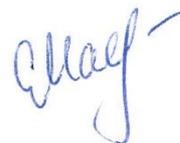


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре технической физики Физико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор,
ПАЛКИН Валерий Анатольевич

Официальные оппоненты: **ОРЛОВ Алексей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий;

ЧОЛАХ Сеиф Османович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры электрофизики;

СМИРНОВ Андрей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, доцент отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ (414) Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике.

Защита состоится 09 апреля 2020 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.03.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1067>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Классическая теория бинарного разделения изотопов урана $^{235}, ^{238}\text{U}$ в ординарных каскадах была разработана К. Коэном. 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 М. Бенедиктом, Т. Пигфордом, А.А. Сазыкиным, А. Апельблатом, Г.А. Сулаберидзе, В.Д. Борисевичем, Н.А. Колокольцовым, другими авторами, 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 отвалный, которые в значительной мере могут содержать $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Наличие этих изотопов в гексафториде урана и потребность в стабильных изотопах привели к разработке методов расчета каскадов для разделения многокомпонентных смесей. 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 $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Существующие каскадные методы 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 реализации поставленной цели решались 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 слабообогатенного 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 низкообогатенного 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 слабообогатенного 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 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.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, пяти приложений. Объем диссертации составляет 128 страниц. Список использованных источников содержит 86 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор и анализ литературных данных по известным модельным каскадам для разделения бинарной и многокомпонентной смеси изотопов. Описаны известные способы расчета и оптимизации каскадов. Выявлены

недостатки существующих моделей и методов. Представлен обзор и анализ существующих методов восстановления изотопного состава регенерированного урана. Показана актуальность разработки новых методов, свободных от существующих недостатков.

Во второй главе представлено описание модели и разработанного метода оптимизации каскада газовых центрифуг для разделения бинарной смеси изотопов. Их особенностью, в отличие от опубликованных, является возможность расчета каскада с несколькими потоками питания при заданных количествах газовых центрифуг в ступенях. Данная схема расчета была выбрана для реализации в компьютерных программах технологических расчетов каскадов и обучения персонала разделительных производств. Расчетная схема каскада с потоками питания, подаваемыми в каждую ступень, представлена на рисунке 1. Такая схема позволяет рассчитать каскад с любым набором потоков питания. Все реально отсутствующие потоки задаются равными нулю.

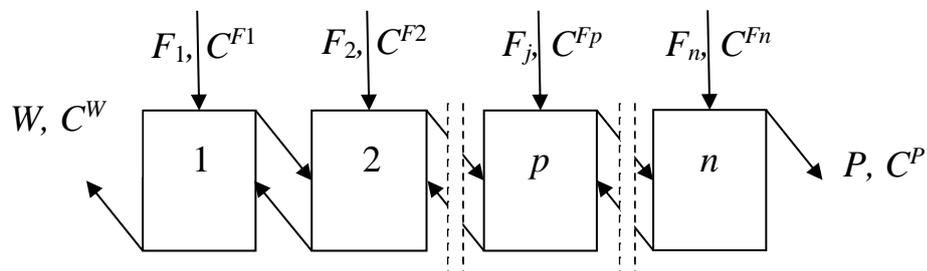


Рисунок 1 – Расчетная схема противоточного симметричного каскада

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 :

$$\sum_{j=1}^n F_j = W + P; \quad \sum_{j=1}^n F_j C^{Fj} = WC^W + PC^P.$$

Аналогичные уравнения выполняются для внутренних параметров. Балансовые связи потоков между ступенями характеризуются уравнениями

$$\begin{aligned} L_1 &= L_2'' + F_1; & L_2 &= L_1' + L_3'' + F_2, \dots, \\ L_p &= L_{p-1}' + L_{p+1}'' + F_p, \dots; & L_n &= L_{n-1}' + F_n; \\ L_1 C_1 &= L_2'' C_2'' + F_1 C^{F1}; & L_2 C_2 &= L_1' C_1' + L_3'' C_3'' + F_2 C^{F2}, \dots, \\ L_p C_p &= L_{p-1}' C_{p-1}' + L_{p+1}'' C_{p+1}'' + F_p C^{Fp}, \dots; & L_n C_n &= L_{n-1}' C_{n-1}' + F_n C^{Fn}. \end{aligned}$$

