

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Анализ литературы, патентов и обзор практики</b>	
<b>обогащения регенерированного урана в каскадах</b>	
<b>центрифуг . . . . .</b>	
1.1 Проблема $^{232,234,236}\text{U}$ при обогащении регенерированного урана . .	11
1.2 Задача обогащения регенерированного урана с точки зрения разделительных технологий . . . . .	13
1.3 Промышленный опыт . . . . .	17
1.4 Обзор способов обогащения регенерата урана в каскадах центрифуг . . . . .	18
1.4.1 Каскадные схемы с разбавлением четных изотопов . . . .	19
1.4.2 Схемы с очисткой от $^{232}\text{U}$ . Двойные каскады . . . . .	27
1.5 Выводы из анализа предложенных способов обогащения регенерированного урана . . . . .	37
<b>Глава 2. Основные понятия и определения теории каскадов . . .</b>	
2.1 Основы теории разделения в каскадах . . . . .	38
2.1.1 Понятие разделительной ступени . . . . .	38
2.1.2 Симметричный противоточный каскад и система уравнений, описывающих для него массоперенос в общем виде . . . . .	42
2.1.3 Модель «квазиидеального» каскада . . . . .	47
2.1.4 Каскад с несмешиванием относительных концентраций двух заданных компонентов смеси (R-каскад) . . . . .	49
<b>Глава 3. Ограничения схем на основе ординарных каскадов . . .</b>	
3.1 Постановка задачи для расчетных исследований . . . . .	53
3.2 Результаты и обсуждение . . . . .	55
3.2.1 Схема с разбавлением предварительно обогащенного регенерата природным ураном . . . . .	55

3.2.2	Схема с разбавлением предварительно обогащенного регенерата низкообогащенным ураном . . . . .	58
3.2.3	Анализ схемы с разбавлением предварительно обогащенного природного урана регенератом . . . . .	62
3.2.4	Анализ схемы с разбавлением регенерата природным ураном перед подачей в ординарный трехпоточный каскад	63
3.2.5	Общий вывод для схем возврата регенерата в ЯТЦ на основе ординарного каскада . . . . .	64
3.3	Обоснование необходимости составных схем . . . . .	67
<b>Глава 4. Разработка схем для многократного вовлечения регенерированного урана в топливный цикл . . . . .</b>		
4.1	Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем . . . . .	68
4.2	Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока $P_2$ в цикл . . . . .	92
4.2.1	Расчет топливного цикла, осуществляемого посредством двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока $P_2$ в цикл . . . . .	94
4.2.2	Схема с замыканием для утилизации отходов очистки регенерата урана от четных изотопов в двойном каскаде .	98
4.3	Схема тройного каскада с НОУ-разбавителем и дополнительным разбавителем потока $P_2$ , возвращаемого в цикл	105
4.4	Схема независимой утилизации побочного продукта легкой фракции второго каскада схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем . . . . .	118
<b>Заключение . . . . .</b>		<b>123</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>		<b>125</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>		<b>128</b>

## Введение

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, по мере становления двухкомпонентной ядерно-энергетической системы, неизбежен переходный период, когда 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 отработавшим 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. Лишь только для  $\approx 8$  мегатонн известно, что стоимость получения такого природного урана может быть, конечно, различной но не превысит порога в 260 долл США/кг [4]. 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 [5].

Дополнительным вызовом для ядерной промышленности является обращение с ОЯТ в долгосрочной перспективе. На текущий момент общая масса хранимого ОЯТ составляет более 400 килотонн. С каждым годом эта масса при-

растает примерно на 11 килотонн [6]. 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 отработавшего ядерного топлива является уран, составляющий  $\approx 90-95\%$ , 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 [7]. Вовлечение регенерированного урана отдельного или совместно с плутонием в производство ядерного топлива реакторов на тепловых нейтронах может позволить как сократить объем захоронения радиоактивных отходов, так 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 возможно лишь частичное замыкание топливного цикла, поскольку для их полноценного обеспечения топливом потребуются внешние источники делящихся материалов.

Необходимо также отметить и то, что существуют и 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 изотопом  $^{236}\text{U}$  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 каскадах газовых центрифуг, используемых для обогащения природного урана. Под ординарным каскадом понимают каскад, имеющий три внешних потока – питание, отбор и отвал. Фактически это означает, что обогащение регенерированного урана требует развития собственных способов реализации с учётом необходимости коррекции его изотопного состава таким образом, чтобы удовлетворить требованиям действующих технических условий на товарный низкообогащенный уран.

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.

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 условий 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 расходом максимального количества подлежащего обогащению регенерата при различных исходных концентрациях четных изотопов в нем.

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, 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, позволяющих корректировать изотопный состав регенерата по концентрациям изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  с одновременным расходом полного количества 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 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 решить задачу возврата регенерированного урана в топливный цикл в условиях многократного рециклирования.
5. Разработан обобщенный подход к выбору каскадной схемы для эффективного обогащения регенерированного урана в условиях однократного и многократного рецикла.

6. Разработка методик оптимизации систем каскадов (двойного и тройного каскадов) для обогащения регенерата урана по различным критериям эффективности, таким как:
7. Разработка подхода к утилизации высокоактивного «нештатного» отхода, образующегося в процессе обогащения регенерированного урана в двойном каскаде.
8. Определение физических закономерностей 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 определить 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 позволяют эффективно решать задачу обогащения регенерированного урана 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 для возврата 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.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 136 страниц, включая 42 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

## Глава 1. Анализ литературы, патентов и обзор практики обогащения регенерированного урана в каскадах центрифуг

### 1.1 Проблема $^{232,234,236}\text{U}$ при обогащении регенерированного урана

Регенерированный уран, являющийся основным источником делящихся материалов ОЯТ, может быть обогащен с использованием передового промышленного метода обогащения природного урана – газовой центрифуги – для производства на его основе так называемого регенерированного уранового топлива (РУТ).

Интерес к проблеме вовлечения регенерированного урана в топливный цикл существует уже не одно десятилетие. Первые работы, посвященные этой проблеме, относятся к 1970–1980-х годам [8–14]. Одновременно начали развиваться и подходы к обогащению регенерированного урана. В результате за последние 20 лет предложены различные варианты каскадных схем для обогащения регенерированного урана. Помимо этого, с использованием некоторых из предложенных каскадных схем проведен ряд исследований, направленных на изучение закономерностей многократного рецикла урана в составе РУТ и смешанных видов топлива легководных реакторов, в частности, типа ВВЭР [8; 15–17].

С обогащением регенерата связаны и некоторые сложности, обусловленные появлением в уране в процессе его облучения в реакторе нежелательных искусственных изотопов  $^{232,234,236}\text{U}$ . Эти «четные» изотопы усложняют обогащение регенерата урана, поскольку их содержание в конечном товарном продукте – низкообогащенном уране – строго регламентировано, что требует очистки от них в процессе обогащения.

Наличие строгих ограничений на «четные» изотопы обусловлено их нейтронно-физическими и радиационными свойствами [15; 18; 19].

Для примера приведём изотопные составы регенерированного урана, соответствующего однократному облучению в реакторах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 (таблица 1).

Важно подчеркнуть, что нежелательные изотопы  $^{232,234,236}\text{U}$  не могут быть отделены от целевого  $^{235}\text{U}$  химическим путём. Поэтому единственная возмож-

ВВЭР	Массовое число	232	233	234	235	236
440	C, %	6.62e-7	1.19e-6	3.28e-2	1.43	0.9932
1000	C, %	1.03e-6	1.3e-6	3.91e-2	1.07	1.45

Таблица 1 — Изотопные составы регенерата первого цикла.

ность решения проблемы состоит в коррекции изотопного состава регенерата в процессе его обогащения до нужного содержания  $^{235}\text{U}$ .

Кратко проанализируем нежелательные свойства изотопов  $^{232,234,236}\text{U}$ . Изотоп  $^{232}\text{U}$  является родоначальником длинной цепочки распадов, в которую входят нуклиды-излучатели жёстких гамма-квантов. Основным дочерним источником интенсивного гамма-излучения (2,6 МэВ) является короткоживущий  $^{208}\text{Tl}$  ( $t_{1/2} = 3,65$  мин.) [20; 21]. Гамма активность облученного урана достигает своего пикового значения через  $\approx 10$  лет после извлечения отработавшей тепло-выделяющей сборки (ОТВС) из активной зоны реактора [22].

Изотоп  $^{234}\text{U}$  является активным  $\alpha$ -источником, который присутствует и в уране природного происхождения. Однако в регенерированном уране его содержание оказывается выше, чем в природной смеси [20]. При этом,  $^{234}\text{U}$ , лишь частично выгорает в ходе облучения на протяжении реакторной кампании [22]. Поэтому действующие технические условия ограничивают содержанием данного изотопа во избежании осложнения радиационной обстановки при обращении с низкообогащенным ураном, в первую очередь, на заводах по изготовлению ядерного топлива.

$^{236}\text{U}$ , являясь паразитным поглотителем тепловых нейтронов, препятствует развитию цепной ядерной реакции, тем самым ухудшая нейтронно-физические свойства ядерного топлива. Кроме того, после захвата нейтрона изотопом  $^{236}\text{U}$  конечным продуктом цепочки его распада является изотоп  $^{232}\text{U}$  [23]. Этот фактор способствует росту концентрации  $^{232}\text{U}$  при многократном рецикле урана. Эффект отравления реактора, заключающийся в снижении его реактивности из-за захвата нейтронов изотопом  $^{236}\text{U}$ , должен быть скомпенсирован дополнительным количеством делящегося  $^{235}\text{U}$  в топливе. Для обеспечения требуемого эквивалента уровня обогащения по  $^{235}\text{U}$ , к заданной концентрации  $^{235}\text{U}$  в продукте для случая обогащения природного урана необходимо обеспечить добавку делящегося  $^{235}\text{U}$ . Ее величина определяется концентрацией  $^{236}\text{U}$ :

$C_{235}^P = C_{235}^P + \Delta C_{235}$ , где  $\Delta C_{235}$  соответствует некоторой функции. В простейшем случае компенсирующую добавку рассчитывают как линейную функции от концентрации  $^{236}\text{U}$ :  $f(C_{236}^P) = K_{236} \times C_{236}^P$ , где  $K_{236}$  – это коэффициент компенсации реактивности. Его значение в зависимости от нейтронных характеристик топливной кампании может лежать в пределах 0,2–0,6 [24; 25].

Отметим также, что  $^{234}\text{U}$  имеет тенденцию захватывать нейтрон и превращаться в делящийся  $^{235}\text{U}$ , что должно уменьшить необходимую компенсацию  $^{236}\text{U}$  [26]. Однако во многих расчетных исследованиях этот фактор не учитывается ввиду его слабого влияния.

## 1.2 Задача обогащения регенерированного урана с точки зрения разделительных технологий

Специфика задачи обогащения регенерированного урана заключается в том, что она представляет собой более сложную разделительную проблему, чем, обогащение природного урана. Это обусловлено тем, что, регенерированный уран нельзя рассматривать как квазибинарную изотопную смесь, что усложняет процесс разделения. Кроме того, помимо обогащения целевого изотопа –  $^{235}\text{U}$ , при решении этой задачи необходимо одновременно выполнить ограничения на еще три изотопа –  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ .

В этой связи, начиная с 1980-х годов появляются публикации и патенты, направленные на поиск эффективного решения задачи обогащения регенерированного урана [8; 9; 27–30]. Однако для многих из них теоретическое обоснование проводили, опираясь на относительно "чистый" состав регенерата, соответствующий ОЯТ реакторов ВВЭР-440 или РБМК. С развитием новых поколений реакторов и изменением характерных для них глубин выгорания и уровней обогащения используемого топлива многие из предложенных на текущий момент способов не могут эффективно решить рассматриваемую задачу. Другим немаловажным фактором является то, что в большинстве предложенных способов обогащения регенерата подразумевали, что обогащать будут только регенерат, полученный из облученного топлива, которое было изготовлено из природного урана. В настоящий же момент активно изучают вопросы многократного рециклирования урана, когда регенерированное урановое топ-

ливо восстанавливается несколько раз. Суть этого процесса можно пояснить на схеме рисунка 1.1.

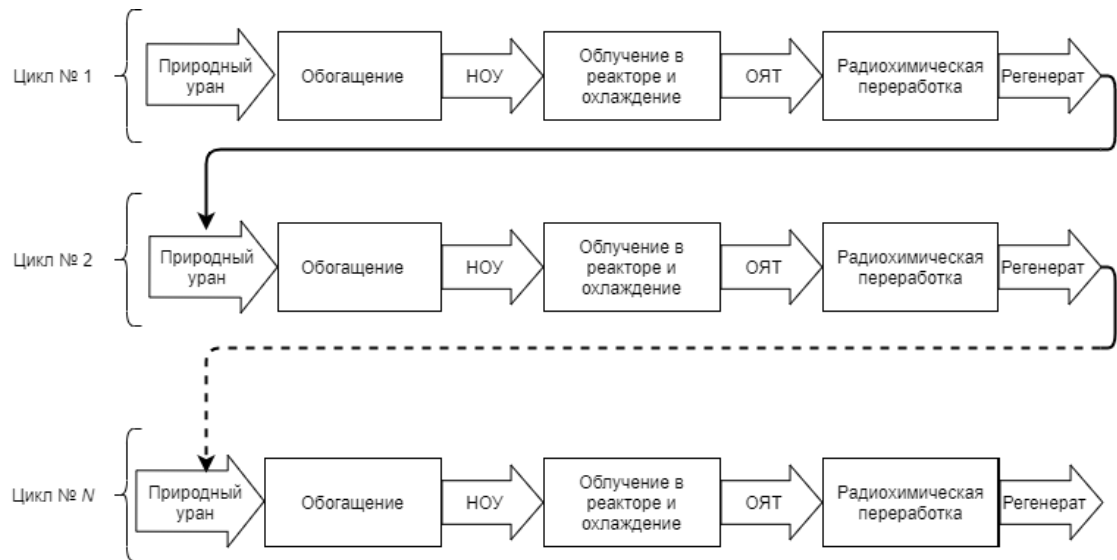


Рисунок 1.1 — Схема многократного рециклирования урана

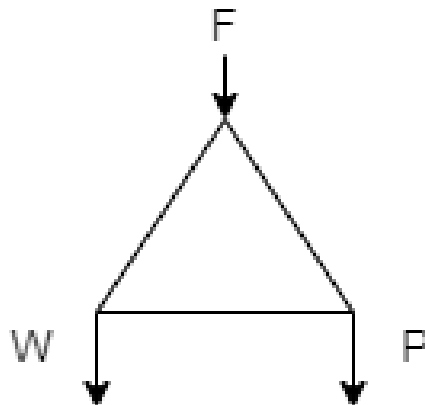


Рисунок 1.2 — Схема ординарного трехпоточного каскада.  $F$  – поток питания;  $P$  – поток отбора;  $W$  – поток отвала.

