

На правах рукописи



**Гусев Владислав Евгеньевич**

**Каскадные схемы для обогащения регенерированного  
урана при его многократном рецикле в топливных  
циклах перспективных энергетических реакторов**

Специальность 01.04.07 —  
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научные руководители: кандидат физико-математических наук, доцент

**Сулаберидзе Георгий Анатольевич**

кандидат физико-математических наук, доцент

**Смирнов Андрей Юрьевич**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Не очень длинное название для места работы,  
старший научный сотрудник

**Фамилия Имя Отчество**,  
кандидат физико-математических наук,  
Основное место работы с длинным длинным  
длинным длинным названием,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования с длинным длинным длинным длинным названием

Защита состоится DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов на заседании диссертационного совета Д123.456.78 при Название учреждения по адресу: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Адрес, ученому секретарю диссертационного совета Д123.456.78.

Автореферат разослан DD mmmmmmmm YYYY года.

Телефон для справок: +7 (0000) 00-00-00.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Д123.456.78,

д-р физ.-мат. наук



Фамилия Имя Отчество

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы.

Построение ядерной энергетики нового типа, устойчивой к ресурсным ограничениям и предусматривающей решение проблемы обращения с радиоактивными отходами, связано с реакторами на быстрых нейтронах, нацеленными на воспроизводство делящегося материала – энергетического плутония. Однако, по оценкам [1], в ближайшие десятилетия переходного периода к двухкомпонентной ядерно-энергетической системы, делящиеся материалы будут повторно использоваться в топливном цикле реакторов на тепловых нейтронах, так как они составляют основную часть парка энергоблоков.

На сегодняшний день мире в состоянии эксплуатации и сооружения насчитывают около 500 ядерных энергоблоков, подавляющее большинство из которых представляют собой легководные реакторы [2], работающие на ядерном топливе из низкообогащенного урана. Работа каждого из энергоблоков создает необходимость в обеспечении его топливными ресурсами и выборе способа обращения с выгруженным из него облученным ядерным топливом (ОЯТ). Проанализируем каждую из составляющих. Как известно, основным материалом для производства топлива реакторов на тепловых нейтронах является природный уран, который предварительно обогащают на разделительных производствах, как правило, с использованием газовых центрифуг. В соответствии с доступными данными, мировые запасы урана оценивают в 59 мегатонн [3]. Но большая часть этих запасов, составляют ресурсы урана, для которых на сегодняшний день отсутствуют отработанные технологии добычи и, соответственно, стоимость такого урана не определена. По текущим оценкам лишь  $\approx 8$  мегатонн природного урана можно добыть с операционными затратами, не превышающими порогового значения в 260 \$/кг [4], которое оценивается как предельное для сохранения конкурентоспособности ядерной генерации по сравнению с другими источниками (на этом уровне затраты на топливную составляющую при генерации одного кВт\*ч превысят 1 евроцент) [5]. В связи с этим существуют прогнозы, предсказывающие неизбежный разрыв между добычей и потреблением природного урана в будущем, что может привести к значительным проблемам с обеспечением топливом реакторов на тепловых нейтронах в перспективе 15–20 лет [6].

Дополнительным вызовом для ядерной промышленности является обращение с ОЯТ в долгосрочной перспективе. На текущий момент общемировая масса хранимого ОЯТ составляет более 400 килотонн [7]. С каждым годом эта масса прирастает примерно на 11 килотонн [8]. Учитывая сложности поиска новых мест для строительства хранилищ ОЯТ, а также негативное отношение общества к этой проблеме во многих странах, очевидно, что без выработки приемлемого со всех точек зрения решения,

это затруднит развитие ядерной энергетики в будущем. Следует отметить, что основным материалом облученного ядерного топлива является уран, составляющий  $\approx 90\text{--}95\%$ , за вычетом конструкционных материалов. Оставшаяся часть делится между плутонием и продуктами (осколками) деления. В большинстве случаев регенерированный уран содержит  $^{235}\text{U}$  на уровне  $\geq 0,85\%$ , то есть долю делящегося изотопа выше, чем в природном уране, что делает целесообразным его повторное использование и обогащение на изотопно-разделительном производстве [9]. Вовлечение регенерированного урана отдельного или совместно с плутонием в производство ядерного топлива реакторов на тепловых нейтронах может позволить существенно сократить объем захоронения радиоактивных отходов и снизить потребности в природном уране. Однако стоит отметить, что реакторы на тепловых нейтронах являются реакторами-«сжигателями», то есть в среднем воспроизводят делящихся материалов значительно меньше, чем распадается в активной зоне реактора в процессе облучения топлива. Этот факт говорит о том, что для реакторов данного типа невозможно полное замыкание ядерного топливного цикла, поскольку для их полноценного обеспечения топливом потребуются внешние источники делящихся материалов.

