с. Смещение точки подачи отвального гексафторида урана к основному питанию приводит к уменьшению концентрации ^{236}U

дополнительного отбора – 0,32 % при сохранении содержания $^{232}, ^{234}\text{U}$. Каскад характеризуется большим на 8 % суммарным потоком – 569,1 г/с.

Таблица 4.12 - Концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскадов с использованием на втором питании отвального гексафторида урана

Параметр каскада	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %	^{232}U , %	^{236}U , %
Каскад №1	$\sigma = 0,877, n = 25, f = 13, p = 6$ при суммарном потоке 526,9 г/с:				
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	50	0,35	0,0018		
Отбор 1	10	0,85	0,011	$5,8 \cdot 10^{-8}$	0,36
Отбор 2	17,2	4,4	0,086	$8,4 \cdot 10^{-7}$	1,19
Отвал	122,8	0,15	0,001	$6,4 \cdot 10^{-10}$	0,09
Каскад №2	$\sigma = 0,877, n = 25, f = 13, p = 12$ при суммарном потоке 569,1 г/с:				
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	50	0,35	0,0018		
Отбор 1	10	0,85	0,011	$5,8 \cdot 10^{-8}$	0,32
Отбор 2	17,2	4,4	0,085	$8,3 \cdot 10^{-7}$	1,07
Отвал	122,8	0,15	0,001	$8,9 \cdot 10^{-10}$	0,11
Каскад №3	$\sigma = 0,877, n = 25, f = 13, p = 12$ при суммарном потоке 739,9 г/с:				
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	100	0,35	0,0018		
Отбор 1	10	0,85	0,01	$5 \cdot 10^{-8}$	0,26
Отбор 2	19,5	4,4	0,079	$7,4 \cdot 10^{-7}$	0,89
Отвал	170,5	0,15	0,001	$7,7 \cdot 10^{-10}$	0,09

При увеличении потока второго питания характеристики отборов заметно улучшаются, особенно по ^{236}U . Так, в дополнительном отборе каскада № 3 при 100 т на питании концентрации, %: ^{232}U $5 \cdot 10^{-8}$, ^{234}U 0,01, ^{236}U 0,26. Поток основного отбора увеличивается до 19,5 т. Суммарный поток этого каскада составляет

739,9 г/с.

В таблице 4.13 приведены расчеты каскада с тремя отборами и подачей на второе питание 100 т отвального гексафторида урана концентрацией ^{235}U 0,35 % и ^{234}U 0,0018 %. В дополнительных отборах производится 100 т урана концентрацией ^{235}U 0,35 % и 10 т концентрацией ^{235}U 0,85 %.

Таблица 4.13 - Концентрации ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U в дополнительном отборе каскада с использованием на втором питании отвального гексафторида урана и тремя отборами

Параметр каскада	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %	^{232}U , %	^{236}U , %
Питание 1	100	0,85	0,016	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,35
Питание 2	100	0,35	0,0018		
Отбор 1	10	0,85	0,012	$7,3 \cdot 10^{-8}$	0,34
Отбор 2	100	0,35	0,0025	$3,9 \cdot 10^{-9}$	0,1
Отбор 3	14,8	4,4	0,091	$9,3 \cdot 10^{-7}$	1,12
Отвал	75,2	0,15	0,0008	$5,6 \cdot 10^{-10}$	0,06

Концентрации ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U дополнительного отбора, соответствующего очищенному регенерированному урану, составляют, %: $7,3 \cdot 10^{-8}$, 0,012, 0,34. В варианте с одним дополнительным отбором соответствующая концентрация немного ниже. По сравнению с этим вариантом (каскад № 1) работа разделения в каскаде снижается в 1,6 раза, поток основного отбора – на 24 %.

Таким образом, регенерированный гексафторид урана может быть очищен от ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U в дополнительном отборе каскада при его обогащении ^{235}U с использованием на втором питании природного или отвального гексафторида урана. При этом для повышения эффективности очистки от ^{236}U можно смещать точку подачи питания отвального урана к основному питанию. Для уменьшения затрат работы разделения можно вводить в каскад второй дополнительный отбор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические **результаты**.

1. Проанализированы существующие методы расчета и оптимизации каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных смесей изотопов. Выявлены особенности расчета многопоточных каскадов. Проанализированы известные методы восстановления изотопного состава регенерированного урана, основанные на расчете и оптимизации каскадов газовых центрифуг. Выявлены особенности и недостатки существующих методов.
2. Разработаны численные методы оптимизации процессов разделения бинарной смеси изотопов урана в многопоточных каскадах газовых центрифуг, предназначенные для проведения технологических расчетов и обучения персонала разделительных предприятий. Создана расчетная программа «Каскад газовых центрифуг» и программа-тренажер для обучения технологического персонала разделительных производств.
3. Разработан метод оптимизации систем каскадов газовых центрифуг для разделения бинарных смесей изотопов на основе матричного описания связей ступеней в общей схеме.
4. Разработан метод аналитического расчета содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по изотопу ^{235}U .
5. Разработан метод аналитического расчета содержания многокомпонентной смеси слабообогатщенного регенерированного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по одному из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$.
6. Разработан метод численного расчета и оптимизации каскадов по парциальным потокам компонентов смеси с произвольным количеством потоков питания и отбора.

7. Разработан метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}\text{U}$ в дополнительном потоке отбора R -каскада. Произведены расчеты R -каскадов для различных ключевых компонентов. Выявлены характерные особенности метода, а также пары ключевых компонентов, при которых достигается наилучший эффект очистки при наименьших затратах работы разделения.
8. Разработан и запатентован метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в двойных каскадах с одновременной наработкой низкообогащенного урана. Особенностью метода является практическое отсутствие затрат работы разделения на очистку.
9. Разработан метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в дополнительном отборе каскада с использованием на втором питании природного или отвального урана. Метод позволяет существенно снизить затраты работы разделения при использовании еще одного дополнительного отбора.