Полные коэффициенты разделения ступеней рассчитываются в соответствии с зависимостью

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

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

Общее число независимых параметров при заданных потоках питания 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

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

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

$$\tau'_1 = W; \quad \tau'_{l1} = WC^W; \quad \tau'_j = \tau'_{j-1} - F_{j-1}; \quad \tau'_{lj} = \tau'_{lj-1} - F_{j-1} C^{Fj-1}, \quad j = \overline{2, n}.$$

Аналогичным образом через транзитные потоки вычисляются потоки питания и отбора ступеней. При этом используются соотношения: $L''_j - L'_{j-1} = \tau'_j, \quad j = \overline{2, n}$.

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 . Оптимизация производится многопараметрическим 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.

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

После определения основных параметров ступеней рассчитываются давления в трассах отвала и питания ступеней. 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.

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 коэффициента использования мощности $K_{им}$. После этого аналогичные действия выполняются с отвальной частью каскада. Ступень отбора допускается дополнительно делить дважды.

После определения основных оптимальных параметров каскада рассчитываются характеристики эффективности разделения ступеней.

На основе описанных алгоритмов была разработана компьютерная программа «Каскад газовых центрифуг» для проведения технологических расчетов. Ее упрощенный вариант в виде компьютерного тренажера использовался для

обучения технологического персонала разделительных производств. Для облегчения восприятия технологическим персоналом идей оптимизации каскадов был разработан ряд задач. По задачам обучения составлено более 430 контрольных вопросов, по которым проводились занятия на разделительных производствах.

Для расчета и оптимизации систем каскадов газовых центрифуг разработан метод, использующий матричное описание связей ступеней в общей схеме. Метод основан на способе расчета оптимального каскада с произвольной схемой соединения ступеней, предложенном В.А. Палкиным, А.Е. Розенбаумом и И.С. Игошиным. Система каскадов представляется одним каскадом со сложной схемой соединения ступеней. Коэффициенты разделения газовых центрифуг задаются зависимостью $q_i = q_i(l_i, \theta_i)$, $j = \overline{1, n}$. Для расчета вводится общая нумерация всех ступеней каскадов, входящих в систему. При этом отвал системы производится из ступени с первым номером, а отбор системы – из ступени с последним номером. В качестве межкаскадных потоков выбираются соответствующие потоки отвала или отбора ступеней с промежуточными номерами. 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 одного каскада, соединенного по противоточной симметричной схеме, матрицы α и β при $n = 5$ имеют следующий вид:

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

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

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

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

При заданных матрицах α , β и внешних параметрах оптимизация внутренних параметров каскада производится 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 $n-1$. При заданных значениях параметров оптимизации потоки отбора и отвала ступеней рассчитываются с помощью матричных уравнений

$$L''_i = - \sum_{k=1}^n D_{ik} B_k; \quad L'_i = \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} L''_k + \delta_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где

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

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

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

Здесь E – единичная матрица. Остальные параметры каскада, в частности, количество газовых центрифуг N_i , определяются, исходя из рассчитанных потоков согласно уравнениям ступеней. При оптимизации предусматривается варьирование элементов матриц α и β .

Для исследования особенностей оптимизации систем противоточных симметричных каскадов была разработана компьютерная программа и проведен вычислительный эксперимент. Рассматривалось разделение бинарной смеси изотопов гексафторида урана в системах двух каскадов при параллельно и противоточно идущих межкаскадных потоках. В качестве разделительной характеристики $q_i(l_i, \theta_i)$ была принята зависимость, аналогичная представленной выше, 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. В последнем случае алгоритм оптимизации предусматривал перебор значений потока отбора, для каждого из которых производится минимизация суммы квадратов разностей рассчитываемых и заданных количеств газовых центрифуг по ступеням. Для каждого каскада была выбрана противоточная симметричная схема соединения ступеней.

Для оптимизации системы с заданным количеством газовых центрифуг в ступенях была выбрана система двух каскадов, состоящих из 8 и 11 ступеней (рисунок 2). 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. 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 1.