Особо следует отметить следующие проблемы, связанные с переработкой ОЯТ и использованием регенерата урана в топливном цикле легководных реакторов на тепловых нейтронах.

Во-первых, переработка ОЯТ сама по себе представляет технологически сложную, капиталоемкую, радиационно-опасную и затратную процедуру. Лишь немногие страны на текущий момент обладают промышленными технологиями переработки и соответствующими мощностями, позволяющими рассматривать возможность замыкания топливного цикла. Во-вторых, при облучении ядерного топлива в активной зоне реактора образуются искусственные изотопы урана, в первую очередь,  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ . Кроме того, как правило, возрастает и концентрация природного изотопа  $^{234}\text{U}$ . Изотоп  $^{232}\text{U}$  опасен тем, что является родоначальником цепочки распадов, среди дочерних продуктов которых есть, в частности,  $^{208}\text{Tl}$ , представляющий собой источник жесткого гамма-излучения, обуславливающего высокий уровень радиоактивного фона. Поэтому при производстве уранового топлива существуют нормативные ограничения на допустимое содержание  $^{232}\text{U}$  в низкообогащенном уране. На текущий момент в РФ допустимые концентрации (в мас. долях)  $^{232}\text{U}$  в НОУ не должны превышать значений  $2 - 5 \cdot 10^{-7}\%$ . Проблема, связанная с изотопов  $^{236}\text{U}$  состоит в том, что он вносит паразитное поглощение нейтронов в ядерное топливо и, следовательно, отрицательно воздействует на реактивность реактора и глубину выгорания топлива. При наличии в загружаемом в реактор топливе  $^{236}\text{U}$  для компенсации его отрицательного влияния на реактивность и для получения заданных ядерно-физических характеристик реактора нужно повышать среднее начальное обогащение топлива по  $^{235}\text{U}$ .

Отдельно стоит подчеркнуть, что концентрации изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  (четных изотопов), возрастают при обогащении регенерированного урана в ординарных (трехпоточных/стандартных) каскадах газовых центрифуг, используемых для обогащения природного урана. Под ординарным каскадом понимают каскад, имеющий три внешних потока – питание, отбор и отвал. Фактически это означает необходимость развития способов обогащения регенерированного урана с учётом требования к регулированию изотопного состава производимого обогащенного продукта таким образом, чтобы удовлетворить требованиям действующих технических условий на товарный низкообогащенный уран.

Что касается переработки ОЯТ, предваряющей стадию обогащения восстановленного посредством нее регенерата, данная диссертационная работа не затрагивает вопрос переработки как касающийся другой специализации – радиохимии – и исходит из целесообразности использования регенерата в соответствии со следующими положениями:

1. В РФ регенерат урана можно рассматривать как доступный де-факто по нулевой себестоимости в качестве побочного продукта переработки ОЯТ, так как в основу государственной политики Российской Федерации в области обращения с ОЯТ положен принцип его переработки для обеспечения экологически приемлемого обращения с продуктами деления и возврата в ядерный топливный цикл регенерированных ядерных материалов [10];
2. Переработка ОЯТ с целью повторного использования урана сопоставима по затратам с опцией прямого захоронения, и экономика замыкания ЯТЦ по урану становится более конкурентной в условиях роста стоимости природного урана [11–13].