Рекомендации. Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы при подготовке студентов, изучающих теорию разделения изотопов, а также для повышения квалификации персонала разделительных производств. Разработанные методы очистки регенерированного урана могут увеличить степень замкнутости ядерно-топливного цикла, в том числе, за счет вовлечения в процесс отвального гексафторида урана.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в создании новых методов очистки регенерированного урана, применении разработанных методов для расчета и оптимизации процессов разделения различных смесей изотопов, в том числе стабильных.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- n – количество ступеней или участков каскада [шт.];
 p – номер ступени подачи основного питающего потока;
 W – поток отвала каскада [г/с];
 F – поток основного питания каскада [г/с];
 F_j – поток второго питания каскада [г/с];
 P – поток основного отбора каскада [г/с];
 P_j – поток дополнительного отбора каскада [г/с];
 $L_{з\ отб}$ – поток закрутки на отборе [г/с];
 $L_{з\ отв}$ – поток закрутки [г/с];
 C_i^W – концентрация i -го компонента в потоке отвала каскада;
 C^W – концентрация целевого компонента в потоке отвала каскада;
 C_i^F – концентрация i -го компонента в потоке основного питания каскада;
 C^{Fj} – концентрация целевого компонента в потоке второго питания каскада в j -й ступени;
 C_i^{Fj} – концентрация i -го компонента в потоке второго питания каскада в j -й ступени;
 C_i^P – концентрация i -го компонента в потоке основного отбора каскада;
 C_j^P – концентрация целевого компонента в потоке дополнительного отбора каскада в j -й ступени;
 C_i^{Pj} – концентрация i -го компонента в потоке дополнительного отбора каскада;
 θ_j – коэффициент деления потока j -й ступени;
 q_j – полный коэффициент разделения j -й ступени;
 $e_{0\ max}$ – максимальная разделительная способность одной газовой центрифуги j -й ступени [мг/с];
 P_{Tj} – давление в трассе отвала j -й ступени [мм. рт. ст.];
 P_{0j} – давление в трассе питания j -й ступени [мм. рт. ст.];
 τ'_j – транзитный поток смеси в направлении отвала каскада в сечении между $(j-1)$ -й и j -й ступенями [г/с];
 τ'_{ij} – транзитный поток i -го изотопа в направлении отвала каскада в сечении между $(j-1)$ -й и j -й ступенями [г/с];
 τ'_{mj} – транзитный минорного изотопа в направлении отвала каскада в сечении между $(j-1)$ -й и j -й ступенями [г/с];
 τ'_{5j} – транзитный поток изотопа ^{235}U в направлении отвала каскада в сечении между $(j-1)$ -й и j -й ступенями [г/с];
 N_j – количество центрифуг в j -й ступени каскада [шт.];
 C'_{ij} – концентрация отбора i -го изотопа j -й ступени каскада;
 L'_j – поток отбора j -й ступени каскада [г/с];
 C''_{ij} – концентрация отвала i -го изотопа j -й ступени каскада;
 L''_j – поток отвала j -й ступени каскада [г/с];

C_{ij} – концентрация питания i -го изотопа j -й ступени каскада;
 L_j – поток питания j -й ступени каскада [г/с];
 l_j – поток питания j -й ступени каскада на 1 газовую центрифугу [мг/с];
 $E_{эффj}$ – эффективная разделительная способность j -й ступени [г/с];
 $E_{фактj}$ – фактическая разделительная способность j -й ступени [г/с];
 $E_{гцj}$ – разделительная способность газовой центрифуги j -й ступени [мг/с];
 $\eta_{схj}$ – схемный КПД j -й ступени [%];
 $\eta_{гj}$ – гидравлический КПД j -й ступени [%];
 $E_{эфф}$ – эффективная разделительная способность каскада [г/с];
 $E_{факт}$ – фактическая разделительная способность каскада [г/с];
 $\eta_{сх}$ – схемный КПД каскада [%];
 $K_{им}$ – коэффициент использования мощности каскада [%];
 Δ_c – точность расчета концентрации отбора последней ступени каскада;
 Δ_F – точность расчета второго потока питания при его оптимизации;
 $a_{0j}, a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}$ – модельные коэффициенты разделительной характеристики газовой центрифуги;
 b_0, b_1 – модельные коэффициенты гидравлической характеристики газовой центрифуги по трассе отвала;
 $k_{0,j}, k_{1,j}$ – модельные коэффициенты гидравлической характеристики газовой центрифуги по трассе питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen, K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of U235 / K. Cohen – National Nuclear Energy Series, Division III, Vol. 1B. – N.Y.: McGraw-Hill, 1951. – 184 p.
2. Обогащение урана : сборник / Под ред. Виллани С.; пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
3. Бенедикт, М. Химическая технология ядерных материалов / М. Бенедикт, Т. Пигфорд. – М.: Атомиздат, 1960. – 528 с.
4. Сазыкин, А.А. Термодинамический подход к разделению изотопов, в кн. Изотопы: свойства, получение, применение / Под ред. В.Ю. Баранова – М.: ИздАТ, 2000. – с 72.
5. Сулаберидзе, Г.А. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей: Учебное пособие / Г.А. Сулаберидзе, В.А. Палкин, В.Д. Борисевич и др. – М.: МИФИ, 2011. – 368 с.
6. Apelblat, A. The theory of a real isotope enriching cascade / A. Apelblat, Y. Ilamed-Lehrer // I. J. Nucl. Energy. – 1968. – v. 22. – p. 1.
7. Колокольцов, Н.А. К теории разделительных каскадов с произвольным обогащением на ступени / Н.А. Колокольцов, Н.И. Лагунцов // Атомная энергия. – 1969. – т. 27. вып. 6. – с. 560.
8. Жигаловский, Б.В. Лекционные материалы по многокомпонентным смесям – Новоуральск: УЭХК, 1999. – 57 с.
9. Кучеров, Р.Я. К теории каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей / Р.Я. Кучеров, В.П. Миненко // Атомная энергия. – 1965. – т. 19, вып. 4. – с. 360.
10. De la Garza, A. Multicomponent isotope separation in cascade / A. De la Garza, G.A. Garret, J.E. Murphy // Chem. Eng. Sci. – 1961. – v. 15. – p. 188.
11. Сазыкин, А.А. Разделение многокомпонентных смесей изотопов в квазиидеальном каскаде с двумя точками питания : сборник докладов IX