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

Таблица 1 - 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

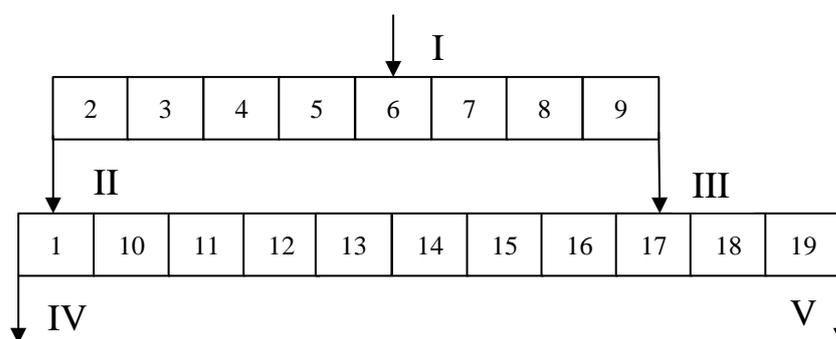


Рисунок 2 – Схема системы каскадов с параллельно идущими межкаскадными потоками: I – питание системы, II, III – отвал и отбор первого каскада, IV, V – отвал и отбор системы, 1-19 – номера ступеней в системе

В третьей главе описаны методы аналитического расчета содержания изотопов урана в оптимальных многопоточных каскадах для разделения многокомпонентных смесей. Представлены модель, способ численного расчета и оптимизации каскадов с произвольным количеством потоков питания и отбора по срезам парциальных потоков.

Методика аналитического расчета ординарного трехпоточного каскада была разработана Б.В. Жигаловским и А.И. Израилевичем. Аналитический расчет каскадов с двумя питаниями и дополнительным отбором предложен Р.С. Комаровым. Особенностью первого аналитического метода, разработанного в настоящей работе, является возможность оценки содержания минорных изотопов

урана $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в многопоточных каскадах, оптимизированных на обогащение ^{235}U . Модель каскада позволяет проводить расчеты при произвольном количестве потоков питания и отбора. Она состоит из n участков ступеней (рисунок 3). 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.

Поток отвала каскада обозначен как W , потоки питания – F_1, F_2, \dots, F_{n-1} , потоки отбора – P_1, P_2, \dots, P_n . Концентрации ^{235}U на отвале – C^W и на правых концах участков – C_1, \dots, C_n , концентрации минорного изотопа урана (один из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$) в потоках отвала, питаний и отборов – $C_m^W, C_m^{F1}, C_m^{F2}, \dots, C_m^{Fn-1}, C_m^{P1}, C_m^{P2}, \dots, C_m^{Pn}$.

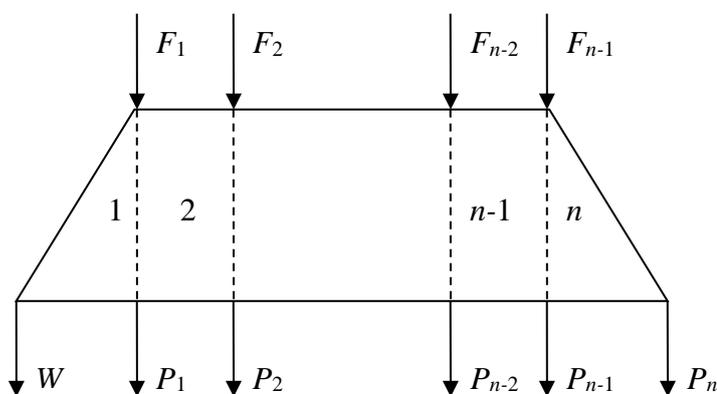


Рисунок 3 – Схема каскада из n участков ступеней

При оптимизации каскада на обогащение ^{235}U оценка $C_m^W, C_m^{P1}, C_m^{P2}, \dots, C_m^{Pn}$ может быть произведена исходя из дифференциальных уравнений, описывающих изменения концентраций изотопов по ступеням каскада при малых обогащениях:

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

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

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; $\tau_j, \tau_{5j}, \tau_{mj}$ – транзитный поток смеси, ^{235}U и оцениваемого минорного изотопа соответственно, определяемый в направлении отбора каскада на j -м участке.

Необходимым условием использования такого подхода является существенная малость концентраций минорных изотопов урана по сравнению с

концентрациями ^{235}U . В таком случае распределение изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ по ступеням определяется содержанием ^{235}U , а его распределение в оптимальном каскаде практически соответствует идеальному для разделения бинарной смеси $^{235}, ^{238}\text{U}$.