На сегодняшний день предложен ряд технических решений, позволяющих решить задачу обогащения регенерированного урана до концентраций  $^{235}\text{U}$ , требуемых в современных топливных циклах энергетических реакторов на тепловых нейтронах (в частности отечественных ВВЭР), при одновременном выполнении принятых ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$  в ядерном топливе и реализации необходимого дообогащения регенерата по  $^{235}\text{U}$  для компенсации негативного влияния  $^{236}\text{U}$ . Тем не менее далеко не все из них являются универсальными и способны решить задачу обогащения регенерата с одновременной коррекцией его изотопного состава в условиях, когда исходное содержание четных изотопов может существенно меняться, например, в сторону увеличения. Последнее обстоятельство особо важно в контексте рассмотрения перспективных реакторов, имеющих относительно высокую глубину выгорания топлива и, как следствие, состав ОЯТ которых может характеризоваться более высоким содержанием четных изотопов. Помимо этого, необходимо учитывать, что замыкание

топливного цикла реакторов на тепловых нейтронах подразумевает многократное использование урана, что будет обуславливать дополнительное накопление четных изотопов в регенерате от цикла к циклу.

Таким образом, актуальным для разделительной науки остается вопрос поиска эффективных способов обогащения регенерата урана с одновременной коррекцией его изотопного состава в условиях развития тенденции повышения глубины выгорания топлива и многократного использования урана в нём (многократный рецикл урана). В дополнение к этому отдельно стоит вопрос выбора оптимальной каскадной схемы для дообогащения регенерированного урана, которая должна обеспечить максимально эффективное использование ресурса регенерированного урана при минимальных затратах работы разделения, принимая во внимание обеспечение безопасности работы персонала разделительного комбината.

Решение указанных задач возможно осуществить на основе активно развивающейся в последние десятилетия теории каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей. Существующие в этой теории модели массопереноса компонентов в многоступенчатых разделительных установках позволяют выявить ключевые закономерности изменения интегральных характеристик таких установок в процессе обогащения регенерированного урана с целью поиска оптимальных условиях такого процесса.

Целью диссертационной работы является изучение физических закономерностей молекулярно-селективного массопереноса в ординарных и многопоточных каскадах для разделения многокомпонентных смесей с целью дальнейшего поиска оптимальных условий обогащения регенерированного урана в подобных каскадах при его многократном использовании в регенерированном ядерном топливе для реакторов на тепловых нейтронах.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ физических закономерностей массопереноса компонентов смеси регенерированного урана в ординарном каскаде. Выявление физических ограничений нахождения решения задачи обогащения регенерата произвольного изотопного состава в одиночном каскаде при одновременном выполнении условий на концентрации изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  в получаемом продукте – низкообогащенном уране, а также априорная оценка возможности решения этой задачи.
2. Физическое обоснование принципов построения двойных каскадов, позволяющих корректировать изотопный состав регенерата по концентрациям изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  с одновременным расходованием максимального количества подлежащего обогащению регенерата при различных исходных концентрациях четных изотопов в нём.
3. Обоснован способ эффективной «утилизации» загрязненной четными изотопами фракции, возникающей в двойных каскадах, с

учетом полной или частичной подачи данной фракции: в третий каскад с предварительным перемешиванием ее с природным, обедненным и/или низкообогащенным ураном; в отдельный двойной каскад, осуществляющий наработку низкообогащенного урана для последующей топливной кампании реактора.

4. Разработаны методы сравнения исследуемых каскадных схем, а также расчетные методики для оптимизации параметров каскадных схем.
5. Изучены физические закономерности изменения изотопного состава регенерата от конфигурации каскадной схемы, а также интегральных характеристик модифицированных двойных каскадов и тройных каскадов при обогащении регенерированного урана с различным исходным содержанием четных изотопов в питающей смеси.

### **Научная новизна:**

1. Впервые предложены модификации двойных каскадов, позволяющие корректировать изотопный состав регенерата по концентрациям изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  с одновременным расходом всего подлежащего обогащению регенерата при различных исходных концентрациях четных изотопов в нем и других внешних условиях.
2. Обоснованы физические принципы построения тройных каскадных схем для максимального вовлечения исходного регенерированного урана для воспроизводства топлива реакторов на тепловых нейтронах.
3. Выполнены оригинальные исследования по изучению физических закономерностей изменения изотопного состава регенерата от конфигураций каскадных схем, и интегральных характеристик модифицированных двойных и тройных каскадов при обогащении регенерированного урана с различным исходным содержанием четных изотопов.
4. Разработаны методы расчетов каскадных схем, позволяющих вернуть регенерированный уран в топливный цикл в условиях многократного рециклирования.
5. Разработаны обобщенные критерии выбора каскадной схемы для эффективного обогащения регенерированного урана в условиях однократного и многократного рециклов.
6. Разработаны методики оптимизации систем каскадов (двойного и тройного каскадов) для обогащения регенерата урана по различным критериям эффективности, таким как:
7. Разработаны подходы к утилизации высокоактивного «нештатного» отхода, образующегося в процессе обогащения регенерированного урана в двойном каскаде.