В соответствии со схемой рис. 1.1 предполагаем, что первичная загрузка реактора осуществлена топливом, изготовленном из обогащенного природного урана. Далее, при обогащении регенерированного урана природный уран используется в качестве материала подпитки, обеспечивающего необходимое количество дополнительного  $^{235}\text{U}$  для изготовления требуемой массы свежего топлива. Далее, процесс рецикла урана с добавлением природного сырья повторяют  $N$  раз. Заметим, что материал подпитки необходим в рассматриваемой принципиальной схеме рецикла, так как в реакторе на тепловых нейтронах не достижимо расширенное воспроизводство ядерного топлива, из-за того, что коэффициент воспроизводства делящегося нуклида  $^{235}\text{U}$  в таком типе реакторов

меньше единицы [31]. При этом важно понимать, что природный уран является наиболее удобным и очевидным материалом для добавления к регенерату при производстве топлива новой загрузке. Тем не менее, вместо природного урана можно использовать и другие доступные урановые смеси, в которых либо очень низкая, либо нулевая концентрация четных изотопов. Например, это может быть НОУ с обогащением 1-1,5

Как следует из анализа результатов исследований, посвященных вопросам многократного рецикла урана в топливе легководных реакторов, в ходе рециклирования происходит рост (до нескольких раз) концентраций четных изотопов в регенерате после облучения в реакторе [15]. При этом ввиду относительной малости концентрации  $^{232}\text{U}$  на первом (или, в некоторых случаях, на первых двух) рециклах не происходит достижения концентрацией этого изотопа предельных значений в финальном продукте [32]. После роста концентраций четных изотопов на первых рециклах, наблюдается их постепенный выход на «плато», начиная с  $\approx 3$ -го рецикла, что обусловлено фиксацией концентрации изотопа  $^{232}\text{U}$  в продукте на уровне  $5 \cdot 10^{-7}\%$ , что доказывает возможность многократного рециклирования облученной урановой топливной составляющей.

Таким образом, при анализе вопросов замыкания топливного цикла реакторов на тепловых нейтронах с использованием регенерированного урана необходимо учитывать такие факторы, как общая тенденция к повышению глубины выгорания в современных реакторах, так и рост концентраций четных изотопов в процессе рециклирования урана. Это факторы делают актуальными разработку каскадных обогатительных схем, позволяющих эффективно использовать регенерированный уран при производстве товарного НОУ с учетом всех описанных выше требований и ограничений, в том числе, в условиях многократного рецикла урана.

Отметим ещё один важный фактор. Очевидно, учитывая, относительно высокую цены переработки ОЯТ наиболее целесообразно максимально вовлекать в повторное использование весь выделенный из него регенерат. Это означает, что если рассматривать отдельный реактор, то логично при получении НОУ из регенерированного урана использовать при его производстве весь выделенный из ОЯТ этого же реактора регенерат. Это будет означать, во-первых, минимизацию потерь  $^{235}\text{U}$  в топливном цикле, во-вторых, максимально эффективное использование потенциала ОЯТ для воспроизводства топлива, а, в-третьих, отсутствие нежелательного накопления регенерата на складах. При

этом следует сделать акцент на том, что подобное условие не является физическим требованием, а скорее призвано повысить эффективность замыкания топливного цикла реакторов на тепловых нейтронах по урановой составляющей. Схематично это условие иллюстрирует рисунок 1.3.

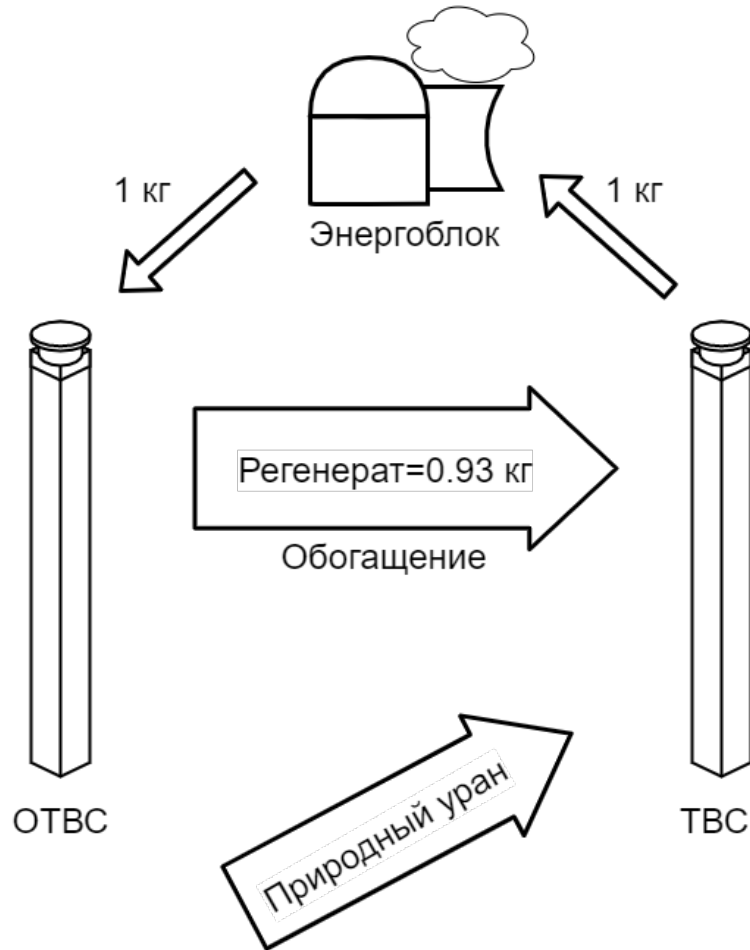


Рисунок 1.3 — Схема замыкания урановой топливной составляющей.

Учитывая сказанное выше, задача обогащения регенерата в общем случае может быть сформулирована как: получение заданной массы товарного НОУ требуемого обогащения по  $^{235}\text{U}$  из сырьевого регенерата урана (в том числе многократно рециклированного) с одновременным выполнением ограничений на концентрации четных изотопов при условии расходования всей массы регенерата, выделенного из ОЯТ данного реактора.

Таким образом, с обогащением регенерата урана в каскадах газовых центрифуг связаны определенные сложности, требующие модификации подходов, принятых на разделительных производствах при обогащении природного урана. Все перечисленные факторы сделали актуальными разработки в области поиска оптимальных каскадных схем для обогащения регенерированного урана с учетом требований, предъявляемых к получаемому продукту – НОУ.



Оптимальность той или иной каскадной схемы зависит от выбранных критериев эффективности. В качестве таких критериев, как правило, используют минимум затрат работы разделения и расхода природного урана для получения единицы товарного НОУ. Эти характеристики в значительной мере определяют величину удельных затрат на получение товарного НОУ.

### 1.3 Промышленный опыт

Возврат урана в топливный цикл по представленной выше схеме опирается на три ключевые технологии:

1. Радиохимическую переработку ОЯТ;
2. Изотопное обогащение регенерированного урана;
3. Изготовление топлива на основе восстановленного отработавшего топлива.

Что касается первого пункта, в странах, лидирующих в развитии ядерных технологий, с середины прошлого века широко используется технология гидрометаллургической переработки облученного топлива, называемая PUREX [33]. В России, технологии связанные с переработкой ОЯТ развиваются особенно успешно благодаря ориентированности отрасли на замыкание ЯТЦ [34; 35]. В виду такого стратегического курса отечественной атомной отрасли, запланирован ввод новых мощностей, которые рассчитаны на переработку принимаемого ОЯТ из-за рубежа [36]. С 2016 г. на «ФГУП ПО «МАЯК» осуществляется переработка партий ОТВС ВВЭР-1000 [37].

Что касается технологии изотопного обогащения урановых смесей, российская атомная промышленность имеет опыт обогащения регенерированного урана из реакторов ВВЭР-440, который затем использовался в качестве топлива РБМК [38]. Для этого используют метод прямого обогащения в трехпоточной каскадной схеме. Такая схема реализована для производства исходного сырья для изготовления топлива РБМК на заводе РТ-1 [39]. Этот вариант также апробирован для изготовления опытных тепловыделяющих сборок (ТВС) для реакторов ВВЭР, требующих более высокого уровня обогащения [18].

Что касается заключительного пункта, Росатом на одном из заводов фабрикации ядерного топлива осуществлял изготовление опытных образцов

тепловыделяющих сборок в том числе на основе зарубежного облученного топлива (из Франции) с повышенным содержанием  $^{232}\text{U}$  [40].

Имеющийся в России опыт рециклирования ядерного топлива базируется на смешении регенератов урана, извлекаемых из ОЯТ ВВЭР и ОЯТ транспортных реакторов с высоким содержанием  $^{235}\text{U}$  [41].

При этом зарубежный опыт базируется на однократном использовании МОХ-топлива [41].

Таким образом, сложившаяся к текущему моменту в России научно-производственная база с наращиваемыми объемами промышленных разделительных мощностей, основанных на центробежном методе разделения, является основным аргументом в пользу готовности к вовлечению регенерата в топливный цикл легководных реакторов.

Однако, для практической реализации долгосрочных планов отрасли по замыканию ЯТЦ и расширению предложения международных топливных поставок, что предусматривает многократное рециклирование делящихся материалов, необходимо решить задачу возврата регенерата в ЯТЦ, подразумевая наличие вышеизложенных ограничений [42; 43].

Для анализа возможности решения задачи рецикла урана в рамках поставленных ограничений с помощью ранее предложенных схем, перейдем к их подробному рассмотрению.

#### **1.4 Обзор способов обогащения регенерата урана в каскадах центрифуг**

Ниже приведены результаты критического анализа основных из предложенных к настоящему моменту каскадных схем, что позволяет охарактеризовать их достоинства и недостатки, и сделать вывод о возможности их использования для решения задачи обогащения регенерата урана в условиях его многократного рецикла в топливе современных реакторов на тепловых нейтронах.

Принимая во внимание сложность сформулированной выше задачи обогащения регенерата по отношению к случаю обогащения природного урана, непосредственное применение штатной схемы обогащения – ординарного или

трехпоточного каскада имеет существенные ограничения и в общем случае поставленную задачу не решает. Главная причина состоит в том, что подобный каскад имеет всего один выходящий поток отбора, в котором, одновременно будут концентрироваться, как целевой  $^{235}\text{U}$ , так и четные изотопы. В результате ординарный каскад позволяет лишь обогащать относительно «чистые» составы регенерата, в которых исходные содержания четных изотопов меньше (на порядок или более), чем их допустимые пределы в товарном НОУ. Однако эти условия, очевидно, невыполнимы при многократном рецикле урана. Проведенный сравнительный анализ предложенных способов обогащения регенерата позволяет условно разделить их на 3 типа: схемы с разбавлением четных изотопов, схемы с отделением четных изотопов, «гибридные» схемы. Ниже проанализированы каскадные схемы каждого из указанных типов. В Приложении представлены результаты тестовых расчётов обогащения регенерата различного исходного состава для большинства рассмотренных ниже схем с целью оценки их эффективности для решения поставленной задачи.

#### 1.4.1 Каскадные схемы с разбавлением четных изотопов

Ряд из предложенных каскадных схем обогащения регенерата в качестве основного фактора, корректирующего изотопный состав регенерата в процессе его обогащения, используют разбавление четных изотопов урановой смесью, которая их не содержит. В качестве таких разбавителей чаще всего рассматривают природный уран, однако это могут быть также обедненный или низкообогащенный уран.

Простейшие схемы с разбавлением основаны на использовании штатного ординарного каскада. Рассмотрим такие схемы, которые могут быть реализованы следующими способами (рис. 1.4) [27; 28]:

1. Смешивание регенерированного урана и природного (или обедненного) урана перед подачей в каскад рис. (рис. 1.4.1).
2. Получение обогащенной фракции из регенерата и последующее ее разбавление природной урановой смесью (рис. 1.4.2).
3. Получение НОУ из природного урана путем его прямого обогащения, с последующим разбавлением регенератом (рис. 1.4.3).

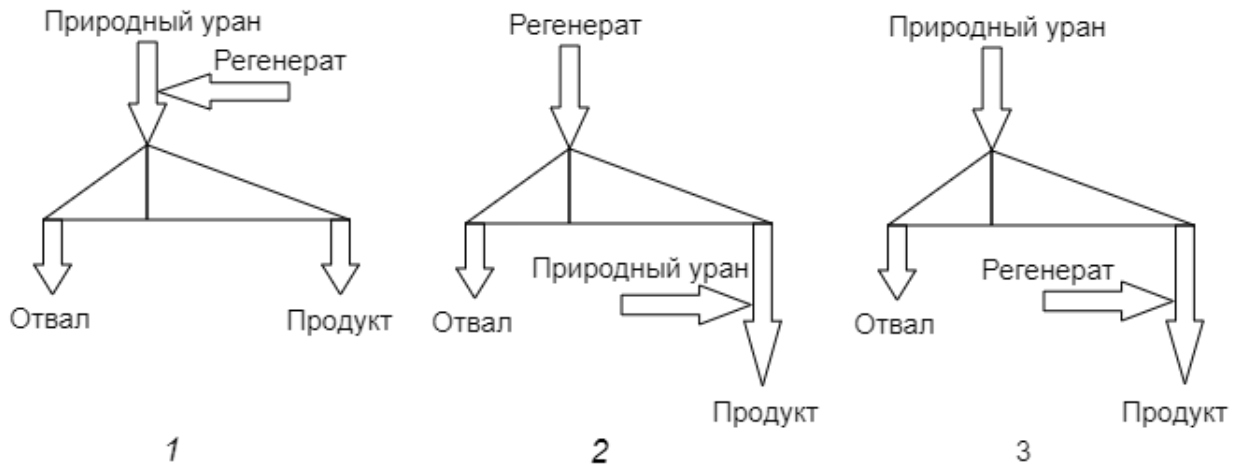


Рисунок 1.4 — Схемы на основе ординарного каскада

Для всех вариантов схем рис. 1.4 соотношение между расходом регенерата и разбавителем природного происхождения определяется пределом допустимой концентрации  $^{232}\text{U}$  в конечном продукте – низкообогащенном уране. Также компенсируется отрицательная реактивность  $^{236}\text{U}$  с помощью добавочной концентрации  $^{235}\text{U}$  к той, что требуется для НОУ-топлива с заданными свойствами.

Основным преимуществом таких схем является простота реализации, поскольку нет необходимости в модификации самого каскада, так как операции разбавления осуществляются за его пределами.

В качестве недостатков таких схем можно выделить:

1. отсутствие возможности очищать регенерированный уран от четных изотопов, так как такие схемы основаны исключительно на разбавлении четных изотопов до допустимых концентраций;
2. потери работы разделения, возникающие из-за смешения потоков с различными изотопными концентрациями  $^{235}\text{U}$ ;
3. невозможность выполнения условия «полного использования регенерированного урана» при многократном рецикле [32] (см. Приложение/-глава 3);
4. выполнение ограничений по концентрации  $^{232}\text{U}$  в продукте напрямую зависит от концентрации указанного изотопа в поступившем в обогащение регенерате;
5. для схем рис. 1.4.1–1.4.2 имеет место загрязнение 100% задействованных в обогащении регенерированного урана разделительных мощностей, что делает проблематичным их дальнейшее «перепрофили-

рование» на обогащение природного урана, по крайней мере в случае длительной (в течение нескольких лет) работы с регенерированным ураном.

Подытоживая рассмотрение простейших разбавляющих схем обогащения регенерата можно отметить, что их использование не позволяет очищать регенерат от чётных изотопов, вся масса которых в значительной мере переносится в отбор каскада, что затрудняет использование таких схем в условиях многократного рецикла, когда концентрации чётных изотопов возрастают. Поэтому такие каскадные схемы потенциально применимы только для обогащения относительно «чистого» состава регенерата, в котором содержание  $^{232}\text{U}$  меньше допустимой нормы на порядок и более, что нехарактерно для изотопных составов выгружаемого из активной зоны современных ВВЭР облученного топлива при многократном рецикле урана [44].