Для расчета содержания минорных изотопов в отборах и отвале каскада сначала рассчитывается концентрация минорного изотопа в отвале. Например, 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

$$\tilde{\alpha}^{(j)} = P_k (R_k^d - R_{k-1}^d) \frac{\left(C^2 R^{-\frac{2}{3} \Delta \mu_m} \right)}{\left(1 - \frac{2}{3} \Delta \mu_m \right) (\tau_{5j} - \tau_j C)}; \quad d = \frac{2}{3} \Delta \mu_m - 1.$$

Затем, двигаясь последовательно по участкам каскада от отвала к отбору, определяются концентрации минорного изотопа в дополнительных отборах и основном отборе. Общие выражения для них записываются в виде

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

где $R_0^d = R_W^d$,

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

Проверка аналитической методики проводилась на данных численного расчета 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 (таблица 2).

Второй аналитический метод предназначен для оценки содержания слабообогащенного регенерированного урана в каскадах, оптимизированных на обогащение одного из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$. Расчетная модель каскада в данном случае аналогична рассмотренной выше. 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 и изменения концентраций изотопов по ступеням.

Таблица 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:					
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

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 питанием, подаваемым в каскад.

Для расчета содержания оцениваемых изотопов в потоках отбора каскада сначала рассчитывается концентрация оцениваемого изотопа в отвале. Например, для каскада из двух участков:

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

$$\alpha^{(j)}(C_i) = \frac{C_i^{1-d}}{(-d)(\tau_{0j} - \tau_j C_j)}; \quad d = 1 - \frac{2(\bar{\mu} - \mu_m)}{\bar{\mu} - \mu}.$$

Затем, двигаясь последовательно по участкам каскада от отвала к отбору, рассчитывается концентрация оцениваемого изотопа в дополнительных потоках отбора и потоке основного отбора:

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

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

Проведенные расчеты показали хорошее согласие разработанного аналитического метода с численной оптимизацией каскада. Различие в концентрации оцениваемых изотопов для случаев обогащения регенерированного урана, как правило, не превышает долей процента для большинства изотопов (таблица 3). Различие в результатах расчетов на несколько процентов для ^{232}U объясняется его малой концентрацией, при этом погрешность при использовании численного метода возрастает.

Таблица 3 – 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

Методика расчета квазиидеального каскада по срезам парциальных потоков была предложена А.А. Сазыкиным. Разработкой других методов численного расчета каскадов для разделения многокомпонентной смеси изотопов занимались И. Ямамото, А. Канагава, В.П. Миненко, Н.А. Колокольцов, В.Д. Борисевич, Г.А. Сулаберидзе, А.Ю. Смирнов и другие авторы. В.А. Палкиным и Е.С. Фроловым предложен метод расчета каскада с произвольным количеством питаний с неодинаковыми срезами парциальных потоков по ступеням. Данный подход был обобщен в настоящей работе включением в расчетную схему нескольких дополнительных потоков отбора. Принципиальная схема многопоточного каскада, состоящего из n ступеней, представлена на рисунке 4. Внешние питания подаются в каждую ступень. Дополнительные отборы каскада забираются из отвалов второй и последующих ступеней.

