

Отзыв
официального оппонента, кандидата физико-математических наук,
Смирнова Андрея Юрьевича на диссертацию
Маслюкова Евгения Владимировича «МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ
КАСКАДОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ И МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСЕЙ
ИЗОТОПОВ УРАНА»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

На отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, четырех глав, заключения, списка основных обозначений, списка литературы и приложений А, Б, В, Г, Д.

1. Актуальность темы диссертации

Эффективное обогащение урана в каскадах газовых центрифуг для получения топлива энергетических реакторов было и остается ключевой задачей для разделительных комбинатов. Данный факт стимулирует развитие и совершенствование подходов к моделированию селективного массопереноса компонентов разделяемых смесей в каскадах с целью изучения физических закономерностей изменения их параметров и оценки их оптимальных значений. Развитие указанных подходов важно для теоретиков, расчетчиков и эксплуатирующего персонала. Важно отметить, что в последние годы основной тенденцией развития теории разделения изотопов в каскадах, как в бинарном так и в многокомпонентном случаях является изучение закономерностей массопереноса в многопоточных и многокаскадных схемах с целью обоснования областей их применения. В связи с чем, разработка новых методов оптимизации многопоточных каскадов и систем каскадов для обогащения бинарной смеси урана представляется актуальной задачей.

Помимо этого, в контексте принятых в ядерной отрасли решений на переход к замкнутому топливному циклу и возврат в цикл выделенных из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) делящихся материалов (в первую очередь изотопа ^{235}U), наряду с привычной задачей обогащения природного урана востребованной становится разработка способов эффективного обогащения (или восстановления изотопного состава) регенерированного урана, полученного из топлива реакторов на тепловых нейтронах. Основная проблема при решении этой задачи состоит в том, что обогащение регенерата, в отличие от природного урана, осложнено появлением в его составе искусственных изотопов $^{232},^{236}\text{U}$ и ростом содержания ^{234}U по отношению к природной смеси. При этом действующие российские и международные спецификации на товарный низкообогащенный уран (НОУ) довольно жестко регламентируют допустимые содержания данных изотопов. При обогащении природного урана это не является проблемой, однако при обогащении регенерированного данные изотопы обогащаются вместе с целевым изотопом ^{235}U , что приводит к получению НОУ, не удовлетворяющего требованиям спецификаций.

Для эффективного решения описанной выше проблемы обогащения регенерированного урана с одновременным снижением содержания четных изотопов в продукте в большинстве ситуаций требуются специальным образом модифицированные каскадные схемы, позволяющие разбавлять или очищать регенерат от четных изотопов, и

основанные на использовании многопоточных каскадов и их комбинаций (систем каскадов). Очевидно, что при проектировании подобных установок важную роль играет оптимизация их параметров по выбранным критериям эффективности. При этом в дополнение к моделям, позволяющим достаточно точно решать подобные расчетные задачи с использованием численных методов, но требующих для своего использования определенной квалификации и наличия вычислительных мощностей, интерес представляет поиск упрощенных моделей, позволяющих с некоторой точностью осуществить оценку изотопного состава обогащенного регенерированного урана аналитическими методами.

Таким образом, одной из главных тенденций в направлении развития теоретических работ в области обогащения бинарной и многокомпонентных смесей урана является изучение физических закономерностей массопереноса компонентов в многопоточных каскадах и последовательных соединениях одиночных каскадов (многокаскадных схемах), а также поиск их оптимальных параметров при решении различных разделительных задач. При этом остаются нерешенными такие задачи, как разработка универсальных, эффективных подходов к оптимизации многокаскадных и многопоточных схем для эффективного обогащения регенерированного урана с учетом требований к содержанию четных изотопов в продукте. Отсутствуют удобные аналитические модели, позволяющие в некотором приближении оценить содержания различных изотопов в обогащенном регенерированном уране в различных вариантах каскадов.

Учитывая выше сказанное, выполненное диссертантом научное исследование, направленное на решение задач расчета и оптимизации различных вариантов многопоточных каскадных схем и их комбинаций (систем) для эффективного обогащения бинарной и многокомпонентной смесей урана, а также практическое воплощение этих подходов в виде компьютерных программ-тренажеров для повышения квалификации персонала разделительных производств представляется актуальной и значимой научно-технической работой.

2. Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных обозначений, библиографического списка, включающего 86 наименований, пяти приложений и содержит 128 страниц, 19 рисунков и 26 таблиц.

Во введении обоснована актуальность работы, степень разработанности темы, сформулированы цель и научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследований, основные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы методы диссертационного исследования, обоснована достоверность полученных результатов и дана информация относительно их апробации.

В первой главе дан обзор и проведен критический 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 урана. Ключевым отличием разработанных модели и метода от ранее известных является возможность расчета каскада с несколькими потоками питания при заданных количествах газовых центрифуг в ступенях.