8. Определены физические закономерности изменения изотопного состава регенерированного урана и параметров каскадных схем (в модифицированном двойном и тройном каскаде) для его дообогащения при многократном рецикле урана (отдельно и совместно с плутонием) в топливе реакторов типа ВВЭР.

### **Практическая значимость**

1. Проведенный анализ физических закономерностей массопереноса компонентов смеси регенерированного урана в ординарном каскаде позволяет однозначно определять условия при которых возможно/невозможно получение необходимого количества конечного продукта на основе регенерированного урана различного исходного состава путем обогащения в одиночном каскаде.
2. Разработанные модификации двойных и тройных каскадов позволяющие обогащать регенерированный уран с одновременным выполнением ограничений на концентрации четных изотопов и максимальным вовлечением исходного регенерата.
3. Предложенные способы оптимизации построения каскадных схем двойного и тройного каскадов позволяют находить наиболее эффективные с точки зрения таких критериев, как расход работы разделения, расход природного урана, степень извлечения  $^{235}\text{U}$ , конфигурации каскадов, позволяющие осуществлять возврат всей массы регенерированного урана в цикл.
4. Разработаны рекомендации по использованию результатов работы для обогащения регенерированного урана в условиях однократного и многократного рецикла в различных видах топлива. Представленные в работе результаты могут быть использованы в расчетных группах на предприятиях и организациях, связанных как с проектированием и построением разделительных каскадов, так и непосредственным производством изотопной продукции (АО «Уральский электрохимический комбинат», АО «Сибирский химический комбинат», АО «ТВЭЛ», АО «Восточно-Европейский головной научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий», АО «ПО «ЭХЗ» и др.). Предложенные методики расчета могут лечь в основу технико-экономического анализа использования восстановленного урана для получения низкообогащенного урана, отвечающего требуемым качествам.

**Методология и методы исследования.** Исследование проводит систематизацию научно-технической литературы, посвященной заявленной теме. Применены подходы, известные в современной теоретической физике, и в частности, в теории разделения изотопов в каскадах. В ходе работы обоснованы принципы построения анализируемых каскадов, и проведено математическое моделирование каскадных схем. Для



проведения расчетов использованы схемы модельных каскадов (квазиидеальный каскад и его разновидность R-каскад, для которого выполняется условие несмешивания относительных концентраций пары выбранных компонентов). Моделирование процессов разделения смесей изотопов урана проводили с использованием разработанных в ходе выполнения работы специализированных компьютерных программ. Применены современные программные средства языков программирования Julia и Python и подключаемых библиотек, таких как NLOpt, Optim, ScyPy, предназначенных для решения систем нелинейных уравнений и оптимизационных процедур, Plots.jl для визуализации результатов.

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

1. Результаты анализа физических закономерностей массопереноса компонентов смеси регенерированного урана в ординарном каскаде, позволяющие однозначно определить условия при которых возможно/невозможно получение необходимого количества конечного продукта на основе регенерированного урана различного исходного состава путем обогащения в одиночном каскаде.
2. Физико-математические модели, методики расчета и оптимизации модифицированных двойных и тройных каскадных схем для обогащения регенерата урана с одновременным выполнением условий на концентрации четных изотопов и максимальным вовлечением исходного материала.
3. Методика выбора каскадной схемы обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла, в зависимости от его исходного состава и принятых ограничений на концентрации четных изотопов.

**Достоверность.** Надежность, достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертации, следует из корректности постановки задач, физической обоснованности применяемых приближений, использования методов, ранее примененных в аналогичных исследованиях, взаимной согласованности результатов, а также из совпадения результатов численных экспериментов. Корректность результатов вычислительных экспериментов гарантируется тестами и операторами проверки соответствия ограничениям, верифицирующими строгое выполнение заданных условий и соблюдение условий сходимости балансов (массовых и покомпонентных).