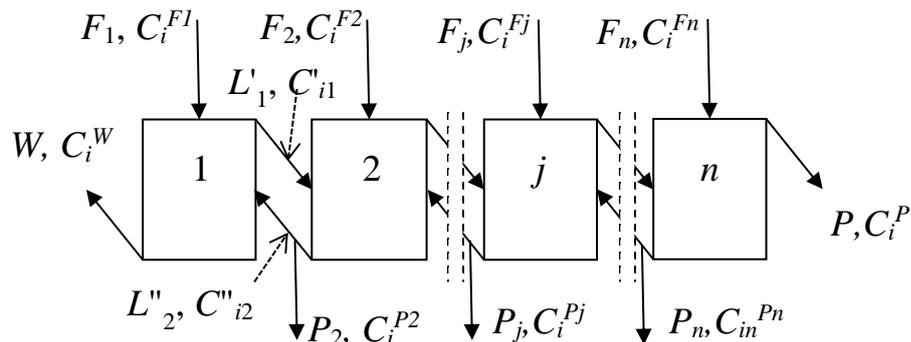


Рисунок 4 – Схема многопоточного каскада

Для i -го изотопа в питании, отборе и отвале j -й ступени парциальные потоки равны $L_{ij} = L_j C_{ij}$, $L'_{ij} = L'_j C'_{ij}$, $L''_{ij} = L''_j C''_{ij}$. Тогда срезы парциальных потоков представляются в виде $\varphi_{ij} = L'_{ij}/L_{ij} = \sigma_j q_{ij}/(1 + \sigma_j q_{ij})$, $j = \overline{1, n}$, 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 σ_j , $j = \overline{1, n}$. Также видно, что срезы парциальных потоков ступеней при заданных σ_j и q_{ij} не зависят от L_{ij} , что позволяет найти аналитическое решение для парциальных потоков.

Парциальный поток i -го изотопа на отвале каскада W_i выражается в виде

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

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

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

Парциальные потоки i -го изотопа в питании ступеней равны

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

Приведенные формулы 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.

В частном случае одного питания полученные формулы аналогичны соотношениям для R -каскада с дополнительными отборами. Если же взять одинаковые σ_j по ступеням, то приведенные выражения будут описывать квазиидеальный каскад с произвольным количеством питаний и дополнительных отборов.

Оптимизация каскада производится путем варьирования коэффициентов σ_j ступеней. Как показали расчеты, при любых критериях эффективности можно использовать метод Хука-Дживса. Рассмотрены алгоритмы оптимизации для заданных концентраций целевого компонента. Оптимизационный расчет проводился в два цикла. Внешний цикл отвечает за оптимизацию каскада по критерию $\sum_{j=1}^n L_j \rightarrow \min$. 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

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

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, $k_W \in [0,1]$, $k_P \in [0,1]$. 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 коэффициенты k_W и k_P необходимо варьировать.

В четвертой главе представлены разработанные способы каскадного восстановления изотопного состава регенерированного урана, использующие модели и методы расчета, описанные в третьей главе. Существующие способы, предложены в работах В.В. Водолазских, В.А. Журина, А.Н. Чельцова,

Л.Ю. Соснина, Г.А. Сулаберидзе, А.Ю. Смирнова и других авторов. Эти методы имеют определенные недостатки, затрудняющие их использование. Главные из них: обогащение ^{235}U до концентраций более 5 – 20 %, использование природного и отвалного урана в качестве разбавителя, большие затраты работы разделения.

Для очистки регенерированного урана предложено использовать дополнительный отбор R -каскада и его обогащение в ординарном каскаде. Основной эффект заключается в понижении концентрации $^{232, 234}\text{U}$ в дополнительном отборе R -каскада, построенного по различным ключевым компонентам.

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. В таблицах 4 и 5 приведены параметры дополнительных отборов R -каскадов, соответствующих наибольшим значениям потока P_2 , при которых выполняются ограничения по $^{232, 234}\text{U}$, принятые в соответствии с ASTM C 996–15 ($^{232}\text{U} - 1 \cdot 10^{-8} \%$, $^{234}\text{U} - 11\,000$ мкг/г ^{235}U , $^{236}\text{U} - 0,025 \%$) для низкообогащенного промышленного гексафторида урана. 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 , P_2 – поток отбора ординарного каскада, C_2^P – концентрация i -го компонента в потоке P_2 .

Таблица 4 – 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

Рассчитываемые каскады состояли из 51 ступени с подачей питания в ступень с номером 45. Коэффициент разделения на единицу разности молекулярных масс был принят равным 1.091. Данная схема 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. Поток питания F составлял 10 г/с и состоял из смеси изотопов: $^{232}\text{U} - 1,5 \cdot 10^{-7} \%$, $^{234}\text{U} - 1,6 \cdot 10^{-2} \%$, $^{235}\text{U} - 0,85 \%$, $^{236}\text{U} - 0,35 \%$. 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. 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 $\sigma_j = 1/\sqrt{q}$, где q определялся по массовым числам ключевых компонентов.

Таблица 5 – Параметры ординарных каскадов с наибольшим значением потока P_2 , соответствующих R -каскадам с различными ключевыми компонентами

R -каскад	P_2 , г/с	$C2_i^P$, %		
		^{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

В каждом варианте расчета дополнительный отбор R -каскада подавался на питание ординарного каскада, параметры которого рассчитывались по аналитическим формулам. 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 – $4,8 \cdot 10^{-2}$ %.