Разработанная методика оптимизации в многомерном пространстве, основанная на использовании метода Хука-Дживса, позволяет осуществлять оптимизацию технологической схемы каскада по различным критериям эффективности, включая максимум эффективной разделительной способности каскада. Данная схема расчета легла в основу компьютерной программы «Каскад газовых центрифуг» для проведения технологических расчетов. Ее упрощенный вариант в виде компьютерного тренажера использовался для обучения технологического персонала разделительных производств.

В дополнение к этому в данной главе описан разработанный диссертантом метод оптимизации систем каскадов газовых центрифуг, использующий матричное описание связей ступеней в общей схеме. Система каскадов представляется одним каскадом со сложной схемой соединения ступеней. В качестве примера рассмотрено разделение бинарной смеси изотопов гексафторида урана в системах двух каскадов при параллельно и противоточно идущих межкаскадных потоках.

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

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.

В четвертой главе представлены разработанные способы каскадного восстановления изотопного состава регенерированного урана, использующие модели и методы расчета, описанные в третьей главе. Разработанные методы направлены на устранение недостатков ранее предложенных другими авторами способов.

В первом методе 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. 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.

Второй метод основан на использовании схем из двух каскадов, позволяющих эффективно произвести очистку регенерированного урана от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ без дополнительных затрат работы разделения. Предложенный метод очистки запатентован.

Третий метод представляет собой очистку регенерированного гексафторида урана 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 $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$.

В заключении сформулированы основные выводы, сделанные на основе анализа результатов работы, даны рекомендации по применению полученных результатов и намечены перспективы дальнейших исследований по данной тематике.

3. Соответствие диссертации паспорту специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам области исследования паспорта научной специальности 05.14.03:

П. 1. Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих расчетное обоснование облика и безопасного функционирования объектов ядерной техники.

П. 3. Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем.

4. Методы исследования

При достижении цели и для решения задач исследования использовался анализ и обобщение данных научно-технической литературы. Методологической основой исследования стало моделирование, основанное на изучении свойств предложенных в работе схем каскадов на основе их математических моделей. Аналитическое и численное моделирование процессов разделения смесей изотопов урана проведено с использованием специально разработанных компьютерных программ. Результаты расчетов и оптимизации модельных каскадов сравнивались с результатами, полученными другими исследователями.

5. Степень обоснованности положений и достоверности полученных результатов

В работе использованы подходы и методы, ранее примененные в аналогичных исследованиях, задачи поставлены корректно, принятые приближения и использованные физико-математические модели обоснованы. Разработанные методы оптимизации использованы в технологических расчетах. Результаты полученных на основе аналитических и численных расчетов согласуются друг с другом.

Таким образом, достоверность результатов и выводов диссертационного исследования обоснованы в достаточной степени и, подтверждается успешной аprobацией полученных автором результатов на следующих научных 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.

6. Научная новизна исследования

Диссертантом 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;
- Разработаны аналитические методы оценки содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного урана в многопоточном каскаде, оптимизированном по ^{235}U , и 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 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.

7. Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая и практическая значимость работы определена следующим:

- Диссертантом разработана Компьютерная программа «Каскад газовых центрифуг», предложенная для оптимизации разделения бинарной смеси изотопов урана, которая в опытном порядке использовалась при проведении технологических расчетов схем каскадов на ОАО «Сибирский химический комбинат»;
- На основе разработанных в диссертации 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»;
- Разработанные диссертантом аналитические методы позволяют без детальных расчетов оптимальных многопоточных каскадов оценить состав многокомпонентной смеси изотопов урана в отборных и отвальном потоках;
- Разработанный 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 внедрена в учебный процесс при подготовке специалистов в области разделения изотопов в Национальном исследовательском Томском политехническом университете и Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»;

- Разработанные методы очистки регенерированного урана могут быть эффективно использованы на разделительных предприятиях;
- Разработанные в диссертации методы и подходы к оптимизации многопоточных и многокаскадных схем могут быть использованы при оптимизации каскадов для разделения многокомпонентных смесей стабильных изотопов неуранных элементов.

8. Отличие выполненных исследований от других работ

Методы расчета каскадов для обогащения урана в бинарном приближении получили свое первоначальное развитие в рамках военных программ в 1940-е годы прошлого века. В тот момент основным объектом исследования выступал трехпоточный (ординарный) каскад, а основным методом обогащения урана выступал метод газовой диффузии. Позже с 1960-х годов стала активно развиваться теория каскадов для разделения многокомпонентных смесей силами исследователей ВНИПИЭТ, УрФУ, НИЯУ МИФИ, УЭХК, ПО «ЭХЗ», НИЦ «Курчатовский институт» и других организаций на территории бывшего СССР и в мире. На первоначальном этапе объектом исследования также выступал ординарный каскад. С 1970-х годов, а более активно в последние два десятилетия стали развиваться подходы к расчету и оптимизации многопоточных и многокаскадных схем. Подобные схемы могут быть применены, например, при обогащении регенерированного урана с учетом принятых ограничений на содержание четных изотопов в продукте, или при получении высоких концентраций стабильных изотопов промежуточных массовых чисел.