Другие варианты каскадных схем с разбавлением чётных изотопов основаны на использовании так называемых многопоточных каскадов [45]. В отличие от предыдущих вариантов в рассматриваемом случае разбавление регенерата осуществляют непосредственно в каскаде путем подачи одного или нескольких разбавителей в качестве дополнительного питания каскада параллельно с самим регенерированным ураном. Подобное разбавление одним или несколькими разбавителями можно осуществить в каскадах с двумя или тремя внешними питаниями (рисунки 1.5, 1.6).

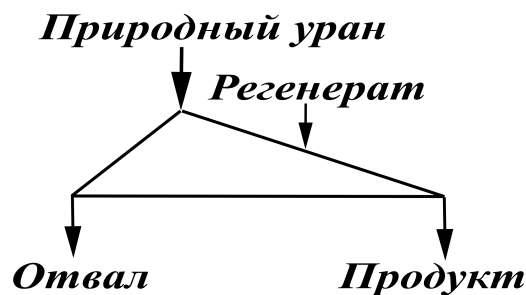


Рисунок 1.5 — Каскад с дополнительным потоком питания

Ключевые отличие от рассмотренных выше схем на основе ординарного каскада в этих случаях состоит в том, что разбавление регенерата происходит

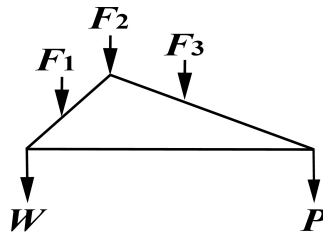


Рисунок 1.6 — Каскад с тремя потоками питания

непосредственно внутри каскада. При этом подача разбавителя(лей) в каскад в виде дополнительных потоков питания преследует цель минимизации потерь работы разделения при смешивании потоков с различным содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$ . Это достигается за счет подачи потоков регенерированного урана и разбавителя в ступени каскада с близкими концентрациями изотопа  $^{235}\text{U}$ . На рисунке 1.5 изображен вариант каскада с двумя питаниями: обогащаемый регенерированный уран, разбавитель – природный уран. Как следует из результатов исследования [15] в условиях многократного рецикла в топливе ВВЭР данная схема не способна обеспечить выполнение условия «полного использования регенерата», начиная со второго или третьего рецикла в зависимости от заданной величины допустимой концентрации  $^{232}\text{U}$  в товарном НОУ ( $2 \cdot 10^{-7}\%$  или  $5 \cdot 10^{-7}\%$ ).

Схема, представленная на рисунке 1.5 является чуть более сложной, но также является разбавляющей. Основное отличие от предыдущего варианта состоит в том, что разбавление регенерированного урана осуществляют с использованием комбинации разбавителей [smirnovObogashchenieRegenerirovannogoU. В одном из вариантов наряду с природным ураном для разбавления в каскад подают обедненный уран. В других случаях, наоборот, природный уран может быть заменен НОУ с обогащением 1,0–2,0% [smirnovObogashchenieRegenerirovannogoUrana2017].

Использование комбинации разбавителей позволяет при заданных требованиях к продукту варьировать ключевые интегральные характеристики схемы: удельный расход природного урана и затраты работы разделения при получении товарного НОУ. Однако как и в случае с другими разбавляющими

каскадными схемами при увеличении исходных концентраций четных изотопов в регенерате эффективность рассматриваемых схем с дополнительными питаниями снижается, а начиная с определенных концентраций  $^{232}\text{U}$  подобные схемы не могут обеспечить условие полного использования регенерата, тем самым не решая сформулированную выше в общем случае задачу обогащения регенерата. Ключевая причина снижения эффективности состоит в том, что данная схема, как и все предыдущие варианты имеет лишь один выводной поток, обогащенный по легким компонентам. В этом потоке неминуемо одновременно с целевым изотопом  $^{235}\text{U}$  концентрируются и все четные изотопы, включая  $^{236}\text{U}$ . Таким образом, комбинирование разбавителей лишь дает возможность варьировать расходные характеристики схемы, но не корректировать изотопный состав получаемого продукта. Невозможность решения задачи обогащения регенерированного урана произвольного состава в разбавляющих каскадных схемах легко проиллюстрировать аналитической оценкой, основанной на условии баланса материальных потоков в каскаде. Как известно, в стационарном режиме работы, в отсутствии потерь или источников рабочего вещества, внешние параметры ординарного каскада подчиняются следующим условиям, выражающим закон сохранения вещества [46]:

$$\begin{aligned} F &= P + W, \\ FC_i^F &= PC_i^P + WC_i^W, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $F$  – поток питания каскада,  $P$  – поток отбора каскада,  $W$  – поток отвала каскада,  $C_i^F$ ,  $C_i^P$ ,  $C_i^W$ , – концентрации  $i$ -го компонента в потоках  $F$ ,  $P$  и  $W$ , соответственно,  $m$  – число компонентов разделяемой смеси.

В случае, если регенерат подают в каскад совместно с разбавителем (например, природным ураном), независимо от способа его подачи в каскад выполняется следующее соотношение, выражающее закон сохранения  $i$ -го компонента смеси:

$$FC_i^F + F_{nat}.C_i^{F_{nat.}} = PC_i^P + WC_i^W, i = 1, 2, \dots, m. \quad (1.2)$$

где  $F_{nat}$  – поток природного урана с концентрациями компонентов, которые равны нулю для изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ . Следует отметить, что



$^{233}\text{U}$  является еще одним искусственным изотопом урана, однако его присутствие не оказывает негативного влияния на характеристики НОУ. Напротив, его свойства близки к  $^{235}\text{U}$ , но в силу малости его содержания (на уровне  $10 \cdot 10^{-8}$ – $10 \cdot 10^{-7}\%$ ), данным фактором можно пренебречь.

Довольно очевидно, что изотоп  $^{232}\text{U}$ , как наиболее легкий в разделяемой смеси, будет наиболее интенсивно обогащаться в отборе каскада и обедняться в его отвале. При этом для стандартных значений концентраций  $^{235}\text{U}$  в отвале каскада (0,1–0,2%) для концентрации  $^{232}\text{U}$  в этом потоке будет справедливо условие (индекс «1» соответствует изотопу  $^{232}\text{U}$ ). Учитывая условие  $W < F$ , из соотношения 1.2 легко получить следующее:

$$C_{232}^P \approx \frac{F}{P} C_{232}^F \quad (1.3)$$

Из соотношения 1.3 следует, что если необходимо выполнить условие «полного использования регенерата» и обеспечить величину  $\frac{F}{P} \approx 0,95$ , что характерно для случая возврата регенерата из ОЯТ реакторов ВВЭР, то величина концентрации может быть только больше соответствующего значения в исходном регенерате. По этой причине с использованием «разбавляющих» схем каскадов возможно обогащение только некоторых составов регенерата, соответствующих малым (до 40 МВт сут/кг) глубинам выгорания топлива и характеризующихся приемлемым исходным содержанием изотопа  $^{232}\text{U}$ .

Однако для современных величин глубины выгорания топлива, концентрация  $^{232}\text{U}$  даже в исходном регенерате может изначально превосходить величину ограничения. Например, это характерно для многократно рециклированного урана. Изменить эту ситуацию невозможно ввиду отсутствия параметров, позволяющих уменьшать относительную концентрацию изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  одновременно с обогащением последнего (и здесь и далее под относительной концентрацией компонентов понимаем отношение их абсолютных массово-долевых концентраций).

Проделанный анализ показывает, что выполнение условия «полного использования регенерата» возможно только, если концентрация  $^{232}\text{U}$  в исходном регенерате не превышает требуемого ограничения на выходе из каскада. Это может оказаться невыполнимым условием для случая многократного рецикла урана в топливе ВВЭР, при котором концентрация  $^{232}\text{U}$  в исходном регенерате, как правило, превышает допустимые ограничения уже начиная со второго



рецикла. Данное обстоятельство фактически делает невозможным использование любого из описанных выше вариантов разбавляющих схем для решения сформулированной выше задачи обогащения регенерата урана в условиях многократного рецикла.

Помимо описанных выше вариантов разбавляющих каскадных схем, предложены и более сложные подходы, позволяющие с оговоркой получить очищенный регенерированный уран. Эффект очистки состоит в том, что в таком способе возможно получить регенерированный уран с концентрацией  $^{235}\text{U}$ , как в исходной смеси, но существенно сниженным содержанием четных изотопов. Пример такой каскадной схемы представлен на рисунке 1.7. Она представляет собой каскад с дополнительным питанием и дополнительным отбором [47]. Основным питанием каскада выступает разбавитель, в предложенном варианте - природный уран. Дополнительным питанием выступает обогащаемый регенерат. В отборе на конце такого каскада получают поток НОУ товарного качества. Поток дополнительного отбора представляет собой «очищенный» от чётных изотопов регенерат. Из полученного в дополнительном отборе полупродукта в дальнейшем может быть наработан товарный НОУ, для чего схему надо будет модифицировать, добавив еще один каскад.

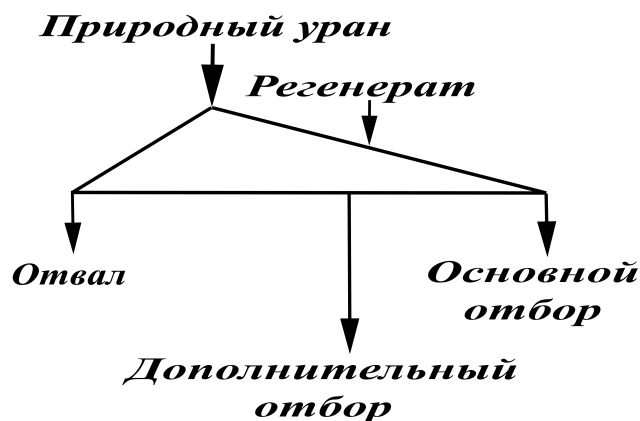


Рисунок 1.7 — Каскад с дополнительным потоком отбора для очистки регенерированного урана от минорных изотопов

По существу своей работы представленная на рисунке 1.7 каскадная схема является модификацией рассмотренной ранее схемы с двумя потоками питания. Отличие заключается в наличии потока дополнительного отбора, в котором получают очищенный регенерат. Однако наличие этого потока накладывает

определенные ограничения на соотношения между потоками природного урана и регенерата, поступающих в каскад. Это обусловлено тем, что заметного снижения содержания минорных изотопов в дополнительном отборе можно добиться лишь при значительном разбавлении регенерата природным сырьем, в соотношениях, лежащих в диапазоне (1-25)/100 [27; 47]. Фактически это означает, что основной эффект «очистки» здесь также обусловлен разбавлением и включением дополнительного отбора на ступени с концентрацией  $^{235}\text{U}$ , близкой к таковой в исходном регенерате. При этом в схеме не происходит фактического отделения  $^{235}\text{U}$  от четных изотопов. Важно также отметить, что в представленных в [47] расчётных примерах эффективность такой схемы проверяли на примере состава регенерата с относительно невысоким содержанием изотопа  $^{232}\text{U}$ . Проведенные в рамках настоящей работы тестовые расчёты на примере обогащения регенерата пятого рецикла показали её неспособность решить в общем случае задачу обогащения регенерата, что затрудняет использование такой схемы для его многократного рецикла (см Приложение 1).

Таким образом, рассматриваемая каскадная схема не может обеспечить решение сформулированной выше задачи обогащения регенерата в условиях многократного рецикла по тем же причинам, по которым подобную задачу не решают и другие «разбавляющие» схемы. Отдельного анализа требует также вопрос использования получаемого в дополнительном отборе очищенного регенерированного урана. В зависимости от входящего состава обогащаемого регенерированного урана данный материал может быть не пригоден для последующего прямого обогащения в ординарном каскаде, что ставит под сомнение целесообразность получения такого материала в принципе. Подытоживая проведенный краткий анализ способов обогащения регенерата, основанных на его разбавлении, отметим их общие достоинства и недостатки.

К достоинствам подобных схем можно отнести следующее:

1. позволяют снижать концентрацию четных изотопов при обогащении регенерата различного исходного состава;
2. относительная простота реализации на основе центробежного метода разделения;
3. в большинстве вариантов реализации «разбавляющие» схемы позволяют осуществить процесс обогащения без превышения допустимых концентраций четных изотопов на отдельных ступенях каскада.

К недостаткам «разбавляющих» схем можно отнести следующее:

1. эффект снижения концентрации четных изотопов в таких схемах связан преимущественно с их разбавлением продуктами, не содержащими четных изотопов (природный уран, обедненный уран, НОУ из природного урана), что делает невозможным решение сформулированной выше задачи обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла урана в топливе современных реакторов на тепловых нейтронах;
2. для большинства вариантов разбавляющих схем происходит загрязнение 100% разделительного оборудования, что может затруднить последующее его использование для обогащения смесей урана, не содержащих изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ .

Описанные выше недостатки «разбавляющих» схем стимулировали развитие иных подходов к обогащению регенерированного урана, которые описаны ниже.

#### 1.4.2 Схемы с очисткой от $^{232}\text{U}$ . Двойные каскады

Простейшим вариантом каскада, реализующим отделение  $^{232}\text{U}$  от  $^{235}\text{U}$  в процессе обогащения регенерата является двойной каскад – последовательное соединение двух каскадов (рис. 1.8).

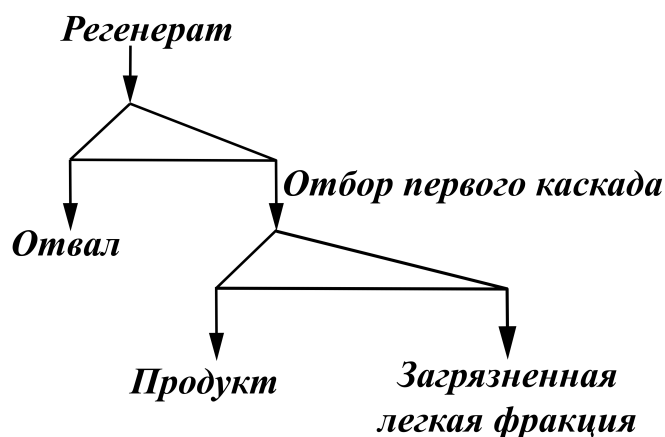


Рисунок 1.8 — Двойной каскад

Подобные каскадные схемы можно условно назвать «очищающими» от чётных изотопов. Идея работы подобных каскадов заключается в том, чтобы сконцентрировать нежелательные четные изотопы отдельно от целевого изотопа –  $^{235}\text{U}$ . В отличие от рассмотренных выше схем с разбавлением четных изотопов в данном случае действительно может быть реализована очистка от них (хотя бы частично).

В простейшем варианте реализации отделение четных изотопов от  $^{235}\text{U}$  может быть осуществлено следующим образом. Сначала, в первом каскаде обогащают изотоп  $^{235}\text{U}$  с одновременным обогащением изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ , затем полученную смесь направляют на вход второго каскада, где она делится на две группы: в первой обогащены легкие изотопы ( $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ ), во второй обедняется  $^{235}\text{U}$  с более интенсивным обеднением  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ . Таким образом, в условном «отвале» второго каскада возможно получить низкообогащенный уран, отвечающий требованиям по концентрациям изотопов  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  с одновременной компенсацией  $^{236}\text{U}$ .