- Всеросс. (Международ.) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». – М.; ЦНИИАтоминформ. – 2004. – с. 32.
12. Израилевич, А.И. Формулы расчета содержания минорных изотопов для трехпоточных каскадов : сборник докладов VIII Всероссийской (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» – М.: ЦНИИАтоминформ – 2003. – с. 40.
 13. Власов, А.А. Способ изотопного восстановления регенерированного урана / А.А. Власов, В.В. Водолазских, В.И. Мазин и др. // Пат. РФ № 2236053 от 10.09.2004 – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2004. – № 25. – с. 562.
 14. Смирнов, А.Ю. Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ природным сырьем и отвальным ураном / А.Ю. Смирнов, Г.А. Сулаберидзе // Атомная энергия. – 2014. – т. 117. вып. 1. – с. 36.
 15. Водолазских, В.В. Способ восстановления пригодности выгоревшего в ядерном реакторе топлива в виде гексафторида выгоревшей смеси изотопов урана для повторного использования в ядерном реакторе / В.В. Водолазских, П.М. Гаврилов, В.А. Журин и др. // Пат. РФ № 2307410 от 27.09.2007. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2007. – № 28. – с. 10.
 16. Водолазских, В.В. Способ переработки загрязненного уранового сырья / В.В. Водолазских, Н.П. Глухов, В.А. Палкин и др. // Пат. РФ № 2377674 от 27.12.2009. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2009. – № 36. – с. 1207.
 17. Палкин, В.А. Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором // Перспективные материалы. – 2010. – спец. вып. 8. – с. 11.
 18. Власов, А.А. Способ изотопного восстановления регенерированного урана / А.А. Власов, В.В. Водолазских, В.Г. Гриднев и др. // Пат. РФ № 2242812 от 20.07.2004 – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2004. – № 35. – с. 804.
 19. Водолазских, В.В. Способ изотопного восстановления регенерированного урана / В.В. Водолазских, В.А. Козлов, В.И. Мазин и др. // Пат. РФ № 2282904 от 27.08.2006 – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2006. – № 24. – с. 549.

20. Прусаков, В.Н. Коррекция изотопного состава регенерированного урана по ^{232}U центробежным методом с введением газа-носителя / В.Н. Прусаков, А.А. Сазыкин, Л.Ю. Соснин и др. // Атомная энергия. – 2008. – т. 105, вып. 3. – с. 150.
21. Палкин, В.А. Очистка и обогащение регенерированного урана в двойных каскадах // Атомная энергия. – 2015. – т. 118, вып. 2. – с. 100.
22. Палкин, В.А. Оптимизация каскада центрифуг для разделения многокомпонентной смеси изотопов // Атомная энергия. – 2013. – т. 115, вып. 2. – с. 93.
23. Сулаберидзе, Г.А. О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл : сборник докладов IX Всерос. науч. конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» / Г.А. Сулаберидзе, В.Д. Борисевич, Се Цюаньсинь // Звенигород. – 2004. – с. 78.
24. Палкин, В.А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением ^{235}U до 5 % // Атомная энергия. – 2013. – т. 115, вып. 1. – с. 28.
25. Водолазских, В.В. Способ изотопного восстановления регенерированного урана / В.В. Водолазских, Н.П. Глухов, В.А. Палкин и др. // Пат. РФ № 2399971 от 20.09.2010 – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2010. – № 26. – с. 659.
26. Палкин, В.А. Очистка регенерированного урана в двухкаскадной схеме при использовании в одном из каскадов промежуточного отбора // Атомная энергия. – 2016. – т. 121, вып. 1. – с. 37.
27. Палкин, В.А. Применение квазиидеальных каскадов и операции разбавления для очистки регенерированного гексафторида урана // Атомная энергия. – 2016. – т. 121, вып. 3. – с. 152.
28. Сулаберидзе, Г.А. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей / Г.А. Сулаберидзе, В.Д. Борисевич, Се Цюаньсинь // Теорет. основы хим. технологии. – 2006. – т. 40. № 1. – с. 7.

29. Смирнов, А.Ю. Обогащение регенерированного урана в каскаде газовых центрифуг с одновременным разбавлением $^{232,236}\text{U}$ отвальным и низкообогащенным ураном / А.Ю. Смирнов, Г.А. Сулаберидзе, А.А. Дудников, В.А. Невинница // Атомная энергия. – 2017. – т. 122, вып. 5. – с. 287.
30. Smirnov, A.Yu. Applying enrichment capacities for multiple recycling of LWR uranium / A.Yu. Smirnov et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 1099 012001. – 2018.
31. Смирнов, А.Ю. Обогащение регенерированного урана в двойном каскаде газовых центрифуг с его максимальным возвратом в воспроизводство топлива / А.Ю. Смирнов, В.Е. Гусев, Г.А. Сулаберидзе, В.А. Невинница, П.А. Фомиченко // Вестник национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”. – 2018. – том 7, № 6. – с. 449.
32. Smirnov, A., A method to enrich reprocessed uranium with various initial contents of even-numbered isotopes / A. Smirnov, V. Gusev, G. Sulaberidze, V. Nevinitza // AIP Conference Proceedings 2101, 020006. – 2019.
33. Палкин, В.А. Оптимизация каскада при произвольно заданных коэффициентах разделения ступеней // Атомная энергия. – 1997. – т. 82. в. 4. – с. 295.
34. Палкин, В.А. Определение оптимальных параметров каскада газовых центрифуг // Атомная энергия. – 1998. – т.84. в.3. – с. 246.
35. Палкин, В.А. Неоптимальные свойства идеального каскада с симметричными ступенями / В.А. Палкин, Е.С. Фролов // Атомная энергия. – 2005. – т. 99, вып. 3. – с. 184.
36. Borisevich, V. The theory of Isotope Separation in Cascades: Problems and Solutions / V. Borisevich, G. Sulaberidze, H. Wood // Ars Separatoria Acta – 2003. – v.2. – p. 107.
37. Палкин, В.А. Метод расчета оптимальных параметров противоточного каскада с произвольной схемой соединения ступеней / В.А. Палкин, А.Е. Розенбаум // Атомная энергия. – 2000. – т. 88. № 2. – с. 142.
38. Палкин, В.А. Оптимизация каскадов газовых центрифуг с произвольной схемой соединения ступеней : сборник трудов международной научной

- конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нанотехнологиях» / В.А. Палкин, И.С. Игошин // М.: ЦНИИАтоминформ. – 2008. – с. 26.
39. Sulaberidze, G.A. Cascades for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures / G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich // *Separ. Scien. and Technol.* – 2001. – v. 6 (8, 9). – p. 1769.
40. Yamamoto, I. Muticomponent Isotope Separating Cascade Composed of Elements with Large Separation Factors / I. Yamamoto, A. Kanagava // *J. Nucl. Scien. and Techn.* – 1987. – v. 15 (8). – p. 580.
41. Von Halle, E. Multicomponent isotope separation in matched abundance ratio cascades composed of stages with large separation factors // *Proc 1st Workshop on Separation Phenomena in Liquids and gases.* – Darmstadt, Germany. – 1987.
42. Палкин, В.А. Расчет и оптимизация каскада с несколькими питаниями по срезам парциальных потоков : сборник докладов XI Международная научная конференция «Физико – химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях» // М.: ЦНИИАтоминформ. – 2006. – с. 29.
43. Смирнов, А.Ю. Обогащение регенерированного урана в каскаде газовых центрифуг с одновременным разбавлением $^{232,236}\text{U}$ отвальным и низкообогащенным ураном / А.Ю. Смирнов, Г.А. Сулаберидзе, А.А. Дудников и др. // *Атомная энергия.* – 2017. – т. 122, вып. 5. – с. 287.
44. Палкин, В.А. Обобщение решения Смородинского для потенциала разделения многокомпонентной смеси изотопов // *Атомная энергия.* – 2003. – т. 95, вып. 5. – с. 373.
45. Палкин, В.А. Оптимизация каскадов по критерию максимума использования разделительной способности элементов : сборник докладов XI Международная научная конференция «Физико – химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях» / В.А. Палкин, Е.С. Фролов // М.: ЦНИИАтоминформ. – 2006. – с. 21.

46. Палкин, В.А. Аналитический расчет содержания изотопов урана в каскаде с двумя питаниями, двумя отборами и одним отвалом / В.А. Палкин, Р.С. Комаров // Атомная энергия. – 2007 – т. 102, вып. 4. – с. 140.
47. Палкин, В.А. Оптимизация параметров каскада центрифуг при разделении регенерированного урана : сборник докладов X Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» / В.А. Палкин, Р.С. Комаров // М.: ЦНИИАтоминформ. – 2005. – с. 50.
48. Yamamoto, I. Multicomponent Isotope Separating Cascade Composed of Elements with Large Separation Factors / I. Yamamoto, A. Kanagawa // J. Nucl. Scien. Techn. – 1978. – v. 15 (8). – p. 28.
49. Сулаберидзе, Г.А. Особенности обогащения компонентов с промежуточной массой в квазиидеальном каскаде / Г.А. Сулаберидзе, Д.В. Потапов, В.Д. Борисевич, Се Цюаньсинь // Атомная энергия. – 2006. – т. 100, вып. 1. – с. 51.
50. Цюаньсинь, Се Оптимизация модельных каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей : сборник докладов XI Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул и в лазерных, плазменных и нанотехнологиях» / Се Цюаньсинь, Г.А. Сулаберидзе, В.Д. Борисевич // Звенигород. – 2006. – с. 15.
51. Палкин, В.А. Оптимальный каскад с заданными концентрациями по целевому изотопу: Свойства и сравнение с R-каскадом : сборник докладов VIII Всероссийской (Международной) конференции «Физико-химические методы при селекции атомов и молекул» / В.А. Палкин, Е.С. Фролов // М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. – г. Троицк. – 2003.
52. Палкин, В. А. Оптимальный, идеальный и R-каскады : сборник докладов IX Всероссийской (Международной) конференции «Физико-химические методы при селекции атомов и молекул» / В.А. Палкин, Е.С. Фролов // М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. – г. Троицк. – 2004.

53. Палкин, В.А. Расчет оптимальных параметров каскада для разделения многокомпонентных изотопных смесей / В.А. Палкин, Н.А. Сбитнев, Е.С.Фролов // Атомная энергия. – 2002. – т. 92, вып. 2. – с. 130.
54. Song T.M., Zeng S. On the optimity of separation cascade for a binary and multi-component case : proc. of 9-10th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases / T.M. Song, S. Zeng // Beijing, P.R.China. – 2006. – p. 132
55. Shi, Zeng. A generalization of the virtual components concept for numerical simulation of multi-component isotope separation in cascades / Zeng Shi, Cheng Lu, Jiang Dongjun, V. Borisevich, G. Sulaberidze // Chem. Eng. Sci. – 2014. – vol. 120. – p. 105.
56. Borisevich, V. New approach to optimize Q-cascades / V. Borisevich, G. Sulaberidze, S. Zeng // Chem. Eng. Sci. – 2011. – vol. 66. – p. 393.
57. Zeng, S. Use of the Q-cascade in calculation and optimization of multi-isotope separation / S. Zeng, D. Jiang, V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze // Chem. Eng. Sci. – 2011. – vol. 66. – p. 2997.
58. Zeng, S. The Q-cascade explanation / S. Zeng, G.A. Sulaberidze, D. Jiang, V.D. Borisevich, A.Yu. Smirnov // Sep. Sci. Technol. – 2012. – vol. 47 (11). – p. 1591.
59. Zeng, S. Isotopically selective mass transfer in the Q-cascade with losses of working substance / S. Zeng, A.Yu. Smirnov, D. Jiang, G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich // Ibid. – 2013. – vol. 48 (1). – p. 15.
60. Барский, Л.А. Критерии оптимизации разделительных процессов / Л.А. Барский, И.Н. Плаксин. – М.: Наука, 1967. – 118 с.
61. Палкин, В.А. Оптимизация каскада при разделении смеси изотопов с примесями : сборник докладов IX Всероссийской (Международной) конференции «Физико-химические методы при селекции атомов и молекул» / В.А. Палкин, Р.С. Комаров //М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. – г. Троицк. – 2004.
62. Hooke, R. Direct search solution of numerical and statistical problems / R. Hooke, T. A. Jeeves. // Journal of the Association for Computing Machinery. – 1961. – vol. 8. – p. 212.