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие разработке каскадных схем, написании расчетных кодов, проведении вычислительных экспериментов, а также в обработке и в анализе результатов численных экспериментов. Автор разработал расчетные коды, реализующие новые подходы к оптимизации рассматриваемых схем.

## Содержание работы

Во введении обоснована актуальность разработки схем для обогащения регенерированного урана. Сформулирована цель исследования, доказана научная новизна, а также практическая значимость выполненной работы. Вынесены на защиту основные положения, обоснована достоверность полученных в работе результатов и представлены сведения об их апробации. Изложена постановка задачи замыкания ядерного топливного цикла по урановой компоненте топлива легководных реакторов в условиях многократного рецикла.

Первая глава посвящена теоретическому введению в проблему поиска схем каскадов для обогащения восстановленного урана. Изложены основные теоретические сведения, необходимые для моделирования разделения многокомпонентных изотопных смесей в каскадах. Представлен обзор каскадных схем, посвященных возврату регенерированного урана в ядерный топливный цикл, известных к началу написания диссертационной работы.

На основе обзора, приведенного в первой главе, во второй главе выявляются ограничения известных схем. Исследование, проводимое во второй главе показывает нецелесообразность использования схем на основе ординарных каскадов. Также исследуются границы применимости двойного немодифицированного каскада для решения поставленной задачи. Выявлены физические принципы, на основании которых можно априорно судить о неприменимости некоторых каскадных схем для задачи возврата восстановленного регенерата в топливный цикл легководных реакторов в режиме многократного рециклирования. В этой главе формулируется рекомендация перехода к составным схемам на основе двойного каскада, обеспечивающим «пространственное» разделение для отделения изотопов легкой фракции  $^{232,234,236}\text{U}$  в получаемом продукте – низкообогащенном уране. Во второй главе:

1. описывается расчетная методика и ее основные предположения для используемых математических моделей.
2. выявляются физические причины затруднений при решении задачи обогащения регенерата произвольного изотопного состава в одиночном каскаде при одновременном выполнении условий на концентрации нецелевых изотопов.
3. рассматриваются ограничения двухкаскадной схемы и устанавливается необходимость ее модификации.

Третья глава вытекает из анализа ограничений известных схем, проведенного во второй главе и из намеченного в ней пути решения задачи возврата в ЯТЦ регенерата в условиях многократного рецикла. В главе демонстрируется способ решения поставленной во введении задачи

с помощью двойного модифицированного каскада, который испытывается для различных исходных смесей питающего регенерата, характерных для легководного реактора. Для этой схемы исследуются закономерности массопереноса изотопов урана при разных условиях и разрабатываются подходы к ее оптимизации на различные критерии. Далее прорабатываются способы устранения основной проблемы рассмотренной схемы двойного модифицированного каскада – загрязненной легкими изотопами  $^{232,234}\text{U}$  побочно производимой фракции. Рассматриваются известные способы утилизации изотопной композиции схожего состава, а также, исходя из присутствия в побочной фракции большого количества  $^{235}\text{U}$ , предлагаются способы его вовлечения с помощью схем с замыканием или дополнительных одиночных каскадов (построение тройного каскада). Для предлагаемых каскадных схем описывается методика расчета и оптимизации. В данной главе исследуются как возможности решения задачи полного возврата массы регенерированного урана, так и варианты замыкания ядерного топливного цикла по урановой компоненте вне рамок этого условия. Тогда как первый вариант нацелен на рециклирование топлива в системе отдельно взятого энергоблока, второй предлагает рассмотрение воспроизводимого топливообеспечения для парка реакторов как единой системы. Итак, в третьей главе:

1. рассмотрены способы обращения с загрязненной четными изотопами фракции, возникающей в двойных каскадах. В первую очередь исследуется путь вовлечения этой фракции в производство свежего низкообогащенного урана, что позволяет избежать потерь  $^{235}\text{U}$ , сконцентрированного в этом побочном потоке. Как альтернатива анализируется возможность вывода из системы части загрязненного потока легкой фракции второго каскада в контексте потерь  $^{235}\text{U}$ , стоимости обращения с нештатным отходом, а также технической реализуемостью достижения в этом потоке концентрации изотопа  $^{234}\text{U}$  на уровне по порядку величины сопоставимом с  $^{235}\text{U}$ .
2. рассматривается область применения схемы двойного каскада с замыканием, ввиду ограничения, связанного с накоплением легких четных изотопов  $^{232,234}\text{U}$  в загрязненной фракции с ростом числа рециклов.
3. рассматривается вопрос целесообразности выхода за верхние пороговые значения концентрации  $^{235}\text{U}$  для НОУ.
4. анализируются потенциальные преимущества решения задачи рециклирования урана вне условия эквивалентного возврата.
5. осуществляется сопоставление рассмотренных схем по критериям:
  - а) расход природного урана
  - б) затраты работы разделения
  - в) доля потерь  $^{235}\text{U}$  в схеме
  - г) доля потерь  $^{235}\text{U}$  из исходного регенерата

- д) доля ГЦ в схеме, в которых превышена предельно допустимая концентрация по  $^{232}\text{U}$

Таким образом, глава посвящена анализу предложенных в диссертации каскадных схем для решения задачи замыкания ядерного топливного цикла легководных реакторов по урану.

В **заключении** приведены основные выводы, сделанные в ходе диссертационного исследования и перечислены полученные результаты.

По итогу исследования выдвигаются рекомендации по использованию результатов работы для обогащения регенерированного урана в условиях однократного и многократного рецикла в различных видах топлива.

В результате проведения диссертационной работы разработаны варианты каскадных схем, позволяющие решить задачу обогащения регенерированного урана в условиях его многократного рецикла при условиях, характерных топливному циклу современных легководных реакторов российского дизайна и международным спецификациям:

1. Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем;
2. Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока  $P_2$  в цикл;
3. Схема тройного каскада с НОУ-разбавителем и дополнительным разбавителем потока  $P_2$ , возвращаемого в цикл
4. Схема независимой утилизации побочного продукта легкой фракции второго каскада схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем.

Для каждой из предложенных схем разработаны оригинальные методики расчета и оптимизации ее параметров по критерию минимума суммарного потока каскадной схемы, основанная на использовании современных методов условной оптимизации функций многих переменных. С использованием разработанных методик расчета и оптимизации предложенных каскадных схем продемонстрирована возможность их использования для обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла на примере взятого из литературы изотопного состава регенерата урана с повышенным содержанием четных изотопов и отвечающего пятому рециклу в топливе ВВЭР. Все рассмотренные решения применимы для различных видов регенерированного ядерного топлива, как РУТ, так и MOX и REMIX.

Полученные оценки интегральных характеристик каскадных схем для топливного цикла с использованием только обедненного урана свидетельствуют о целесообразности оценки возможности реализации ЯТЦ при таких условиях с учетом масштабов доступных производственных мощностей по обогащению урана.

Для выбора конкретного варианта каскадной схемы с целью дальнейшей практической реализации необходим детальный технико-экономический анализ каждой из схем на основе их интегральных показателей

(расходные характеристики, затраты работы разделения и пр.) в контексте всей цепочки стадий ЯТЦ и с учетом возникающих в этой цепочке изменений при использовании регенерата урана по отношению к открытому топливному циклу.

Помимо этого, необходима проработка технологических проблем каждой из схем, в частности, с точки зрения возможности эксплуатации и обслуживания оборудования в условиях работы с материалами, имеющими более высокую, чем природный уран удельную активность. Например, подобные условия возникают в «очистительных» каскадах, выделяющих в легкую фракции  $\alpha$ -активные изотопы  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ .

Использование уранового регенерата для производства топлива легководных энергетических реакторов позволит:

1. сократить объем захоронения радиоактивных отходов;
2. обеспечить экономию природного урана;
3. сэкономить затраты работы разделения (по сравнению со случаем обогащения природного урана) при дообогащении данного материала в разделительном каскаде.