Возможны варианты реализации двойного каскада, в которых изотоп  $^{235}\text{U}$ ) обогащают в потоке тяжелой фракции второго каскада. Например, в одной из модификаций двойного каскада перед отделением «легких» изотопов от  $^{235}\text{U}$  во втором каскаде, на выходе из первого каскада максимально обедняют изотоп  $^{236}\text{U}$  по отношению к изотопам  $^{232}\text{U}$ – $^{235}\text{U}$ . В этом случае во втором каскаде  $^{235}\text{U}$  можно обогащать на «тяжелом» конце каскада с последующим разбавлением материалом, не содержащим четных изотопов, например, обедненным ураном. В результате в получаемом товарном НОУ снижены не только концентрации изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , но и  $^{236}\text{U}$ , что крайне важно в условиях многократного рецикла урана, в котором  $^{236}\text{U}$  во многом определяет динамику накопления изотопа  $^{232}\text{U}$  в ОЯТ [15].

Однако заметного эффекта очистки удастся достичь только при высоких обогащениях по  $^{235}\text{U}$  на выходе из первого каскада (вплоть до 90%). Это оказывается крайне нежелательным с учетом того, что согласно нормативным документам МАГАТЭ урановая смесь с концентрацией  $^{232}\text{U}$  более 20% считается материалом прямого использования [48]. Кроме того, в загрязненной фракции второго каскада концентрации  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  возрастают на несколько порядков по отношению к исходной смеси, тем самым делая затруднительным обращение с подобной фракцией из-за существенного уровня удельной активности.

К основным достоинствам схем на основе двойных каскадов следует отнести:

1. возможность очистки (хотя бы частично) продукта от изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , а не разбавления как в случае с ранее рассмотренными схемами;
2. возможность обеспечить выполнение условия компенсации  $^{236}\text{U}$  в получаемом товарном продукте. Среди основных недостатков схем на основе двойных каскадов можно выделить следующие:
3. получаемый в отборе второго каскада изотопный материал представляет собой «концентрат» изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , что усложняет радиационную обстановку на разделительном производстве;
4. из-за высоких обогащений в схеме возникают потери работы разделения, поскольку высокообогащенный в первом каскаде поток урана приходится обеднять во втором каскаде, а в некоторых случаях ещё и разбавлять обедненным ураном;
5. в наиболее простых модификациях двойные каскады не решают проблему очистки от изотопа  $^{236}\text{U}$ ;
6. в простейшем варианте данная схема не обеспечивает заданной пропорции между исходным регенератом и продуктом, что делает невозможным выполнение условия полного использования регенерата.

Тем самым схема фактически не решает задачу обогащения урана в наиболее общей постановке. Отметим, что ввиду отсутствия в простейших вариантах двойных каскадов других источников  $^{235}\text{U}$ , кроме самого регенерата, для наработки требуемой массы товарного НОУ для фабрикации комплекта ТВС на загрузку реактора, необходимо привлечение НОУ, полученного из других источников. В частности, недостающее количество НОУ может быть получено путем прямого обогащения природного урана до эквивалентной концентрации  $^{235}\text{U}$ .

Помимо описанного выше варианта двойных каскадов предложены и более сложные. Рассмотрим кратко наиболее характерные варианты. В работе [30] предложена модификация двойного каскада, состоящая в том, что для эффективного удаления  $^{232}\text{U}$  из обогащаемой смеси предложено использовать так называемый «газ-носитель» или «буферный газ» – инертное соединение, имеющее массовое число, близкое к молекуле  $^{232}\text{UF}_6$  (рис. 1.9). Процесс удаления  $^{232}\text{U}$  в такой схемы осуществляют следующим образом: первый каскад выделяет  $^{235}\text{U}$  в отборную фракцию, при этом в этом же потоке обогащен и  $^{232}\text{U}$ , а во втором каскаде  $^{232}\text{U}$  вместе с потоком буферного газа концентрируют на «легком»

конце каскада, а товарный продукт (обогащенный изотопом  $^{235}\text{U}$ ) отбирают на его отвальном («тяжелом») конце (рисунок 1.9). «Газ-носитель», примешиваемый к отбору первого каскада перед подачей его во второй каскад увеличивает долю легкой фракции в каскаде и способствует более интенсивному концентрированию  $^{232}\text{U}$  в потоке отбора второго каскада. В результате, это уменьшает концентрацию данного изотопа в потоке тяжелой фракции второго каскада, из которого получают требуемый НОУ. В качестве «газа-носителя» предложено использовать фреон  $\text{C}_8\text{H}_3\text{F}_{13}$ , среднее массовое число для которого практически совпадает с массовым числом компонента  $^{232}\text{UF}_6$ .

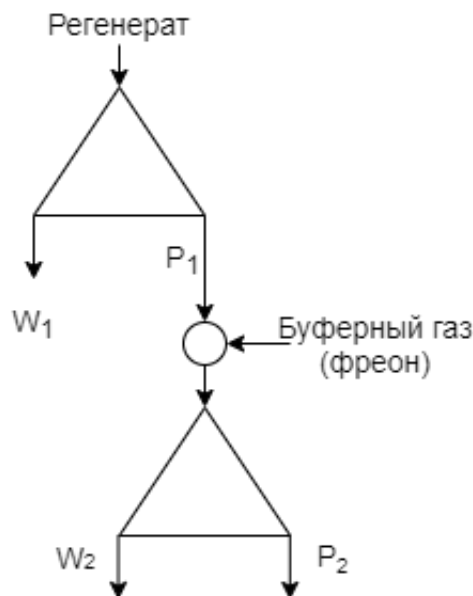


Рисунок 1.9 — Каскад с газом-носителем

Данная каскадная схема имеет схожие достоинства и недостатки с описанным выше вариантом двойного каскада. Характерным отличием схемы с газом-носителем является более высокая степень извлечения  $^{235}\text{U}$  и более высокая степень очистки от  $^{232}\text{U}$ . С другой стороны, рассматриваемая схема имеет и характерные недостатки, которые заключаются в следующем:

1. отделение  $^{232}\text{U}$  от  $^{235}\text{U}$  за счет использования «газа-носителя» провоцирует рост концентрации  $^{236}\text{U}$  в получаемом товарном НОУ. Данное обстоятельство может иметь негативные последствия в условиях многократного рецикла урана в топливе реакторов на тепловых нейтронах. Это связано с тем, что рост концентрации  $^{236}\text{U}$  на каждом рецикле будет способствовать росту концентрации  $^{232}\text{U}$  [15];
2. использование «газа-носителя» на разделительном производстве требует создания отдельной инфраструктуры по обращению с ним, а также

отделению от него товарного гексафторида урана, что может сказаться на величине удельных затрат на получение товарного НОУ;

Рассмотрим некоторые другие модификации двойных каскадов. В работе [49] предложен вариант двойного каскада, состоящего из последовательно соединенных ординарного каскада и каскада с двумя внешними питаниями и дополнительным (промежуточным) потоком отбора (рис. 1.10).

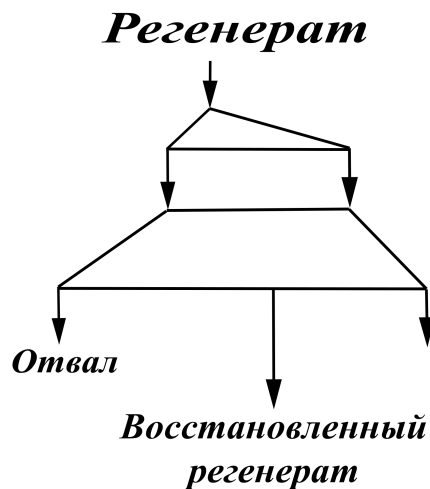


Рисунок 1.10 — Двойной каскад на основе пятипоточного каскада, производящий восстановленный регенерат в промежуточном потоке отбора

).

Как следует из рисунка 1.10 потоки отбора и отвала первого каскада поступают в качестве двух питаний второго каскада. Такая организация потоков между каскадами позволяет добиться разделения исходной смеси на группы, компоненты которых концентрируются в различных частях второго каскада. В итоге на внутренних ступенях оказывается сконцентрирован  $^{235}\text{U}$ , откуда его можно отобрать, используя включенный здесь дополнительный поток отбор. На концевых ступенях происходит отбор обедненного урана в потоке отвала второго каскада, а на другом конце каскада, в потоке лёгкой фракции получают поток, загрязненный изотопами  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ , который фактически является отходом рассматриваемой каскадной схемы. Тем не менее, в отличие от ранее



рассмотренных вариантов двойного каскада в рассматриваемой схеме возможно избежать появления фракции, высокообогащенной по  $^{235}\text{U}$ , что важно с точки зрения вопросов обеспечения ядерного нераспространения. Однако, в соответствии с результатами [49] поток легкой фракции второго каскада имеет обогащение по  $^{235}\text{U}$  на уровне 20,0%, что означает потери изотопа  $^{235}\text{U}$  в этом потоке. При этом обогащение  $^{235}\text{U}$  в потоке отбора первого каскада составляет величины в диапазоне 5,0–10,0%.

Таким образом, в данной схеме удастся снизить потери работы разделения по сравнению с простейшими модификациями двойных каскадов. Однако остальные недостатки двойных каскадов присущи также и данной схеме.

Завершая обзор наиболее характерных вариантов двойных каскадных схем, отметим следующее. Ключевым достоинством двойных каскадов является то, что они позволяют менять соотношения между концентрациями четных изотопов и  $^{235}\text{U}$ . Иными словами в них происходит очистка, а не разбавление регенерата. Это обстоятельство особенно важно при рассмотрении вопросов обогащения регенерата в условиях его многократного рецикла, когда концентрации чётных изотопов урана возрастают от рецикла к рециклу. Однако двойные каскады имеют и ряд общих недостатков, среди которых можно выделить:

- наличие отхода в виде фракции, загрязненной четными изотопами. Выработка стратегии по обращению с этой фракцией требует отдельных исследований. При этом наличие таких загрязненных фракций приводит к необходимости введения дополнительных мер радиационной безопасности на производстве. В результате практическая реализации подобных мер может изменить технологические подходы, принятые на разделительных производствах и, соответственно, повлиять на удельные затраты при производстве товарного НОУ;
- двойные каскады сами по себе принципиально не могут решить задачу «полного использования регенерата», поскольку принципиально производят продукта, в несколько раз меньше, чем требуется. Это обусловлено тем, что они не практически не используют других источников изотопа  $^{235}\text{U}$ , кроме регенерированного урана, содержания  $^{235}\text{U}$  в котором недостаточно для формирования новой загрузки реактора из ОЯТ которого он был выделен. Учитывая выше сказанное, с использованием двойных каскадов возможно обеспечить получение только части ТВС для новой загрузки реактора. Недостающая масса НОУ может быть



получена, например, из природного урана путём его обогащения в ординарном каскаде.

### Гибридные схемы каскадов для обогащения регенерата урана

Учитывая, что двойные каскады в общем случае не могут полностью решить сформулированную выше задачу обогащения регенерата, к настоящему моменту предложены способы обогащения регенерата урана, в которых сочетаются характерные особенности каскадных схем с разбавлением чётных изотопов и двойных каскадов. Ниже кратко проанализированы подобные способы. Одним из вариантов таких гибридных схем является последовательное соединение одиночного каскада с двумя питаниями и ординарного каскада (рис. 1.11) [50]. Подобную схему можно реализовать двумя способами, отличающимися тем, какой из выходящих потоков первого каскада подают на вход второго (рис. 1.5).

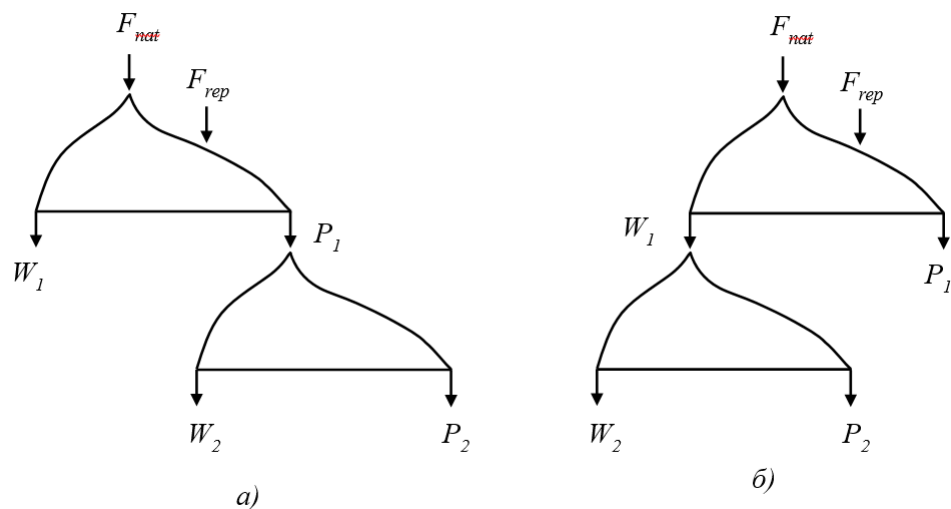


Рисунок 1.11 — Варианты соединения двухкаскадной схемы, состоящей из каскада с двумя потоками питания и ординарного каскада: а) случай подачи отбора первого каскада на питание второго; б) случай подачи отвала второго каскада на питание второго каскада. Обозначения:  $F_{nat}$  — поток природного урана;  $F_{rep}$  — поток регенерата, направленного на обогащение;  $P_1$  — поток «легкой» фракции каскада 1;  $W_1$  — поток «тяжелой» фракции каскада 1;  $P_2$  — поток «легкой» фракции каскада 2;  $W_2$  — поток «тяжелой» фракции каскада 2

В рассматриваемой схеме в первом каскаде получают НОУ промежуточного обогащения, меньшего, чем требуется для получения товарного НОУ. Затем, во втором каскаде данный промежуточный материал обогащают/обедняют в одном из выходящих потоков до уровня концентрации в исходном регенерированном уране, в зависимости от того из какого потока первого каскада был получен промежуточный материал. В результате с помощью схемы на выходных потоках второго каскада производится как обогащенный товарный продукт, так и урановая смесь с концентрацией  $^{235}\text{U}$  на уровне исходного регенерата, но с пониженным содержанием четных изотопов. Ключевым преимуществом данной схемы, в отличие от ранее рассмотренных двухкаскадных схем, является отсутствие на каких-либо ступенях каскада концентрации  $^{235}\text{U}$ , превышающей уровень низкообогащенного урана. Тем не менее, по своей сути схема является, во многом, «разбавляющей», поскольку основной эффект очистки связан с наличием в первом каскаде дополнительного питания, в котором туда поступает природный уран, выступающий в качестве разбавителя. Как показал анализ результатов вычислительных экспериментов, проведенных для данной схемы в рамках настоящей работы (Приложение 1), данная каскадная схема позволяет решить задачу обогащения регенерата в сформулированной выше общей постановке только для случая обогащения состава регенерата с относительно невысоким исходным содержанием чётных изотопов. Это означает, что данную каскадную схему затруднительно использовать для обогащения регенерата в условиях его многократного рецикла.