63. Никипелов, Б.В. Судьбы уранового регенерата / Б.В. Никипелов, В.Б. Никипелов // Бюлл. по атомной энергии. – 2002. – №9. – с. 34.
64. Матвеев, Л.В. Уран-232 и его влияние на радиационную обстановку в ядерном топливном цикле / Л.В. Матвеев, Э.М. Центер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 72 с.
65. ASTM C 996–15. Standard Specification for Uranium Hexafluoride Enriched to Less Than 5 % ^{235}U . – ASTM International, 2015. – 4 p.
66. Палкин, В.А. Маслюков, Е.В. Компьютерная программа «Каскад газовых центрифуг»: Руководство пользователя / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков. – Екатеринбург: ООО «ИНПРИС», 2005. – 25 с.
67. Палкин, В.А. Аналитическая оценка содержания минорных изотопов урана в оптимальных каскадах : сборник трудов международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нанотехнологиях» / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // М.: ЦНИИАтоминформ. – 2008. – с. 31.
68. Palkin, V.A. Analytical estimation of the content of minor uranium isotopes in optimal cascades : Proceedings of the 12th International workshop on separation phenomena in liquids and gases / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Paris. – 2012. – p. 21.
69. Палкин, В.А. Очистка обедненного гексафторида урана в каскаде с промежуточным отбором // Атомная энергия. – 2015. – т. 118. № 3. – с. 150.
70. Палкин, В.А. Аналитические оценки содержания изотопов слабообогащенного регенерированного урана в многопоточных оптимальных каскадах / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2009. – т. 107. № 6. – с. 345.
71. Palkin V.A. Analytical evaluations of the isotope content of weakly enriched regenerated uranium in optimal multiflow cascades / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Atomic Energy. – 2009. – v. 107. № 6. – p. 418.

72. Палкин, В.А. Расчет каскада с несколькими питаниями и отборами по срезам парциальных потоков / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2012. – т. 112. № 5. – с. 309.
73. Palkin V.A. Calculations of a cascade with several feed and product flows at partial-flow sections / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Atomic Energy. – 2012. – v. 112. № 5. – p. 383.
74. Палкин, В.А. Оптимизация каскада по срезам парциальных потоков при заданной концентрации целевого компонента / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2014. – т. 117, вып. 2. – с. 89.
75. Palkin V.A. Optimization of a cascade by partial flow sections with prescribed target concentration / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Atomic Energy. – 2014. – v. 117. № 2. – p. 111.
76. Палкин, В.А. Очистка регенерированного урана в дополнительном отборе R-каскада и его обогащение в ординарном каскаде / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Теорет. основы хим. технол. – 2016. – т. 50, вып. 5. – с. 532.
77. Палкин, В.А. Очистка регенерированного урана в R-каскадах с промежуточным отбором : сборник научных трудов «Физика. Технологии. Инновации» / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Мин. Обр. и науки РФ, УрФУ: Екатеринбург. – 2015. – с. 150.
78. Palkin, V.A. Regenerated uranium separation in matched abundance ratio cascade with additional product flow / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // J. of Ph.: Conf. Ser. – 2016. – v. 751. № 1. – p. 012002.
79. Палкин, В.А. Очистка регенерированного гексафторида урана в двухкаскадной схеме при обогащении ^{235}U менее 5% / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2017. – т. 122. № 4. – с. 219.
80. Palkin V.A. Purification of regenerated uranium hexafluoride in a two-cascade scheme with $< 5\%$ ^{235}U enrichment / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Atomic Energy. – 2017. – v. 122. № 4. – p. 263.
81. Маслюков, Е.В. Ограничение концентрации целевого компонента при оптимизации многокомпонентного каскада : сборник тезисов I

- Международной молодежной научной конференции, посвященной 65-летию основания Физико-технологического института. // Екатеринбург. – 2014. – с. 186.
82. Палкин В.А. Способ очистки загрязненного сырья для разделительного производства / В.А. Палкин, Н.П. Глухов, Е.В. Маслюков // Пат. РФ № 2613157 от 15.03.2017 – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2017. – № 8. – с. 18.
83. Палкин, В.А. Очистка регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в промежуточном отборе каскада с двумя питаниями. / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2019. – т. 126, №2. – с. 98.
84. Palkin V.A. Purification of regenerated uranium hexafluoride by removal of U-232, U-234, U-236 in the intermedial product of a two-feed-flow cascade / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Atomic Energy. – 2019. – v. 126. № 2. – p. 110.
85. Палкин, В.А. Очистка регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}\text{U}$ в каскаде центрифуг с заданной концентрацией одного из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}\text{U}$. / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2018. – т. 124, №3. – с. 150.
86. Palkin V.A. Purification of regenerated uranium hexafluoride by removal of $^{232}, ^{234}\text{U}$ in a centrifuge cascade with prescribed concentration of one of the isotopes $^{232}, ^{234}, ^{235}\text{U}$ / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // Atomic Energy. – 2018. – v. 124. № 3. – p. 180.

Приложение А. Примеры контрольных вопросов

Таблица А.1.