## Список литературы

1. Андрианова, Е. А. Перспективные топливные загрузки реакторов для замкнутого топливного цикла ядерной энергетики / Е. А. Андрианова, В. Д. Давиденко, В. Ф. Цибульский // Атомная энергия. — 2015. — июнь. — т. 118, № 5. — с. 243—247.
2. PRIS - Home. — <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>.
3. Agency, I. A. E. Uranium 2020 / I. A. E. Agency. — 2021. — с. 484.
4. World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO). — Vienna : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2018. — (TECDOC Series ; 1843).
5. Competition and Conflicts on Resource Use / ed. by S. Hartard, W. Liebert. — Cham : Springer International Publishing, 2015.
6. Storing Spent Fuel until Transport to Reprocessing or Disposal. — Vienna : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2019. — (Nuclear Energy Series ; NF-T—3.3).
7. Кайгородцев, А. А. Проблемы И Перспективы Развития Атомной Энергетики В Глобализованном Мире / А. А. Кайгородцев // Научное Обозрение. Экономические Науки. — 2021. — № 1.
8. Use of Reprocessed Uranium : Text. — 02/2019. — <https://www.iaea.org/publications>
9. Б.В. Никипелов, В.Б. Никипелов, «Судьбы Уранового Регенерата», Бюллетень По Атомной Энергии, 9 (2002): 34.

10. Концепция По Обращению с Отработавшим Ядерным Топливом Госкорпорации «Росатом», Утвержденная Приказом Госкорпорации «Росатом» От 29.12.2008 № 721, с Изменениями От 15.09.2014 №1/871-П.
11. Economic Potential of Fuel Recycling Options: A Lifecycle Cost Analysis of Future Nuclear System Transition in China / R. Gao [et al.] // Energy Policy. — 2017. — Feb. — Vol. 101. — P. 526–536.
12. Recycling versus Long-Term Storage of Nuclear Fuel: Economic Factors / B. Y. Moratilla Soria [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. — 2013. — July. — Vol. 2013. — e417048.
13. ECONOMICS OF NUCLEAR ENERGY PRODUCTION SYSTEMS : REACTORS AND FUEL CYCLE / J. Bouchard [et al.]. —

## Список публикаций автора

[1–10]

## Список литературы

1. Топливный Цикл Легководного Реактора С Полным Использованием Регенерированного Урана / В. А. Невиница [и др.] // Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета Мифи. — 2019. — т. 8, № 6. — с. 498–506.
2. Обогащение Регенерированного Урана в Двойном Каскаде Газовых Центрифуг с Его Максимальным Возвратом в Воспроизводство Топлива / А. Ю. Смирнов [и др.]. — 2018.
3. Applying Enrichment Capacities for Multiple Recycling of LWR Uranium / A. Y. Smirnov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — сент. — т. 1099. — с. 012001.
4. Анализ технико-экономических характеристик двойной каскадной схемы для обогащения многократно рециклированного регенерированного урана / Е. В. Родионова [и др.] // Вопросы Атомной Науки И Техники. Серия: Физика Ядерных Реакторов. — 2019. — № 5. — с. 62–71.
5. A Method to Enrich Reprocessed Uranium with Various Initial Contents of Even-Numbered Isotopes / A. Smirnov [и др.] // AIP Conference Proceedings. — 2019. — 18 апр. — т. 2101, № 1. — с. 020006.

6. Физико-технические проблемы обогащения регенерированного урана при многократном рецикле в легководных реакторах и пути их решения / А. Ю. Смирнов [и др.] // Атомная Энергия. — 2020. — т. 128, № 4. — Publisher: Редакция журнала "Атомная энергия".
7. *Gusev, V. E.* Multy-cascade enrichment schemes for reprocessed uranium recycling / V. E. Gusev // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Dec. — Vol. 1696, no. 1. — P. 012009. — Publisher: IOP Publishing.
8. Proliferation Resistance Analysis of LWR Fuel in Terms of IAEA Safeguards Implementation / V. Gusev [и др.] // AIP Conference Proceedings. — 2019. — апр. — т. 2101, № 1. — с. 020007.
9. Influence of Uncertainties of Isotopic Composition of the Reprocessed Uranium on Effectiveness of Its Enrichment in Gas Centrifuge Cascades / A. Y. Smirnov [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2017. — Jan. — Vol. 781. — P. 012018.
10. Features of Light-Water Reactor Fuel Made of Reprocessed Uranium in Terms of IAEA Safeguards Implementation / V. E. Gusev [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — Nov. — Vol. 1133. — P. 012041.

*Гусев Владислав Евгеньевич*

Каскадные схемы для обогащения регенерированного урана при его  
многократном рецикле в топливных циклах перспективных энергетических  
реакторов

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 13 экз.

Типография \_\_\_\_\_