Ещё одним вариантом гибридной схемы обогащения регенерированного урана можно считать каскадную схему, основанную на очистке регенерата от четных изотопов в одиночном каскаде, имеющем так называемое "расширение" потока [51]. В этом подходе использован принцип выделения изотопов промежуточных массовых чисел из многокомпонентных смесей стабильных изотопов в каскадах с дополнительными потоками отбора [52—54]. Основная идея работы подобной схемы состоит в том, что, подобрав соответствующим образом вид функции распределения потока питания по ступеням каскада, возможно добиться концентрирования целевого промежуточного компонента на внутренних ступенях. Организовав на ступени в области максимума концентрации целевого промежуточного компонента внутри каскада поток дополнительного отбора, возможно получить фракцию с максимальным содержанием этого изотопа при более низких по отношению к нему концентрациях легких изотопов, чем в

отборе на конце каскада. Описываемый эффект продемонстрирован как на примере модельного Q-каскада, так и на примере каскада постоянной ширины [55]. Каскады, имеющие подобную особенность в распределении потока питания по ступеням были названы каскадами с «расширением» потока [53].

Учитывая, что изотоп  $^{235}\text{U}$  является промежуточным по массовому числу в смеси регенерированного урана этот способ можно применить и для концентрирования данного изотопа при обогащении регенерата урана. После чего, перемешав, полученный в промежуточном отборе такого каскада обогащенный регенерат, например, с обедненным ураном можно получить НОУ товарного качества.

Подобная каскадная схема схематично изображена на рисунке 1.12. Принцип работы данной схемы можно описать следующим образом. На вход каскада подают поток регенерированного урана  $E_1$ . Каскад имеет три выходящих потока: поток отвала  $W_1$ , поток дополнительного отбора  $G$  и поток основного отбора  $P_1$ . В потоке дополнительного отбора ( $G$ ) достигается максимальное обогащение по  $^{235}\text{U}$ , которое составляет величину около 90% или выше [51]. В потоке отбора  $P_1$  каскада нарабатывают смесь, высокообогащенную по  $^{234}\text{U}$  (до уровня 80% и выше) и изотопу  $^{232}\text{U}$  (до уровня 10–3%). Концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке  $P_1$  лежит в диапазоне 10–20%. Материал, полученный в потоке  $G$ , далее необходимо перемешать с составом, имеющим низкое содержание  $^{235}\text{U}$ , для получения товарного продукта с одновременным снижением концентраций четных изотопов. В качестве разбавителя удобно использовать обедненный уран (поток  $\text{DepU}$ ). После смешивания потоков  $E_1$  и  $\text{DepU}$  получают состав урана, обладающий необходимой для товарного продукта концентрацией  $^{235}\text{U}$  и удовлетворяющий ограничениям на концентрации четных изотопов. Процесс очистки в данной схеме состоит в отделении легкой группы изотопов ( $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ ) от целевого  $^{235}\text{U}$  при одновременном снижении относительной концентрации  $^{235}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ . Фактически данная схема очищает регенерат в процессе его обогащения одновременно от всех четных изотопов. После чего происходит разбавление обедненным ураном фракции с высоким содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$ , получаемой в потоке дополнительного отбора. В процессе такого разбавления происходит также и окончательная коррекция содержания четных изотопов в получаемой смеси. Как показали представленные в Приложении 1 расчёты, проведенные для подобной каскадной схемы, её эффективность и возможность решения поставленной задачи обогащения регенерированного урана существенно зависят

от состава исходной разделяемой смеси. Данный фактор затрудняет её использование в условиях многократного рецикла урана.

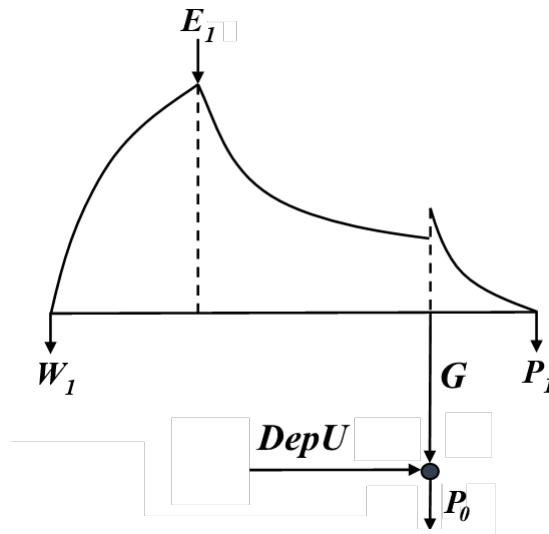


Рисунок 1.12 — Схема каскада концентрирования  $^{235}\text{U}$  в дополнительном отборе и последующим разбавлением обедненного урана для получения товарного НОУ. Обозначения:  $E_1$  — поток регенерата, направленного на обогащение;  $P_1$  — поток «легкой» фракции;  $W_1$  — поток отвала;  $G$  — поток дополнительного отбора;  $\text{DepU}$  — поток обедненного урана;  $P_0$  — поток товарного НОУ

К достоинствам схемы можно отнести следующее:

1. полное отсутствие природного урана в схеме;
2. эффект коррекции изотопного состава достигается не только за счет разбавления, но и за счет снижения относительных концентрации четных изотопов к  $^{235}\text{U}$  (в первую очередь,  $^{236}\text{U}$ ) в самом каскаде.

К недостаткам схемы можно отнести следующее:

1. высокие уровни активности на разделительном производстве ввиду наличия потоков с концентрациями четных изотопов на порядки, превышающими допустимые пределы для низкообогащенного урана и уранового сырья. Возможность работы разделительного производства при уровне концентрации  $^{232}\text{U}$  свыше 10–3% и с фракцией, содержащей практически «чистый»  $^{234}\text{U}$  требует отдельной проработки с точки зрения вопросов радиационной безопасности и проблемы радиоллиза рабочего вещества;
2. данная схема в общем случае не позволяет обеспечить условие «полного использования регенерата».

### 1.5 Выводы из анализа предложенных способов обогащения регенерированного урана

Подводя итог раздела, известные на сегодняшний день технические решения задачи обогащения регенерированного урана с одновременной коррекцией его изотопного состава основаны на:

1. разбавлении регенерированного урана материалами, не содержащими четных изотопов (например, природным ураном, обедненным ураном и т.д.), на входе в разделительный каскад, на выходе из разделительного каскада или внутри каскада при подаче разбавителей в качестве дополнительных внешних питаний каскада;
2. использовании каскадных схем, позволяющих понижать относительные концентрации чётных изотопов по отношению к  $^{235}\text{U}$  (преимущественно двойные каскады и их модификации);
3. комбинировании процессов разбавления регенерата материалами, не содержащими чётных изотопов, и его очистки за счёт выведения нежелательных фракций с относительно высоким содержанием  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  в виде отдельных потоков.

Проведенный теоретический анализ наиболее характерных каскадных схем каждого из типов позволяет сделать вывод о том, что наиболее перспективные варианты решения задачи обогащения регенерата в условиях многократного рецикла могут быть основаны на использовании модификаций «гибридных» каскадных схем, поскольку они одновременно позволяют корректировать как изотопный состав регенерата за счёт его частичной очистки от чётных изотопов, так и массовые расходы за счёт варьирования величин потоков разбавителей. Однако проведенная серия вычислительных экспериментов с целью оценки возможности обогащения регенерированного урана, прошедшего несколько рециклов, показала, что ни одна из описанных выше схем не может быть применена для решения задачи обогащения регенерата в условиях многократного рецикла в наиболее общей постановке. Таким образом, актуальным становится поиск каскадной схемы, позволяющей решить в общем случае задачу обогащения регенерата при различном исходном содержании регенерата в нём.

## Глава 2. Основные понятия и определения теории каскадов

Вычислительные эксперименты, проводимые с целью исследования каскадных разделительных схем, опираются на использование специальных математических моделей, которые будут представлены в текущем разделе.

Важно отметить, что физико-математические модели каскадов основаны на фундаментальных законах, таких как закон сохранения вещества и эти теоретические описания адекватны процессу разделения в реальных каскадах, состоящих из тысяч разделительных аппаратов (в качестве которых сегодня, как правило, используют газовые центрифуги).

Тогда как обогащение природного урана можно свести к простой задаче разделения бинарной изотопной смеси, обогащение регенерированного урана является задачей разделения многокомпонентной смеси. Отсюда, сложность расчетов молекулярно-селективного переноса заключается в необходимости использования математических моделей для разделения многокомпонентных смесей.

### 2.1 Основы теории разделения в каскадах

#### 2.1.1 Понятие разделительной ступени

Ниже рассмотрены общие характеристики разделительных ступеней, предназначенных для разделения многокомпонентных изотопных смесей в газовой фазе. В качестве разделяемой изотопной смеси рассмотрена изотопная смесь, содержащая  $m$  химически не реагирующих между собой компонентов, содержание которых будем определять их мольными долями (концентрациями)  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) [46]. Компоненты пронумерованы в порядке возрастания массовых чисел. Для концентраций компонентов разделяемой смеси справедливо очевидное тождество:

$$\sum_{j=1}^m C_j = 1 \quad (2.1)$$

Как правило, вместо концентраций  $C_i$ , используют относительные концентрации, определяемые по отношению к концентрации так называемого «опорного» компонента с фиксированным номером, например,  $k$ , то есть

$$R_{ik} = \frac{C_i}{C_k}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.2)$$

В качестве «опорного» может быть выбран любой из компонентов смеси, всего имеется таких наборов. Простая разделительная ступень имеет один входной поток и два выходных (рис. 2.1). На вход ступени поступает поток питания (производительность ступени)  $L$  (в моль/с) с концентрациями  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). Из ступени выходят два потока: легкая фракция (поток, обогащенный легкими компонентами) или отбор ступени  $L'$  и тяжелая фракция (поток, обедненный легкими компонентами) или отвал ступени  $L''$ . Концентрации компонентов в этих потоках  $C'_i$  и  $C''_i$  соответственно.

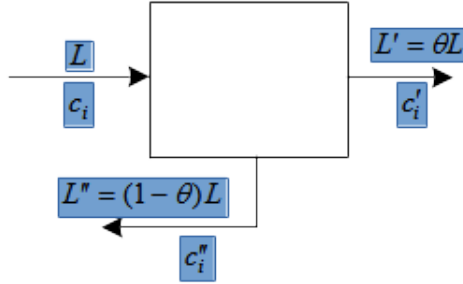


Рисунок 2.1 — Схема разделительной ступени

Коэффициент деления потоков смеси (срез)  $\theta$ , парциальные потоки компонентов  $G_i$ ,  $G'_i$ ,  $G''_i$  и срезы парциальных потоков  $\varphi_i$  можно определить по формулам:

$$\theta = \frac{L'}{L}, G_i = LC_i, G'_i = L'C'_i, G''_i = L''C''_i, \quad (2.3)$$

$$\varphi_i = \frac{G'_i}{G_i}, 1 - \varphi_i = \frac{G''_i}{G_i}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.4)$$

Уравнения баланса ступени в стационарном режиме работы и в отсутствие потерь рабочего вещества имеют вид:

$$L = L' + L'', \quad (2.5)$$

$$G_i = G'_i + G''_i, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.6)$$

Введенное в 2.3 определение среза потоков ступени дает возможность представить уравнения 2.6 в следующем виде:

$$C_i = \theta C'_i + (1 - \theta) C''_i. \quad (2.7)$$

Из 2.5 и 2.6 непосредственно следует:

$$L = \sum_{j=1}^m G_j, \quad L' = \sum_{j=1}^m G'_j, \quad L'' = \sum_{j=1}^m G''_j, \quad (2.8)$$

$$C_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^m G_j}, \quad C'_i = \frac{G'_i}{\sum_{j=1}^m G'_j}, \quad C''_i = \frac{G''_i}{\sum_{j=1}^m G''_j}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.9)$$

$$\theta = \frac{\sum_{j=1}^m G'_j}{\sum_{j=1}^m G_j}. \quad (2.10)$$

Для каждого компонента  $i$  с относительной концентрацией  $R_{ik}$  вводят относительные коэффициенты разделения: полный  $q_{ik}$ , в отборе  $\alpha_{ik}$  и в отвале  $\beta_{ik}$  и соответствующие коэффициенты обогащения  $\varepsilon_{ik}, \varepsilon'_{ik}, \varepsilon''_{ik}$

$$q_{ik} = \frac{R'_{ik}}{R''_{ik}}, \quad \alpha_{ik} = \frac{R'_{ik}}{R_{ik}}, \quad \beta_{ik} = \frac{R_{ik}}{R''_{ik}},$$

$$\begin{aligned} q_{ik} &= \frac{R'_{ik}}{R''_{ik}}, \quad \alpha_{ik} = \frac{R'_{ik}}{R_{ik}}, \quad \beta_{ik} = \frac{R_{ik}}{R''_{ik}} \\ \varepsilon_{ik} &= q_{ik} - 1, \quad \varepsilon'_{ik} = \alpha_{ik} - 1, \quad \varepsilon''_{ik} = 1 - \frac{1}{\beta_{ik}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

При разделении изотопов молекулярно-кинетическими методами величины относительных коэффициентов разделения можно аппроксимировать соотношениями  $q_{ij} = q_0^{M_j - M_i}$ , где  $q_0$  – коэффициент разделения, приходящийся на единицу разности массовых чисел;  $M_i, M_j$  – массовые числа  $i$ -го и  $j$ -го компонентов, соответственно [46].

При фиксированном номере «опорного» компонента (в качестве «опорного» выбран компонент с номером  $k$ ) существует набор из  $(m - 1)$  независимых  $q_{ik}$  (или  $\alpha_{ik}, \beta_{ik}$ ). По определению  $R_{ik}$  имеется  $m$  таких наборов. Однако, каждый из них, например  $q_{ik}$ , может быть преобразован в другой набор, например,  $q_{ij}$  по формулам

$$q_{ij} = q_{ik} \cdot q_{kj}. \quad (2.12)$$



Если  $k \neq m$ , то при всех  $i < k$  значения всех коэффициентов разделения  $q_{ik}$ ,  $\alpha_{ik}$ ,  $\beta_{ik}$ , будут больше единицы, а при всех  $i > k$  – меньше единицы.