№ п/п		Содержание вопроса и ответ (варианты ответов)	Вес	Время ответа
1	1.1.1.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. Набор коэффициентов a_i: 0,5; 0,5; 0,5; 0,1. $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25 \%$; $C_P = 1,5 \%$. <u>Укажите правильный ответ:</u> Количество ступеней в каскаде с максимальным $K_{им}$ равно:	30	10
	Верные ответы	15		
	Неверные ответы	12		
		13		
		14		
2	1.1.2.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25 \%$; $C_P = 1,4 \%$. <u>Укажите правильный ответ:</u> Какое из приведенных соотношений для модельных коэффициентов разделительной характеристики обеспечивает максимальный $K_{им}$ каскада?	50	16
	Верные ответы	$a_1 = a_2 \neq 0$		
	Неверные ответы	$a_1 < a_2$		
		$a_1 > a_2$		

3	1.2.1.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. $n = 10$; $p = 5$. Набор коэффициентов a_i: 0,5; 0,5; 0,5; 0,1 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $C_P = 1,4\%$; $F_x = 50$ г/с; $C_{F_x} = 1\%$, $N_i = 25000$. <u>Укажите правильный ответ:</u> Номер ступени подачи второго питания при котором $K_{им}$ будет максимальным.	20	2
	Верные ответы	9		
	Неверные ответы	6		
		7		
		8		
4	1.2.2.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. $n = 10$; $p = 5$. Набор коэффициентов a_i: 0,5; 0,5; 0,5; 0,1 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $C_P = 1,4\%$; $F_x = 50$ г/с; $C_{F_x} = 1\%$, $N_i = 25000$. <u>Укажите правильный ответ:</u> На сколько процентов увеличится $K_{им}$ при подаче второго питания в оптимальную ступень.	30	2
	Верные ответы	2,0		
	Неверные ответы	1,5		
		2,5		
		1,0		
5	1.3.1.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из 9 блоков по 25000 газовых центрифуг. Блоки могут разделяться пополам. Набор коэффициентов a_i: 0,5; 0,5; 0,5; 0,1 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $C_P = 1,7\%$. <u>Укажите правильный ответ:</u> Количество ступеней с $N_i = 12500$ в обоганительной части каскада, при котором $K_{им}$ будет максимальным.	40	7

	Верные ответы	6		
	Неверные ответы	2		
		4		
		8		
6	1.4.1.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. $n = 7; p = 4$. Набор коэффициентов a_i : 0,5; 0,5; 0,5; 0,1 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $C_P = 1,7\%$, $N_i = 25000$. <u>Вставьте пропущенное слово:</u> Ограничения сверху по потоку отвала в ... г/с сильнее всего уменьшают $K_{им}$ каскада.	10	2
	Верные ответы	35		
	Неверные ответы	45		
		40		
7	1.4.2.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. $n = 7; p = 4$. Набор коэффициентов a_i : 0,5; 0,5; 0,5; 0,1 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $C_P = 1,7\%$, $N_i = 25000$. <u>Вставьте пропущенное слово:</u> Ограничения сверху по потоку питания в ... г/с сильнее всего уменьшают $K_{им}$ каскада.	10	2
	Верные ответы	3		
	Неверные ответы	5		
		7		

8	1.4.3.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. $n = 7$; $p = 4$. Набор коэффициентов a_i : 0,5; 0,5; 0,5; 0,1 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $C_P = 2\%$, $N_i = 25000$. <u>Вставьте пропущенное слово:</u> Ограничения сверху по потоку отвала в ... г/с и по потоку питания в ... г/с сильнее всего уменьшают $K_{им}$ каскада.	40	2
	Верные ответы	30; 2		
	Неверные ответы	30; 3		
		25; 3		
9	2.1.1.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. Набор коэффициентов a_i : 0,4; 0,6; 0,5; 0,15 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25\%$; $N_i = 25000$. <u>Укажите правильный ответ:</u> При какой концентрации отбора наилучший для данных условий каскад имеет $K_{им}$, равный 89,3%?	20	6
	Верные ответы	1,5 %		
	Неверные ответы	2,5 %		
		2,0 %		
10	2.1.2.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. Набор коэффициентов a_i : 0,4; 0,6; 0,5; 0,15; $C_W = 0,25\%$; $N_i = 25000$. <u>Установите соответствие:</u> Каждому набору C_P/C_F из первого списка найдите соответствующий $K_{им}$ во втором списке и проставьте ему такой же номер.	50	8
		1. 1,5/0,711	89,3	

	Верные ответы	2. 2,0/0,4	83,8				
		3. 2,5/0,3	76,9				
	Неверные ответы						
11	2.1.3.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. Набор коэффициентов a_i : 0,4; 0,6; 0,5; 0,15; $C_P = 1\%$; $N_i = 25000$. <u>Установите соответствие:</u> Каждому набору C_F/ C_W из первого списка найдите соответствующий $K_{им}$ во втором списке и проставьте ему такой же номер.	40	8			
		Верные ответы			1. 0,3/0,25	80,2	
					2. 0,4/0,20	87,9	
					3. 0,711/0,15	63,3	
	Неверные ответы						
12	2.1.4.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из одинаковых ступеней. Набор коэффициентов a_i : 0,4; 0,6; 0,5; 0,15; $C_F = 0,711\%$; $N_i = 25000$. <u>Установите соответствие:</u> Каждому набору C_P/C_W из первого списка найдите соответствующий $K_{им}$ во втором списке и проставьте ему такой же номер.	50	8			
		Верные ответы			1. 2,5/0,25	87,1	
					2. 2,0/0,30	87,8	
					3. 1,5/0,35	88,8	
	Неверные ответы						

13	2.2.1.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из 7 блоков по 25000 газовых центрифуг. Блоки могут разделяться пополам. Набор коэффициентов a_i : 0,4; 0,6; 0,5; 0,15 $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25 \%$. <u>Укажите правильный ответ:</u> При какой концентрации отбора каскада $K_{им}$ будет максимальным при оптимальном распределении блоков?	40	3
	Верные ответы	1,0 %		
	Неверные ответы	1,5 %		
		2,0 %		
14	2.2.2.	<u>Исходные данные:</u> Каскад из блоков по 25000 газовых центрифуг. Блоки могут разделяться пополам. Набор коэффициентов a_i : 0,4; 0,6; 0,5; 0,15; $C_P = 1,5\%$ $C_F = 0,711\%$; $C_W = 0,25 \%$. <u>Укажите правильный ответ:</u> При каком количестве блоков каскада по 25000 газовых центрифуг $K_{им}$ будет максимальным?	60	3
	Верные ответы	10		
	Неверные ответы	9		
		8		
		7		

Приложение Б. Описание задач обучения

Б.1. Задачи расчета каскадов с перебором числа ступеней и точки подачи питания

Б.1.1. Каскад с тремя потоками из одинакового типа ступеней

Во всех задачах задается одинаковое количество газовых центрифуг в ступени.