Одной из основных трудностей при моделировании каскадных схем для разделения многокомпонентных смесей изотопов является относительная сложность описывающих их уравнений, что требует скрупулезного подхода при выборе методов расчета и оптимизации параметров подобных каскадов. При этом практически отсутствуют задачи, для которых можно произвести проектировочный расчет каскада аналитически и оценить концентрации компонентов в продукте, не прибегая к численным методикам расчета и оптимизации их параметров.

Диссидентом были предложены оригинальные методики оптимизации каскадов с произвольным числом внешних потоков (питаний и отборов) и систем каскадов как в случае разделения бинарной, так и многокомпонентной смеси урана. Кроме того, предложены методы аналитической оценки содержания многокомпонентной смеси коммерческого природного и слабообогащенного регенерированного урана.

Помимо этого, диссидентом предложены оригинальные методы коррекции изотопного состава регенерированного урана в процессе его обогащения, лишенные недостатков некоторых ранее предложенных способов восстановления регенерата урана, в частности, получения фракции с относительно высоким обогащением (5-20%).

Таким образом, результаты диссидентского исследования дополняют результаты, полученные другими исследователями в рамках данного научного направления за последние десятилетия.

9. Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в диссидентской работе, получены лично автором работы или при его участии.

10. Публикация основных результатов работы

По материалам диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, в том числе 8 статей в изданиях, индексированных в международных системах цитирования Web of Science и Scopus.

11. Замечания

1. В главе 4 фактически отсутствует сравнение параметров предложенных диссертантом каскадных схем для обогащения регенерированного урана с их ближайшими прототипами, предложенными другими авторами. Подобное сравнение дало бы более полное представление о преимуществах предложенных способов.

2. В главе 4 (п. 4.3.2) из данных таблицы 4.12 (стр. 99) следует, что во всех трех каскадах концентрации изотопа ^{232}U в «Отборе 2» превышают допустимые, согласно спецификации ASTM C 996-15, пределы. При этом в указанных отборах должен быть получен НОУ. Данный факт никак не прокомментирован в диссертации.

3. Несмотря на то, что в главе 3 (п. 3.1, 3.2) при описании результатов аналитической оценки содержания изотопов многокомпонентной смеси коммерческого природного и слабообогащенного регенерированного урана в каскадах, оптимизированных только на обогащение ^{235}U или одного из изотопов $^{232,234,235,236}\text{U}$, дано сравнение численного и аналитического случаев. Неплохо было бы провести дополнительное параметрическое исследование, позволяющее оценить границы применимости предложенных аналитических методов.

4. В списке литературы присутствуют дублирования одних и тех же работ, опубликованных в журналах, имеющих переводные версии. В частности, работы [72] и [73] по сути представляют одни и те же результаты, опубликованные в русской и англоязычной версиях журнала «Атомная энергия».

5. Общим замечанием по изложению результатов работы является недостаточно подробный анализ присутствующих в ней в изобилии иллюстративных материалов (таблиц и рисунков). Помимо этого не хватает обобщающих разделов по каждой из глав, что затрудняет формирование общего восприятия результатов работы и их физической интерпретации. Особенно, принимая во внимание, что заключение по работе также фактически сводится к перечислению разработанных методов и алгоритмов, не давая более четкого представления о значении полученных результатов для теории и практики разделения изотопов в каскадах центрифуг.

Однако, высказанные замечания не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы. Поставленные в ней задачи – решены полностью, а цели – достигнуты.

12. Соответствие диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ

Диссертационная работа Маслюкова Е.В. в полном объеме отвечает критериям, которые установлены Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

В диссертационной работе получены новые, достоверные результаты, частично внедренные на разделительных производствах и при подготовке специалистов в данной области в ведущих ВУЗах. Дальнейшее внедрение результатов имеет важное научно-практическое значение для повышения эффективности процесса обогащения урана и получения другой изотопной продукции.

13. Общее заключение

Диссертационная работа «Методы расчета и оптимизации каскадов для разделения бинарной и многокомпонентной смесей изотопов урана» является законченной научно-квалификационной работой, обладает актуальностью, содержит значимые для отрасли научные и практические результаты.

Считаю, что представленная диссертационная работа полностью отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а соискатель, Маслюков Евгений Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Официальный оппонент,
доцент отделения нанотехнологий в электронике,
спинtronике и фотонике офиса
образовательных программ (414) /
Институт нанотехнологий в электронике,
спинtronике и фотонике НИЯУ МИФИ,
кандидат физико-математических наук

 Смирнов Андрей Юрьевич
«19» марта 2020 г.

Сведения:

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Юридический адрес: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Телефон: +7 (495) 788-5699 доб. 9582

Электронный адрес: AYSmirnov@mephi.ru

Подпись Смирнова А.Ю. заверяю