Полные коэффициенты разделения  $q_{ik}$ , как правило, не зависят от состава смеси. В некоторых случаях, что характерно для газовой центрифуги, коэффициенты  $q_{ik}$  могут зависеть от коэффициента деления потоков смеси (срез)  $\theta$ . Так, в общем случае, для газовой центрифуги, полный коэффициент разделения зависит также от коэффициента деления потоков смеси (срез)  $\theta$  и от потока питания на один разделительный элемент ступени  $g_s$  (2.13) [56]:

$$q_{ij} = f(\theta, g_s), \quad (2.13)$$

Далее будем рассматривать случай усредненной величины коэффициента разделения. Введем обозначения:

$$g_i = \frac{\varphi_i}{1 - \varphi_i} = \frac{G'_i}{G''_i}, i \neq k, \quad (2.14)$$

$$g_k = \frac{\varphi_k}{1 - \varphi_k} = \frac{G'_k}{G''_k}. \quad (2.15)$$

Нетрудно показать, используя 2.9 и 2.11, что величины  $g_i$  и  $g_k$  связаны с величинами относительных коэффициентов разделения следующими соотношениями:

$$g_i = \frac{\alpha_{ik}(\beta_{ik} - 1)}{\alpha_{ik} - 1}, i \neq k, \quad (2.16)$$

$$g_k = \frac{\beta_{ik} - 1}{(\alpha_{ik} - 1)\beta_{ik}} = \frac{\varepsilon''_{ik}}{\varepsilon'_{ik}}. \quad (2.17)$$

При этом

$$\frac{g_i}{g_k} = q_{ik}. \quad (2.18)$$

С использованием выражений 2.1–2.18 получим следующие соотношения, связывающие параметры отдельной ступени каскада

$$L = \sum_{j=1}^m L_i = \sum_{j=1}^m \frac{g_i + 1}{g_i} L'_i, \quad (2.19)$$

$$C_i = \frac{g_i + 1}{g_i} \frac{L'_i}{L}, \quad (2.20)$$

$$\theta = \frac{L'}{L} = \sum_{j=1}^m L'_j / \sum_{j=1}^m L_j. \quad (2.21)$$

### 2.1.2 Симметричный противоточный каскад и система уравнений, описывающих для него массоперенос в общем виде

Среди различных способов коммутации ступеней в разделительных каскадах наиболее распространенным является так называемый способ симметричного соединения ступеней в противоточной схеме (рис. 2.2). Рассмотрим схему такого каскада, имеющего один входящий поток питания  $F$  и два выходящих: отбор  $P$ , обогащенный самым легким компонентом и отвал  $W$ , обогащенный самым тяжелым компонентом. Потoki  $F$ ,  $P$ ,  $W$  и концентрации компонентов в них  $C_i^F$ ,  $C_i^P$ ,  $C_i^W$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) являются внешними параметрами каскада. Следует заметить, что в случае разделения многокомпонентных смесей понятия «отбор» и «отвал» условны, поскольку ценный компонент может обогащаться как вместе с самым легким компонентом смеси, так и вместе с самым тяжелым.

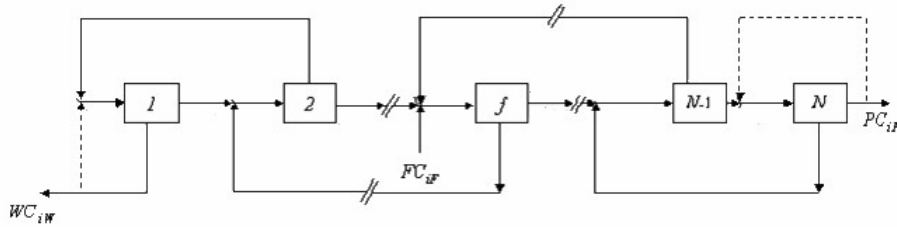


Рисунок 2.2 — Схема соединения ступеней в симметрично-противоточном каскаде

В отсутствие потерь рабочего вещества на ступенях каскада, внешние параметры каскада должны удовлетворять уравнениям материального баланса

$$\begin{aligned} F &= P + W, \\ FC_i^F &= PC_i^P + WC_i^W, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Ступени каскада пронумерованы последовательно от  $s = 1$  на отвальной ступени каскада до  $s = N$  на отборной ступени. Считаем, что внешнее питание

каскада ( $F$ ) подают на вход ступени с номером  $f$ . Внутренние параметры произвольной ступени с номером  $s$  ( $L_s, L'_s, L''_s, G_{i,s}, G'_{i,s}, G''_{i,s}$ ), где  $L$  – потоки вещества, а  $G$  – парциальные потоки (изотопов с индексами  $i$ ) в стационарном режиме работы каскада, в отсутствие потерь рабочего вещества на ступенях каскада, согласно 2.5, 2.6 связаны уравнениями баланса вещества и каждого компонента

$$L_s = L'_s + L''_s, \quad s = 1, \dots, N, \quad (2.23)$$

$$G_{i,s} = G'_{i,s} + G''_{i,s}, \quad s = 1, \dots, N \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.24)$$

где индекс  $i$  означает номер компонента.

Уравнения баланса в «узлах» (точках соединения межступенных потоков) при симметричном соединении ступеней имеют вид:

$$L_s = \theta_{s-1}L_{s-1} + (1 - \theta_{s+1})L_{s+1}, \quad s = 1, 2, \dots, f-1, f+1, \dots, N, \quad (2.25)$$

$$L_s C_{i,s} = \theta_{s-1}L_{s-1}C'_{i,s-1} + (1 - \theta_{s+1})L_{s+1}C''_{i,s+1}, \quad s = 1, 2, \dots, f-1, f+1, \dots, N, \quad i = 1, \quad (2.26)$$

Для ступени подачи питания  $f$  аналогичные уравнения выглядят так:

$$L_f = \theta_{f-1}L_{f-1} + (1 - \theta_{f+1})L_{f+1} + F, \quad (2.27)$$

$$L_f C_{i,f} = \theta_{f-1}L_{f-1}C'_{i,f-1} + (1 - \theta_{f+1})L_{f+1}C''_{i,f+1} + FC_i^F, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2.28)$$

Внешние и внутренние параметры каскада связаны граничными условиями

$$L_0 = L'_0 = L''_0 = L_{N+1} = L'_{N+1} = L''_{N+1} = 0, \quad (2.29)$$

$$L'_N = \theta_N L_N = P, \quad (2.30)$$

$$L''_1 = (1 - \theta_1)L_1 = W, \quad (2.31)$$

$$C'_N = C_i^P, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.32)$$

$$C''_1 = C_i^W, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.33)$$

$$G'_{i,N} = PC_i^P, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.34)$$

$$G''_{i,1} = WC_i^W, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.35)$$

Соотношения (2.22)–(2.35) описывают простейшую физико-математическую модель противоточного симметричного каскада, предназначенного для разделения многокомпонентной смеси. При решении некоторых разделительных задач вместо уравнений (2.25)–(2.28) удобнее пользоваться разностными уравнениями, отражающими баланс потоков в сечениях между ступенями:

для обогатительной части каскада:

$$\theta_s L_s - (1 - \theta_{s+1}) L_{s+1} = P, \quad (2.36)$$

$$\theta_s L_s C'_{i,s} - (1 - \theta_{s+1}) L_{s+1} C''_{i,s+1} = P C_i^P \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.37)$$

для обеднительной части каскада:

$$\theta_s L_s - (1 - \theta_{s+1}) L_{s+1} = -W, \quad (2.38)$$

$$\theta_s L_s C'_{i,s} - (1 - \theta_{s+1}) L_{s+1} C''_{i,s+1} = -W C_i^W \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.39)$$

Величины, стоящие в левых частях уравнений (2.36)–(2.39), как правило, называют «транзитными» потоками смеси в целом (уравнения (2.36) и (2.38)) и ее отдельных компонентов (уравнения (2.37) и (2.39)) [46]. С физической точки зрения указанные уравнения определяют величину количества переносимого вещества в направлении от отвала к отбору. Отметим, что, в случае необходимости, аналогичные уравнения могут быть получены и для переноса вещества в направлении от отбора к отвалу. В свою очередь система (2.36)–(2.39) может быть легко преобразована к виду:

$$C_{i,s+1} - C_{i,s} = \frac{\theta_s L_s}{(1 - \theta_{s+1}) L_{s+1}} \delta'_{i,s} + \delta''_{i,s+1} - \frac{P (C_i^P - C_{i,s})}{(1 - \theta_{s+1}) L_{s+1}}, \quad (2.40)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad s = f, \dots, N,$$

, где  $\delta'_{i,s} = C'_{i,s} - C_{i,s}$  – функция, представляющая собой изменение концентрации  $i$ -го компонента в потоке обогащенной фракции  $s$ -й ступени;  $\delta''_{i,s} = C_{i,s} - C''_{i,s}$  – функция, представляющая собой изменение концентрации  $i$ -го компонента в потоке обедненной фракции  $s$ -й ступени.

Соответственно, система (2.36)–(2.39) может быть представлена в виде

$$C_{i,s+1} - C_{i,s} = \frac{\theta_s L_s}{(1 - \theta_{s+1}) L_{s+1}} \delta'_{i,s} + \delta''_{i,s+1} - \frac{W (C_{i,s} - C_i^W)}{(1 - \theta_{s+1}) L_{s+1}}, \quad (2.41)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad s = 1, 2, \dots, f - 1.$$

Отметим, что системы (2.25)–(2.28), (2.36)–(2.39) и (2.40)–(2.41) эквивалентны. Анализ данных систем показывает, что они обе представляют собой системы нелинейных разностных уравнений относительно функций  $C_{i,s}$ . Существенной проблемой при решении подобных систем является то, что в эти уравнения (либо в их граничные условия) входят значения концентраций, которые неизвестны заранее и должны быть определены из решения этих же уравнений. Аналитическое решение подобных систем удастся найти лишь для некоторых частных случаев (данные случаи рассмотрены ниже) [46]. В общем случае, системы (2.25)–(2.28), (2.36)–(2.39) или (2.40)–(2.41) требуют использования численных методов. При этом, как правило, выделяют 2 типа задач расчета параметров каскада: поверочный расчет и проектировочный расчет.

Под поверочным расчетом каскада подразумевают следующую задачу: Задано: состав исходной разделяемой смеси, число ступеней в каскаде и величины питающих их потоков, величины внешнего потока питания и одного из выходящих потоков каскада (отбора или отвала), параметры ступени (например, относительные коэффициенты разделения ступеней и др.). Подлежат определению: концентрации всех компонентов в потоках отбора и отвала и распределение концентраций компонентов по ступеням каскада. Поверочный расчет каскада необходим при исследовании оптимального управления процессом разделения, при изменении режимов работы и отдельных параметров разделительного каскада [46]. Основные трудности поверочного расчета связаны с тем, что неизвестные концентрации компонентов в потоках отбора и отвала сами явно входят в основные уравнения переноса (или их граничные условия). Невозможность аналитического решения этих уравнений вызывает необходимость разработки численных методов, малочувствительных к заданию начальных приближений для концентраций компонентов в выходящих потоках. На сегодняшний день предложены различные методы поверочного расчета, которые позволяют численно решить данную задачу [46; 57–61].

Под проектировочным расчетом каскада обычно подразумевают следующую задачу [46]. Задано: состав исходной разделяемой смеси, один из выходящих потоков каскада (отбор или отвал), концентрации одного из компонентов (целевого или ключевого) в потоках отбора и отвала. Подлежат определению: все внутренние параметры каскада (распределение потока и концентраций компонентов по ступеням каскада и др.), концентрации остальных

компонентов (всех кроме ключевого) в потоках отбора и отвала. При этом, очевидно, что найденные параметры каскада должны соответствовать оптимальным условиям разделения в каскаде.

Трудности решения (2.25)–(2.28), (2.36)–(2.39) и (2.40)–(2.41) в общем случае, стимулировали развитие упрощенных подходов, которые позволяют получить аналитическое решение для данных систем при введении определенных предположений. Полученные в результате таких упрощений физико-математические модели симметрично-противоточного каскада сохраняют закономерности молекулярно-селективного массопереноса, но позволяют заметно упростить соответствующие расчетные процедуры для определения оптимальных параметров каскада. Такие каскады получили название модельных [24; 62–73].

Модельные каскады действуют как физически эквивалентные представления и, как показано в [74], могут быть выведены из «обобщенного модельного каскада», которым является симметрично-противоточный каскад с постоянными по его длине относительными коэффициентами разделения).

Целесообразной областью применения теории модельных каскадов является ее использование при предварительном рассмотрении актуальных проблем современной теории разделения многокомпонентных изотопных смесей в каскадах и смежных с разделительной наукой областей, таких, например, как ядерная энергетика.

Далее рассмотрим подробнее математические модели, нашедшие свое применение в расчетных исследованиях данной диссертации.

Наиболее общая из таких моделей называется «квазиидеальным» каскадом, где предполагается постоянство по всей его длине относительных коэффициентов разделения, а также срезов парциальных потоков компонентов по каскадным ступеням [67]. В настоящее время он используется в двух приближениях: со слабым обогащением, когда  $q-1 \approx 0$  (Q-каскад [64; 75; 76]) и произвольным обогащением, когда  $q-1$  не много меньше единицы (квазиидеальный каскад [77]). Применение модельных каскадов значительно упрощает расчет закономерностей массообмена в каскаде для многокомпонентного разделения. В исследованиях, как правило, когда обогащенный переработанный уран обогащается многопоточными схемами, часто используется модель R-каскада (Matched Abundance Ratio Cascade-MARC [8; 24; 78]). Это частный случай ‘квазиидеального’ каскада. Здесь условие отсутствия смешивания относитель-

ных концентраций при подаче в каждую ступень выполняется для выбранной пары компонентов (например, это могут быть изотопы  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ).

В рамках данной диссертации, для моделирования физического процесса разделения изотопов урановой смеси могут быть использованы частные случаи симметрично-противоточного каскада, например R-каскад. Такой выбор был сделан ввиду того, что основной целью проведения вычислительных экспериментов являлись расчет изотопных составов получаемого в схеме конечного продукта (товарного низкообогащенного урана) и оценка ключевых интегральных параметров каскадных схем (массовые расходы регенерата и обедненного урана, потоки между каскадами, затраты работы разделения и другие), при этом R-каскады характеризуются параметрами, близкими к параметрам каскадов, оптимизированных по величине суммарного потока. Последнее обстоятельство фактически означает минимальность затрат работы разделения в случае обогащения регенерированного урана.

Ниже кратко рассмотрены модельные каскады, для интересующего нас случая произвольного немалого коэффициента разделения на ступенях, когда  $q-1$  не много меньше единицы – «квазиидеальный» каскад и его частный случай R-каскад [72].

### 2.1.3 Модель «квазиидеального» каскада

Рассмотрим случай симметричного противоточного каскада с постоянными по его длине относительными коэффициентами разделения  $q_{ik}$ ,  $\alpha_{ik}$ ,  $\beta_{ik}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $k$  – номер «опорного» компонента). Условие постоянства относительных коэффициентов разделения обеспечивает выполнение условия постоянства величин  $g_i$  и  $\varphi_i$ . Следовательно, соотношения (2.25)–(2.28) приводятся к виду [46]:

$$G'_i(s-1) + \frac{1}{g_i}G'_i(s+1) - \frac{g_i+1}{g_i}G'_i(s) + \delta_{sf}Fc_{iF} = 0, \quad i \neq k, \quad (2.42)$$

$$G'_k(s-1) + \frac{1}{g_k}G'_k(s+1) - \frac{g_k+1}{g_k}G'_k(s) + \delta_{sf}Fc_{kF} = 0, \quad (2.43)$$

где  $s$  – текущий номер ступени, отсчитываемый от «тяжелого» конца каскада к его «легкому» концу  $\delta_{sf} = \begin{cases} 0, & s \neq f \\ 1, & s = f \end{cases}$

Уравнения (2.42)–(2.43) представляют собой линейные разностные уравнения второго порядка относительно неизвестных функций  $G'_i(s)$ . Граничные условия для них имеют вид:

$$\begin{cases} G'_i(0) = G'_i(N+1) = 0, & i = 1, 2, \dots, m \\ G'_i(N) = PC_i^P, & i = 1, 2, \dots, m \\ G'_i(1) = g_i WC_i^W, & i \neq k \\ G''_k(1) = g_k WC_k^W. \end{cases} \quad (2.44)$$

Ступени с номерами  $s = 1$  и  $s = N$  являются крайними ступенями каскада, что делает возможным формально записать  $G'_i(0) = G'_i(N+1) = 0$ .