Задача 1. Поиск оптимальных параметров каскада для заданных внешних концентраций.

Исходные данные: C_P , C_F , C_W , модельные коэффициенты разделительной характеристики a_i .

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада с максимальным коэффициентом использования разделительной мощности $K_{им}$.

Путь решения: перебор количества ступеней и номера ступени подачи питания.

Задача 2. Исследование влияния модельных коэффициентов разделительной характеристики газовой центрифуги на эффективность каскада.

Исходные данные: C_P , C_F , C_W , различные наборы модельных коэффициентов разделительной характеристики газовой центрифуги.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскадов с максимальным коэффициентом использования разделительной мощности $K_{им}$.
Определить причины их различия для разных модельных характеристик.

Путь решения: при каждом заданном наборе коэффициентов решается задача 1.

Б.1.2. Каскад с несколькими потоками питания из одинакового типа ступеней

Во всех задачах задается одинаковое количество газовых центрифуг в ступенях.

Задача 1. Исследование влияния нескольких потоков питания на эффективность каскада.

Исходные данные: Количество ступеней, номер ступени подачи основного питания, концентрация и поток дополнительных питаний, внешние концентрации, модельные коэффициенты разделительной характеристики газовой центрифуги.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада с максимальным коэффициентом использования разделительной мощности $K_{им}$; зависимость характеристик эффективности каскада от точек подачи и количества дополнительных питаний.

Путь решения: перебор дополнительных питаний и номеров ступеней, в которые они подаются.

Задача 2. Оптимизация второго потока питания.

Исходные данные: n , p , концентрация второго питания, внешние концентрации, модельные коэффициенты разделительной характеристики газовой центрифуги.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада с максимальным коэффициентом использования разделительной мощности $K_{им}$.

Путь решения: перебор номера ступени, в которую подается второе питание.

Б.1.3. Каскад с тремя потоками из нескольких типов ступеней

В каскадах из нескольких типов ступеней с заданными n и p варьируется число центрифуг в ступени.

Задача 1. Оптимизация каскада из двух типов ступеней.

Исходные данные: два заданных типа ступеней, внешние концентрации, модельные коэффициенты разделительной характеристики.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада из двух типов ступеней с максимальным коэффициентом использования разделительной мощности $K_{им}$.

Путь решения: варьирование количества ступеней разных типов и точки подачи питания.

Задача 2. Оптимизация каскада из трех типов ступеней.

Исходные данные: три заданных типа ступеней, внешние концентрации, модельные коэффициенты разделительной характеристики.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада из трех типов ступеней с максимальным коэффициентом использования разделительной мощности $K_{им}$.

Путь решения: варьирование количества ступеней разных типов и точки подачи питания.

Б.1.4. Каскад с ограничениями на технологические параметры

Во всех задачах задается одинаковое количество газовых центрифуг в ступенях.

Задача 1. Оптимизация каскада с ограничениями по потоку отвала ступеней.

Исходные данные: C_P , C_F , C_W , модельные коэффициенты разделительной характеристики a_i ; ограничения по потоку отвала.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада с наибольшим $K_{им}$ при заданных ограничениях.

Путь решения: перебор количества ступеней и номера ступени подачи питания.

Задача 2. Оптимизация каскада с ограничениями по потоку питания ступеней.

Исходные данные: C_P , C_F , C_W , модельные коэффициенты разделительной характеристики a_i ; ограничения по потоку питания.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада с наибольшим $K_{им}$ при заданных ограничениях.

Путь решения: перебор количества ступеней и номера ступени подачи питания.

Задача 3. Оптимизация каскада с ограничениями по потокам питания и отвала ступеней.

Исходные данные: C_P , C_F , C_W , модельные коэффициенты разделительной характеристики a_i ; ограничения по потокам питания и отвала.

Найти: параметры и характеристики эффективности каскада с наибольшим $K_{им}$ при заданных ограничениях.

Путь решения: перебор количества ступеней и номера ступени подачи питания.

Б.2. Задачи расчета каскадов с оптимизированным числом ступеней и точкой подачи питания

Задачи решаются с заданными ограничениями по давлениям отвала и питания, а также без них.

Б.2.1. Каскад с тремя потоками из одинакового типа ступеней

Задача 1. Исследование влияния внешней концентрации отбора C_P на эффективность каскада.

Исходные данные: концентрации C_F , C_W , модельные коэффициенты раздельной характеристики, несколько значений C_P .

Найти: зависимости оптимальных значений характеристик эффективности каскада от C_P .

Путь решения: перебор значений C_P , для которых программа определяет оптимальные n и p .

Задача 2. Исследование влияния степени разделения в отборной части C_P/C_F на эффективность каскада.

Исходные данные: концентрация C_W , коэффициенты a_i раздельной характеристики, несколько значений C_P , C_F .

Найти: зависимость оптимальных значений характеристик эффективности каскада от C_P/C_F .

Путь решения: перебор значений C_P , C_F , для которых программа определяет оптимальные n и p .

Задача 3. Исследование влияния степени разделения в отвальной части C_F/C_W на эффективность каскада.

Исходные данные: концентрация C_P , коэффициенты a_i раздельной характеристики, несколько значений C_F , C_W .

Найти: зависимость оптимальных значений характеристик эффективности каскада от C_F/C_W .

Путь решения: перебор значений C_F , C_W , для которых программа определяет оптимальные n и p .

Задача 4. Исследование влияния степени разделения C_P/C_W на эффективность каскада.

Исходные данные: концентрация C_F , коэффициенты a_i разделительной характеристики, несколько значений C_P , C_W .

Найти: зависимость оптимальных значений характеристик эффективности каскада от C_P/C_W .

Путь решения: перебор значений C_P , C_W , для которых программа определяет оптимальные n и p .