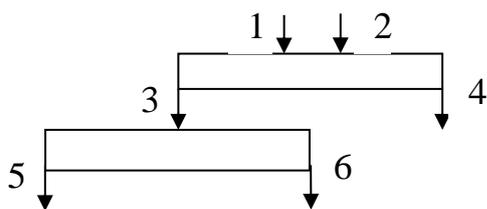
Данные в таблицах 4, 5 свидетельствуют о том, что наилучшим является R -каскад по компонентам $^{232,236}\text{U}$. При этом поток отбора ординарного каскада содержит наименьшее количество изотопа ^{236}U . Суммарный поток ΣL в этом R -каскаде также заметно ниже, чем в других случаях.

Разработанный метод позволяет производить очистку регенерированного урана от минорных изотопов $^{232}, ^{234}\text{U}$ 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. Так, при исходном состоянии смеси концентрации ^{232}U и ^{234}U в низкообогащенном очищенном регенерированном уране составляют $2,46 \cdot 10^{-9}$ % и $4,31 \cdot 10^{-2}$ % соответственно при потоке отбора 0,36 г/с.

Очистка регенерированного урана может быть произведена подачей на второе питание каскада природного урана. Организация дополнительного отбора в каскаде может быть затруднена с технологической точки зрения. В этом случае целесообразно использовать схемы из двух каскадов. Предложены две схемы построения двойных каскадов. Они позволяют эффективно произвести очистку регенерированного урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. В первой схеме второй каскад питается отвалом первого, во второй – питанием второго каскада является отбор первого. 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.

Первая схема представлена на рисунке 5. В этой схеме отвал первого каскада подается на питание второго. 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 $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Поток отбора второго каскада равен 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 концентрация ^{235}U в отвале первого.

Рисунок 5 – 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

Вторая схема двойного каскада представлена на рисунке 6. 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 концентрация ^{235}U в отборе первого. В этой схеме в отвале второго каскада, соответствующем очищенному регенерированному урану, существенно уменьшается концентрация изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Например, для системы каскадов с заданной концентрацией ^{235}U в низкообогащенном гексафториде урана – 3,6 %, в отвале первого каскада – 0,1 %, концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ снижаются в 602, 4,2 и 58 раз соответственно.

При сдвиге точки подачи питания регенерированным гексафторидом урана в сторону отвала первого каскада можно в 2,5 раза увеличить его поток при сохранении одинаковых требований ASTM C 996–15 для продуктов, получаемых в отборе и отвале второго каскада. В таблице 6 представлены расчеты при подаче регенерированного гексафторида урана в первую ступень первого каскада.

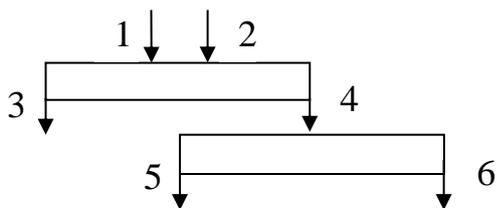


Рисунок 6 – Двухкаскадная схема для очистки регенерированного урана с питанием второго каскада из отбора первого: 1, 2 – питание природным и

регенерированным ураном, 3, 4 – отвал и отбор первого каскада, 5, 6 – отвал и отбор второго каскада.

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

Таблица 6 – 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

Очистка регенерированного гексафторида урана может производиться в дополнительном отборе каскада с двумя питаниями. На основное питание каскада подается регенерированный уран, на второе – природный или отвальный. 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}U , ^{234}U , ^{236}U .

По сравнению с каскадами с одним питанием использование природного гексафторида урана на втором питании уменьшает концентрацию ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U как в дополнительном отборе, так и в основном. Например, на основное питание каскада 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}U , ^{234}U это меньше, чем в питании.

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.

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. Смещение точки подачи отвального гексафторида урана к основному питанию приводит к уменьшению концентрации ^{236}U дополнительного отбора при сохранении содержания $^{232}, ^{234}\text{U}$. Например, в каскаде из 25 ступеней при сдвиге точки подачи питания отвальным гексафторидом урана концентрацией ^{235}U 0,35 % и ^{234}U 0,0018 % из ступени с номером 6 в ступень с номером 13 концентрация ^{236}U в дополнительном отборе уменьшилась с 0,36 до 0,32 %. При увеличении потока второго питания характеристики отборов заметно улучшаются, особенно по ^{236}U .