Решив (2.42) и (2.43), а также используя уравнения баланса (2.22) и граничные условия (2.44), можно получить уравнения связи внешних параметров такого каскада с длинами его секций и параметрами ступени. В итоге:

$$\frac{P}{F} = \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{1 - g_j^{-f}}{1 - g_j^{-N-1}}, \quad s = f, \dots, N, \quad (2.45)$$

$$\frac{W}{F} = \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{g_j^{N+1-f} - 1}{g_j^{N+1} - 1}, \quad s = 1, \dots, f-1, \quad (2.46)$$

$$C_i^P = C_i^F \frac{1 - g_i^{-f}}{1 - g_i^{-N-1}} / \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{1 - g_j^{-f}}{1 - g_j^{-N-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.47)$$

$$C_i^W = C_i^F \frac{g_i^{N+1-f} - 1}{g_i^{N+1} - 1} / \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{g_j^{N+1-f} - 1}{g_j^{N+1} - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.48)$$

Далее, распределение потока  $L(s)$ , концентраций компонентов и коэффициента деления потоков по ступеням каскада можно определить по формулам [46]:

$$L(s) = \sum_{j=1}^m G'_j(s) \frac{1 + g_j}{g_j} = \begin{cases} P \sum_{j=1}^m \frac{g_j+1}{g_j-1} C_j^P (1 - g_j^{s-N-1}), & s = f, \dots, N \\ W \sum_{j=1}^m \frac{g_j+1}{g_j-1} C_j^W (g_j^s - 1), & s = 1, \dots, f-1 \end{cases} \quad (2.49)$$



$$C_i(s) = \frac{1 + g_j}{g_j} \cdot \frac{G_i''(s)}{G_i(s)} = \begin{cases} \frac{C_i^P \frac{g_j}{g_j-1} (1 - g_j^{s-N-1})}{\sum_{j=1}^m \frac{g_j+1}{g_j-1} C_j^P (1 - g_j^{s-N-1})}, & s = f, \dots, N, \\ \frac{C_i^W \frac{g_j}{g_j-1} (g_j^s - 1)}{\sum_{j=1}^m \frac{g_j+1}{g_j-1} C_j^W (g_j^s - 1)}, & s = 1, \dots, f-1, \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\theta(s) = \frac{\sum_{j=1}^m G_j'(s)}{\sum_{j=1}^m G_j(s)} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^m \frac{g_j}{g_j-1} C_j^P (1 - g_j^{s-N-1})}{\sum_{j=1}^m \frac{g_j+1}{g_j-1} C_j^P (1 - g_j^{s-N-1})}, & s = f, \dots, N, \\ \frac{\sum_{j=1}^m \frac{g_j}{g_j-1} C_j^W (g_j^s - 1)}{\sum_{j=1}^m \frac{g_j+1}{g_j-1} C_j^W (g_j^s - 1)}, & s = 1, \dots, f-1. \end{cases} \quad (2.51)$$

Формулу для расчета относительного суммарного потока в каскаде легко получить, суммируя (2.49) по всем ступеням каскада

$$\sum_{s=1}^N \frac{L(s)}{P} = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{g_i + 1}{g_i - 1} \left[ \frac{W}{P} C_i^W(f) + C_i^P (N + 1 - f) \right] \right\}. \quad (2.52)$$

Рассмотренный выше каскад отличается тем, что относительные коэффициенты разделения  $q_{ik}$ ,  $\alpha_{ik}$ ,  $\beta_{ik}$  (и, соответственно, срезы парциальных компонентов  $\varphi_i$ ,  $\varphi_k$  и параметры  $g_i$ ,  $g_k$ ) остаются постоянными по длине каскада. Для таких каскадов в работе [72] был введен термин «квазиидеальный» каскад.

#### 2.1.4 Каскад с несмешиванием относительных концентраций двух заданных компонентов смеси (R-каскад)

Рассмотрим R-каскад, в котором выполняется несмешивание относительных концентраций  $n$ -го и  $k$ -го компонентов смеси. Данная каскадная модель является аналогом используемого в теории разделения бинарных смесей «идеального» каскада, в «узлы» которого входят потоки с одинаковой концентрацией компонентов. R-каскады могут быть построены как в случае «слабого обогащения», так и для немалых обогащений на ступени. Рассмотрим R-каскад в случае немалых обогащений на ступени. Условие несмешения по относительным концентрациям  $n$ -го и  $k$ -го компонентов можно записать в виде:

$$R'_{nk}(s-1) = R_{nk}(s) = R''_{nk}(s+1). \quad (2.53)$$

Вследствие (2.53) коэффициенты  $\alpha_{nk}$  и  $\beta_{nk}$  совпадают для двух соседних ступеней. При постоянных полных коэффициентах разделения равенство:

$$\alpha_{nk} = \beta_{nk} = \sqrt{q_{nk}} \quad (2.54)$$

приводит к каскаду со ступенями симметричными относительно пары компонентов с номерами  $n$  и  $k$ . При этом на всех ступенях каскада  $\alpha_{ik} \neq \beta_{ik}$  ( $i \neq n$ ). Учитывая, сказанное выше, (2.45)–(2.48) могут быть переписаны в виде:

$$\frac{P}{F} = \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{(R_{nk}^W)^{-d_j} - (R_{nk}^F)^{-d_j}}{(R_{nk}^W)^{-d_j} - (R_{nk}^P)^{-d_j}}, \quad (2.55)$$

$$\frac{W}{F} = \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{(R_{nk}^F)^{-d_j} - (R_{nk}^P)^{-d_j}}{(R_{nk}^W)^{-d_j} - (R_{nk}^P)^{-d_j}}, \quad (2.56)$$

$$C_i^P = C_i^F \frac{(R_{nk}^W)^{-d_i} - (R_{nk}^F)^{-d_i}}{(R_{nk}^W)^{-d_i} - (R_{nk}^P)^{-d_i}} / \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{(R_{nk}^W)^{-d_j} - (R_{nk}^F)^{-d_j}}{(R_{nk}^W)^{-d_j} - (R_{nk}^P)^{-d_j}} \quad (2.57)$$

$$C_i^W = C_i^F \frac{(R_{nk}^F)^{-d_i} - (R_{nk}^P)^{-d_i}}{(R_{nk}^W)^{-d_i} - (R_{nk}^P)^{-d_i}} / \sum_{j=1}^m C_j^F \frac{(R_{nk}^F)^{-d_j} - (R_{nk}^P)^{-d_j}}{(R_{nk}^W)^{-d_j} - (R_{nk}^P)^{-d_j}} \quad (2.58)$$

$$d_i = \frac{\ln q_{ik}}{\ln g_n} - 1, \quad (2.59)$$

, где  $R_{nk}^F$ ,  $R_{nk}^W$  и  $R_{nk}^P$  – относительные концентрации целевого компонента в потоках  $F$ ,  $W$ , и  $P$ , соответственно.

Для молекулярно-кинетических методов разделения соотношения (2.16)–(2.17) можно записать в следующем виде:

$$g_k = q_0^{-\frac{M_k - M_n}{2}}, \quad (2.60)$$

$$g_i = q_0^{M^* - M_i}, \quad (2.61)$$

, где  $M^* = \frac{M_n + M_k}{2}$ .

Из (2.60)–(2.61) непосредственно следует, что для всех компонентов с  $M_i < M^*$  величины  $g_i > 1$ , если же  $M_i > M^*$ , то  $g_i < 1$ . Из соотношений (2.57) и (2.58) при выполнении условий  $N - f + 1 \gg 1$ ,  $f - 1 \gg 1$  («длинный каскад») следует, что в таком R-каскаде компоненты с  $g_i > 1$  ( $M_i < M^*$  обогащаются к «легкому» выходящему потоку каскада, а компоненты с  $g_i < 1$  ( $M_i > M^*$  обогащаются

к «тяжелому» выходящему потоку каскада. Следовательно, величина параметра  $M^*$  полностью определяет направление обогащения компонентов смеси в R-каскаде.

Суммарный поток R-каскада равен [46]:

$$\sum_{s=1}^N L(s) = \sum_{j=1}^m \frac{PC_j^P \ln R_{nk}^P + WC_j^W \ln R_{nk}^W - FC_j^F \ln R_{nk}^F}{\frac{g_j-1}{g_j+1} \ln g_n}. \quad (2.62)$$

Среди свойств, присущих модели R-каскада особо следует выделить следующие:

1. В случае  $m = 2$  условие несмещения (2.53) сводится к известному условию несмещения абсолютных концентраций, которое справедливо для «идеального» каскада;
2. Как показано в работе [79], суммарный поток R-каскада при заданных величинах концентраций целевого компонента в потоках отбора  $C_n^P$  и отвала  $C_n^W$  минимален, при условии соответствующего выбора номера опорного компонента. Остановимся подробнее на этом свойстве. Фактически выбор опорного компонента определяет величину  $M^*$ . При этом, строго говоря, величина  $M^*$  для любой  $m$ -компонентной смеси является дискретной функцией номера опорного компонента и, соответственно, имеет ограниченный набор допустимых значений, определяемых возможным количеством «опорных» компонентов смеси. В [73] предложено формально ввести в рассмотрение «виртуальные» компоненты с исчезающе малой концентрацией (на несколько порядков меньше наименьшей концентрации «реальных» компонентов смеси) и с массовыми числами, лежащими в пределах от  $M_1$  до  $M_m$ . В этом случае значение  $M^*$  может принимать любые значения в интервале от  $M_1$  до  $M_m$ . Это позволяет построить кривую зависимости суммарного потока в каскаде от величины  $M^*$  и найти ее минимум.

Тем самым, данный подход позволяет из бесконечного множества набора параметров R-каскадов, обеспечивающих получение заданных концентраций целевого компонента в выходящих потоках, выбрать параметры такого R-каскада, который отвечает минимуму величины суммарного потока [73]. При этом полученные параметры такого R-каскада будут незначительно (менее, чем на 1%) отличаться от параметров оптимального по величине суммарного потока

каскада (при заданных концентрациях целевого компонента в потоках отбора и отвала) [79]. Такой R-каскад можно рассматривать как наилучший или «эталонный».

Приведенные выше свойства каскада с несмешиванием по относительным концентрациям выбранной пары компонентов (R-каскада) делают его очень удобным для численного моделирования процессов молекулярно-селективного массопереноса в каскаде казовых центрифуг для разделения многокомпонентных смесей, таких как регенерированный уран. К тому же основной целью проведения вычислительных экспериментов в диссертационной работе являлся расчет изотопных составов получаемого в схеме конечного продукта (товарного низкообогащенного урана) и оценка ключевых интегральных параметров каскадных схем (массовые расходы регенерата и обедненного урана, потоки между каскадами, затраты работы разделения и другие), выбор был сделан именно в пользу модели R-каскада.

Следует отметить, что как таковые понятия «работа разделения» и «единица работы разделения» (ЕРР) первоначально введены только для двухкомпонентных смесей. Для многокомпонентной смеси и, в том числе, смеси регенерированного урана, понятие работы разделения является условным. Поэтому в приведенных ниже результатах под работой разделения подразумевали условную величину прямо пропорциональную числу газовых центрифуг в каскаде (или суммарному потоку каскада при условии работы центрифуг в идентичных режимах).

## Глава 3. Ограничения схем на основе ординарных каскадов

В текущей главе будут сформулирована постановка задачи возврата регенерированного урана в ядерный топливный цикл.

### 3.1 Постановка задачи для расчетных исследований

Диссертация не затрагивает вопросы, связанные с химической переработкой для получения восстановленной урановой изотопной смеси, а также прочие вопросы радиохимической технологии, а исследует исключительно физические явления массопереноса в каскадах газовых центрифуг с целью решения проблемы повторного обогащения урановой смеси, восстановленной из облученного топлива легководных реакторов, для ее многократного использования в производстве кондиционного низкообогащенного урана.

Начнем с конкретизации заданных условий к возврату регенерата для постановки численного эксперимента:

1. регенерированный уран получен из ОЯТ легководного энергетического реактора. В качестве примера будем рассматривать изотопный состав характерный для регенерата из реактора российского дизайна – ВВЭР 1000/1200. Для моделирования многократного рецикла будут использованы исходные питающие изотопные составы, характерные регенерату второго и пятого рециклов легководного реактора, представленные в таблице 2, рассчитанные на основе аттестованных нейтронно-физических кодов в ряде совместных работ НИЯУ МИФИ и НИЦ Курчатовский институт [80; 81]. Моделирование серии рециклов на основе изотопных составов, характерных отдельным стадиям многократного рецикла, оправдано ввиду того, что в различных схемах диапазон изменений концентраций составлял незначительную величину [15].
2. коэффициент разделения характерен центрифуге российского дизайна и равен 1.2 для  $^{235}\text{UF}_6$  к  $^{238}\text{UF}_6$  [15].
- 3.

4. Требуемая концентрация в конечном продукте составляет 4.95%, значение характерно для легководных реакторов [82].
5. Расход регенерированного урана на единицу конечного продукта в виде низкообогащенного урана: 0,93 кг на 1 кг НОУ [32].
6. Концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке отвала по умолчанию задается равной 0.1% [15];
7. Соотношение  $^{234}\text{U}$  к  $^{235}\text{U}$  не должно превышать 0.02.
8. Коэффициент компенсации реактивности равен 0.29 и также соответствует легководным реакторам российского дизайна [32].
9. Концентрация  $^{232}\text{U}$  ограничена величиной  $5 \cdot 10^{-7}\%$ .
10. Для производства заданного количества НОУ нужно израсходовать весь объем поступившего регенерированного урана.

Данный набор условий и входных данных для вычислительного эксперимента будем в дальнейшем считать основной постановкой задачи, отражающей требования к возврату требуемой пропорции регенерата, соответствующей материальному балансу складских запасов сырьевых делящихся материалов, в условиях многократного уранового рецикла.

Для моделирования процесса обогащения регенерированного урана в качестве расчетной модели использовали R-каскад [46], для которого выполнено условие несмешивания по относительным концентрациям компонентов  $^{235}\text{U}/^{236}\text{U}$ .

Цикл №	Массовое число	232	233	234	235	236
2	C, %	6.62e-7	1.19e-6	3.28e-2	1.43	0.9932
5	C, %	1.03e-6	1.3e-6	3.91e-2	1.07	1.45

Таблица 2 — Изотопные составы регенерата различных циклов.

## 3.2 Результаты и обсуждение

С помощью приведенной выше постановки задачи была произведена проверка соответствия схем обогащения, основанных на ординарном каскаде, возможности решения задачи многократного рецикла.

### 3.2.1 Схема с разбавлением предварительно обогащенного регенерата природным ураном

Рассмотрим каскадную схему, когда регенерат второго рецикла обогащается до уровня, превышающего требуемую концентрацию  $^{235}\text{U}$ , а затем разбавляется природным ураном (рис. 3.1). Такая схема позволяет снизить накопление четных изотопов в регенерате урана за счет разбавления четных изотопов  $^{232,234,236}\text{U}$  природным ураном, не содержащим минорных изотопов  $^{232,236}\text{U}$ . С помощью этого удастся добиться требуемого условием задачи содержания изотопа  $^{235}\text{U}$  в финальном продукте-низкообогащенном уране, а также добиваясь выполнения ограничения на  $^{232}\text{U}$ .