Б.2.2. Каскад с тремя потоками из нескольких типов ступеней

Задача 1. Определение оптимальных внешних концентраций каскада.

Исходные данные: количество блоков газовых центрифуг в каскаде, модельные коэффициенты разделительной характеристики газовой центрифуги.

Подобрать: концентрации C_P , C_W , C_F , для которых $K_{им}$ будет максимальным.

Путь решения: перебор внешних концентраций, для которых программа определяет оптимальную схему работы блоков путем изменения одноступенного режима работы на двухступенный.

Задача 2. Определение оптимальной схемы каскада.

Исходные данные: концентрации C_P , C_W , C_F , модельные коэффициенты разделительной характеристики газовой центрифуги.

Подобрать: количество блоков каскада, для которого $K_{им}$ будет максимальным.

Путь решения: перебор количества блоков, для которых программа определяет оптимальную схему работы блоков путем изменения одноступенного режима работы на двухступенный.

Приложение В. Акт внедрения программы.



СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Акционерное общество
«СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ
КОМБИНАТ»
(АО «СХК»)

ЗАВОД РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ
(ЗРИ)

СПРАВКА

03.12.2015 № 40-10/6350

Об использовании компьютерных программ

В соответствии с договором между Сибирским химическим комбинатом и Уральским отделением Академии технологических наук Российской Федерации профессором Палкиным В.А. и Маслюковым Е.В. для повышения эффективности обучения инженеров-технологов и проведения технологических расчётов в 2006 – 2007 годах были разработаны две компьютерные программы: «Каскад газовых центрифуг. Тренажёр» и «Каскад газовых центрифуг».

Обучающая программа «Каскад газовых центрифуг. Тренажёр» предназначена для изучения физических закономерностей разделения бинарных смесей изотопов урана в модельных каскадах газовых центрифуг. С помощью программы решались две группы задач. Они включали в себя расчёт каскада с перебором числа ступеней и точки подачи питания, а также расчёт каскада с оптимизацией числа ступеней и точки подачи питания. Программа использовалась технологами Завода разделения изотопов СХК на практических занятиях в компьютерном классе на курсах повышения квалификации.

Программа «Каскад газовых центрифуг» предназначена для расчёта характеристик смеси изотопов урана на отборе каскада, а также характеристик эффективности ступеней и каскада в целом при заданных внешних и конструктивных параметрах. Имеется возможность ограничить давления в трассах отвала и питания, использовать формулы или задавать шаблоны для расчёта разделительных и гидравлических характеристик. В опытном порядке программа использовалась при проведении технологических расчётов на Заводе разделения изотопов СХК.

Директор ЗРИ

Р.Л. Мазур

03.12.2015.

Журин, 52-10-08
30.11.2015

Приложение Г. Справка об использовании программы в ТПУ.



И.Б. Степанов
«24» 06 2019 г.

СПРАВКА

об использовании результатов исследований и разработок, выполненных
в рамках диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
МАСЛЮКОВА ЕВГЕНИЯ ВЛАДИМИРОВИЧА

Комиссия в составе
председатель:
руководитель Отделения ядерно-топливного цикла, д.т.н., доцент
А.Г. Горюнов,
члены комиссии:

доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.ф.-м.н., Л.И. Дорофеева
профессор Отделения ядерно-топливного цикла, д.ф.-м.н., профессор
А.П. Вергун,

составили настоящую справку о том, что программа для аналитического расчета содержания минорных изотопов в многопоточных каскадах "Миноры" используется в Отделении ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета при подготовке магистрантов направления «Ядерная физика и технологии» по профилю «Изотопные технологии и материалы» в процессе изучения учебной дисциплины «Разделение многокомпонентных изотопных смесей».

Разработанная программа предназначена для аналитического расчета концентраций отбора минорных изотопов урана в разделительных каскадах и позволяет оценить их концентрации при наличии в каскаде нескольких потоков питания и потоков промежуточного отбора. Данная программа получена в рамках выполнения диссертационной работы Е.В. Маслюкова на соискание ученой степени кандидата технических наук. Использование указанного программного продукта при выполнении лабораторных и практических работ позволяет повысить уровень подготовки магистров.

Председатель комиссии

Члены комиссии

А.Г. Горюнов
Л.И. Дорофеева
А.П. Вергун

Приложение Д. Справка об использовании программы в НИЯУ МИФИ.

Утверждаю
Зав. кафедрой молекулярной физики
НИЯУ МИФИ
В.Д. Борман
« 26 » августа 2019

СПРАВКА

Об использовании результатов исследований и разработок,
выполненных в рамках диссертационной работы на соискание ученой
степени кандидата технических наук
МАСЛЮКОВА ЕВГЕНИЯ ВЛАДИМИРОВИЧА

Комиссия в составе
председатель:

профессор, д.ф.-м.н., профессор В.Д. Борисевич

члены комиссии:

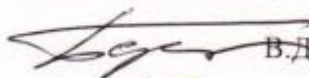
доцент, к.ф.-м.н., доцент Г.А. Сулаберидзе

доцент, к.ф.-м.н., без звания А.Ю. Смирнов

составили настоящую справку о том, что программа для аналитического расчета содержания минорных изотопов в многопоточных каскадах «Миноры» используется в Институте нанотехнологий в электронике, спинтронике фотонике на кафедре молекулярной физики при подготовке студентов-специалистов по направлению «Технологии разделения изотопов и ядерное топливо» по профилю «Технологии разделения изотопов» в процессе изучения учебной дисциплины «Специальные главы физики разделительных процессов».

Разработанная программа предназначена для аналитического расчета концентраций отбора минорных изотопов урана в оптимальных разделительных каскадах. Программа позволяет произвести оценку концентраций минорных изотопов в отвальном и отборных потоках каскада при наличии в нем нескольких потоков питания и отбора. Программа получена в рамках выполнения диссертационной работы Маслюкова Е.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Использование программы в учебном процессе позволяет повысить уровень обучаемых.

Председатель комиссии:

 В.Д. Борисевич

Члены комиссии:

 Г.А. Сулаберидзе

 А.Ю. Смирнов