В таблице 7 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 %. Концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ дополнительного отбора, соответствующего очищенному регенерированному урану, составляют, %: $7,3 \cdot 10^{-8}$, 0,012, 0,34. По сравнению с аналогичным каскадом с одним дополнительным отбором работа разделения снижается в 1,6 раза, поток основного отбора – на 24 %.

Таблица 7 – Концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ 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

Таким образом, регенерированный гексафторид урана может быть очищен от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ 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 проведенных исследований получены следующие научные и практические результаты:

- 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;
- 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;
- Разработан метод оптимизации систем каскадов газовых центрифуг для разделения бинарных смесей изотопов на основе матричного описания связей ступеней в общей схеме;
- Разработан метод аналитического расчета содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по изотопу ^{235}U ;
- Разработан метод аналитического расчета содержания многокомпонентной смеси слабообогатленного регенерированного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по одному из изотопов $^{232}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$;
- Разработан метод численного расчета и оптимизации каскадов по парциальным потокам компонентов смеси с произвольным количеством потоков питания и отбора;
- 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;
- Разработан и запатентован метод очистки регенерированного урана от изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в двойных каскадах с одновременной наработкой низкообогатленного урана. Особенностью метода является практическое отсутствие затрат работы разделения на очистку;
- 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.

Основные публикации по теме работы

*Публикации в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК и
Аттестационным советом УрФУ:*

1. **Maslyukov E.V.** Analytical evaluations of the isotope content of weakly enriched regenerated uranium in optimal multistage cascades / V.A. Palkin, **E.V. Maslyukov** // Atomic Energy. – 2009. – v. 107. № 6. – p. 418–423. 0,69 п.л. / 0,37 п.л. (*Web of Science, Scopus*)
2. **Maslyukov E.V.** 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. 383–389. 0,81 п.л. / 0,53 п.л. (*Web of Science, Scopus*)
3. **Maslyukov E.V.** 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. 111–116. 0,69 п.л. / 0,40 п.л. (*Web of Science, Scopus*)
4. **Maslyukov E.V.** Purification of reprocessed uranium in an additional product flow of a matched abundance ratio cascade and its enrichment in an ordinary cascade / V.A. Palkin, **E.V. Maslyukov** // Theor. foundat. of chem. eng. – 2016. – v. 50, № 5. – p. 711–717. 0,81 п.л. / 0,52 п.л. (*Web of Science, Scopus*)
5. **Maslyukov E.V.** 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. 0,46 п.л. / 0,37 п.л. (*Scopus*)
6. **Maslyukov E.V.** 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. 263–270. 0,81 п.л. / 0,52 п.л. (*Web of Science, Scopus*)
7. **Maslyukov E.V.** 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. 180–186. 0,81 п.л. / 0,53 п.л. (*Web of Science, Scopus*)
8. **Maslyukov E.V.** 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. 110–115. 0,69 п.л. / 0,55 п.л. (*Web of Science, Scopus*)

Патенты:

9. **Маслюков, Е.В.** 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. 1,96 п.л. / 0,71 п.л.

Публикации в других изданиях:

10. **Маслюков, Е.В.**, Палкин, В.А. Компьютерная программа «Каскад газовых центрифуг»: Руководство пользователя – Екатеринбург: ООО «ИНПРИС», 2005. – 25 с. 2,77 п.л. / 0,72 п.л.
11. **Маслюков, Е.В.** 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. 31–34. 0,46 п.л. / 0,23 п.л.
12. **Maslyukov, E.V.** 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. – р. 21–26. 0,69 п.л. / 0,25 п.л.
13. **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. 0,12 п.л. / 0,02 п.л.
14. **Маслюков, Е.В.** Очистка регенерированного урана в R-каскадах с промежуточным отбором : сборник научных трудов «Физика. Технологии. Инновации» / В.А. Палкин, **Е.В. Маслюков** // УрФУ: Екатеринбург. – 2015. – с. 150–154. 0,58 п.л. / 0,11 п.л.