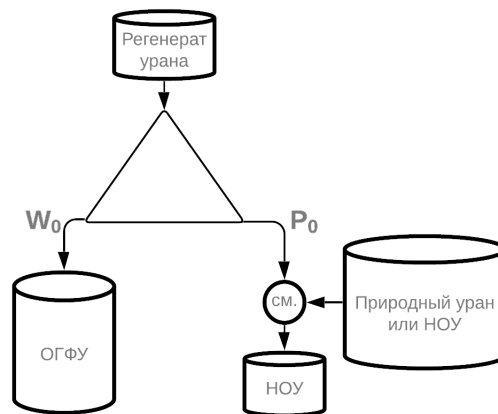


Рисунок 3.1 — Схема разбавления предварительно обогащенного регенерата природным ураном или низкообогащенным ураном. Обозначения:  $P_0$  – поток отбора легкой фракции каскада;  $W_0$  – поток отвального ОГФУ тяжелого конца каскада;  $СМ.$  – узел смешения, на выходе из которого получается конечный продукт – низкообогащенный уран

Тогда как получаемая смесь должна одновременно соответствовать требуемой величине обогащения по  $^{235}\text{U}$ , отвечать ограничению по  $^{232}\text{U}$  и удовлетворять условию компенсации  $^{236}\text{U}$ , то есть должны выполняться ограничения на 3 величины, связанные с этими концентрациями. При этом управляющих параметров в такой схеме, представляющей из себя систему двух уравнений с невязками  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  3.1-3.2 только два:

1. выходная концентрация  $^{235}\text{U}$  обогащаемого регенерата;
2. соотношение смешиваемых потоков  $P_0$  и природного урана.

При этом важно отметить, что хоть выходная концентрация  $^{235}\text{U}$  и является управляющим параметром, ее изменение неминуемо влечет за собой изменение и концентраций  $^{236}\text{U}$  и  $^{232}\text{U}$ , тем самым внося дополнительную неопределенность в решение задачи.

Это значит, что нахождение строго удовлетворяющего всем условиям решения не гарантировано и зависит от исходного состава регенерированного урана, а также условий к производимому в схеме НОУ.

Результаты вычислительных экспериментов с помощью модели R-каскада, сделанных для состава второго рецикла, показали, что для данного состава не удалось найти решение задачи, которое бы одновременно отвечало требованиям на концентрации изотопов  $^{232,234,236}\text{U}$  в конечном НОУ-продукте. Невозможность нахождения подобного решения иллюстрируют кривые представленные на рис. 3.2-3.5.

Они отражают зависимости величин  $\delta_1$  и  $\delta_2$  3.1-3.2 от соотношения смешиваемых потоков, взятых для различных значений концентрации  $^{235}\text{U}$  (рис. ??) в обогащенном регенерате.

$$\delta_1 = [C_{235}^P - (C_n^P + \times C_{236}^P)] , - - \quad (3.1)$$

$$\delta_2 = [C_{232}^P - 5 \times 10^{-7}] \times 10^5. \quad (3.2)$$

По своему физическому смыслу величина  $\delta_1$  представляет собой абсолютное отклонение концентрации изотопа  $^{235}\text{U}$  (выраженное в долях) в окончательном продукте (после смешивания) от требуемой величины, с учетом компенсации  $^{236}\text{U}$ , а величина  $\delta_2$  представляет собой разность фактической концентрации  $^{232}\text{U}$  в окончательном продукте и требуемой величины в соответствии с принятым ограничением. Чтобы сопоставить указанные величины на



одном рисунке,  $\delta_2$  была взята с поправкой (умножена на специально подобранный числовой коэффициент). То есть, величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответствуют невязкам в решении системы нелинейных уравнений, которые, в случае нахождения решения системы будут равняться нулю (величине, не превышающей максимально допустимую погрешность вычислений, которая в численном методе решения задается с помощью специальной системной переменной).

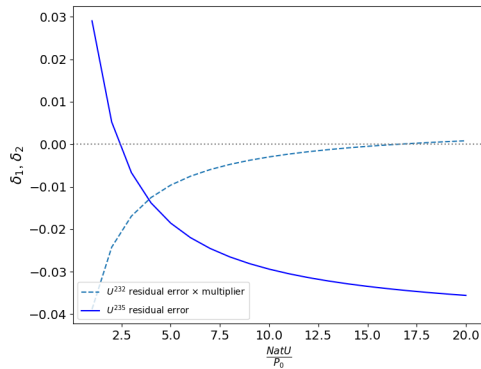


Рисунок 3.2 — Концентрация  $^{235}\text{U}$  в предварительно обогащенном регенерата равна 15%

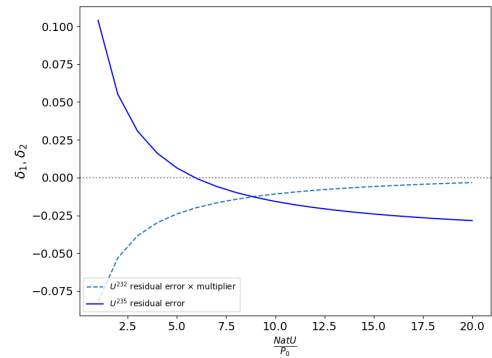


Рисунок 3.3 — Концентрация  $^{235}\text{U}$  в предварительно обогащенном регенерата равна 30%

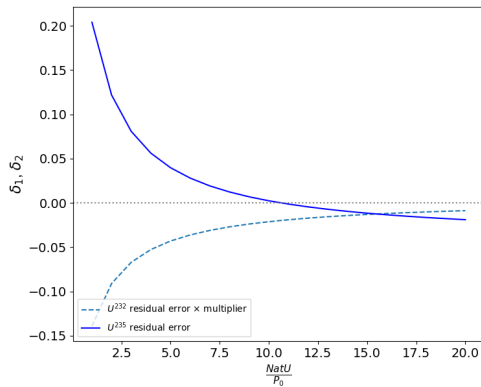


Рисунок 3.4 — Концентрация  $^{235}\text{U}$  в предварительно обогащенном регенерата равна 50%

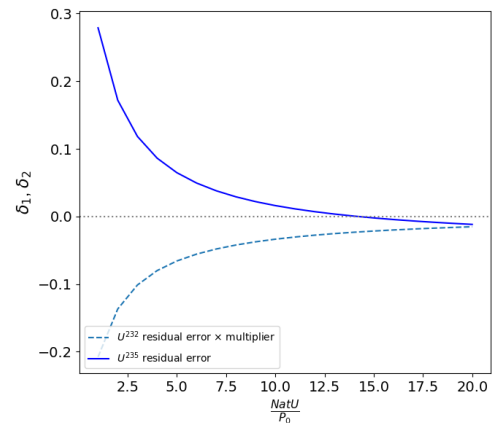


Рисунок 3.5 — Концентрация  $^{235}\text{U}$  в предварительно обогащенном регенерата равна 65%

Для успешного решения СНАУ, определяемой системой двух нелинейных уравнений с невязками  $\delta_1$  и  $\delta_2$  3.1-3.2, обе эти величины должны равняться нулю для одного и того же значения аргумента, чего не удастся достичь для рассмотренного состава, что и отражают рисунки 3.2-3.5.

Таким образом, полученные результаты показывают невозможность применения каскадной схемы с разбавлением обогащенного регенерата природным

(рис. 3.1), когда будут одновременно выполнены условия на  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{U}$ , для решения задачи для данного изотопного состава. Иными словами, из-за принципиальных ограничений схем, основанных на одном ординарном каскаде, невозможно наладить процесс обогащения регенерата для возврата его в ядерный топливный цикл в условиях многократного рецикла на базе схемы, основанной на идее разбавления предварительно обогащенного регенерата изотопной смесью природного урана.

### 3.2.2 Схема с разбавлением предварительно обогащенного регенерата низкообогащенным ураном

Если в схеме, рассмотренной выше (рис. 3.1), заменить разбавитель предварительно обогащенного регенерата (рис. 3.1) с природного урана на низкообогащенный уран, не содержащий четных изотопов (например, изготовленный из природного урана), для данного состава найдется решение, когда одновременно выполнены условия равенства нулю обеих невязок ( $\delta_1$  и  $\delta_2$ ). Нахождение решения для такой схемы обусловлено появлением дополнительного управляющего параметра – концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке -разбавителя.

Чтобы исследовать область допустимых значений для данной схемы, а также определить при каких параметрах схема наиболее эффективна, исследуются диапазоны изменения следующих параметров схемы:  $^{235}\text{U}$  в концах каскада:  $P_0$  и  $W_0$  (рис. 3.1). Это поможет проиллюстрировать как меняются доли природного урана и регенерата в конечном продукте и как меняются затраты работы разделения, за счет изменения длины каскада.

Рис. 3.6 иллюстрирует зависимость расхода природного урана (NatU) на единицу НОУ-продукта (LEU Product) от концентрации  $^{235}\text{U}$  в обогащенном регенерате ( $P_0$  на рис. 3.1) для разных значений концентрации  $^{235}\text{U}$  в отвале каскада, получаемом из регенерата. Значения уровня расхода природного урана на единицу НОУ-продукта на уровне  $\approx 6,5$ - $6,7$  для всего исследуемого диапазона параметров, меньше, чем расход природного урана в схеме ординарного каскада ( $\approx 7,93$  на ед.продукта), когда он используется без добавки из регенерата для производства свежего НОУ топлива, аналогичного по исходным требованиям к продукту. Для значений концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $W_0$  на уровнях 0,05% и 0,15%,

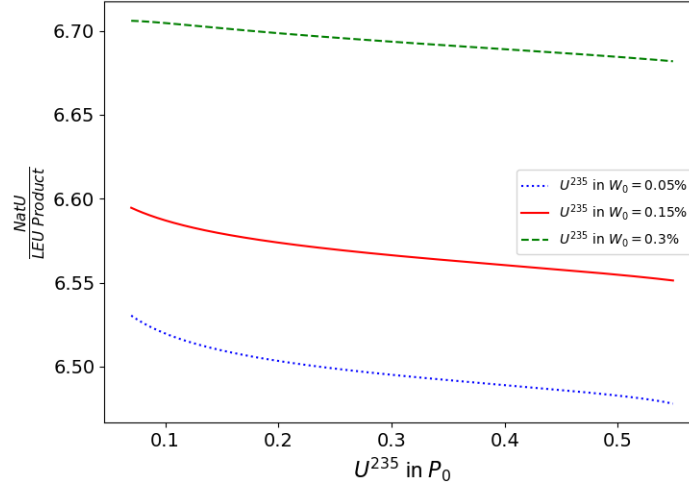


Рисунок 3.6 — Расход природного урана на единицу НОУ-продукта для различных концентраций  $^{235}\text{U}$  в потоках продукта и отвала каскада, обогащающего регенерат

значения расхода природного урана в схеме ординарного каскада для обогащения природного урана, будут составлять  $\approx 7,41$  и  $\approx 8,55$ , соответственно. Таким образом, при заданном интервале параметров, использование схемы с разбавлением обогащенного регенерата позволяет обеспечить экономию природного урана на уровне 15%-28%.

Заметим, что по  $^{235}\text{U}$  регенерат обогащается до значений (рис. 3.6), превышающих пороговое значение для НОУ в 20%, что может быть неприемлемым в виду требований соблюдения условий нераспространения ядерных материалов [83]. Именно эти значения соответствуют наилучшим показателям экономии природного урана, хотя переход 20%-й границы для  $^{235}\text{U}$ , дает прирост экономии природного урана менее 1%. Более существенное улучшение экономии ( $>3\%$ ), как видно на графике 3.6, происходит с ростом уровня извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата при понижении концентрации  $^{235}\text{U}$  в обедняемом потоке регенерата  $W_0$ . Эффект экономии природного урана от понижения  $^{235}\text{U}$  в  $W_0$ , а также от повышения  $^{235}\text{U}$  в  $P_0$ , обусловлен возможностью использовать НОУ-разбавитель с более низким уровнем  $^{235}\text{U}$ , что проиллюстрировано на рис.3.7.

Уменьшение концентрации  $^{235}\text{U}$  в обедняемом потоке регенерата  $W_0$  связано с еще одним преимуществом: более высокий уровень обеднения исходной смеси ( $^{235}\text{U}$  в  $W_0$  при концентрации 0,05%), дает существенный вклад в экономию работы разделения, что показано на рис.3.8, за счет более эффективного извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата, в котором исходно больше доля этого изотопа,

чем в природном уране, из которого нарабатывается НОУ-разбавитель, подмешиваемый к  $P_0$ . Область отрицательных значений потерь работы разделения (SW loss) на рис. 3.8 соответствует величине экономии работы разделения, относительно ординарного каскада, взятой с обратным знаком. Слияние кривых, соответствующих различным концентрациям  $^{235}\text{U}$  в обогащенном регенерате, обусловлено эквивалентностью масс  $^{235}\text{U}$  в каждом из этих потоков, что отражает постоянство вклада обогащенного регенерата в формирование конечного продукта.

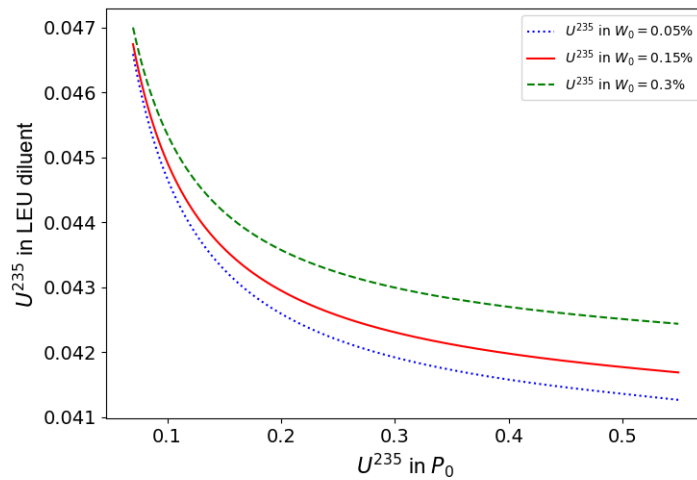


Рисунок 3.7 — Концентрация  $^{235}\text{U}$  в разбавителе, необходимая для получения свежего НОУ для различных концентраций  $^{235}\text{U}$  в потоках продукта и отвала каскада, обогащающего регенерат

Анализ графика 3.9 зависимости расхода регенерата на единицу НОУ-продукта ( $\frac{NatU}{P_0}$ ) от концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $W_0$ , показывает невозможность выполнить условия возврата заданной доли регенерата на единицу продукта при любых параметрах каскадной схемы ( $^{235}\text{U}$  в  $W_0$  и в  $P_0$ ). Причем пропорция используемого регенерата к НОУ-продукту меняется лишь незначительно концентрацией  $^{235}\text{U}$  в  $W_0$ , а удлинение обогащающей части каскада (рост  $^{235}\text{U}$  в  $P_0$ ) не приводит росту вовлечения регенерата.

На основе анализа рис. 3.6-3.9, можно заключить, что схема с разбавлением обогащенного регенерата смесью, не содержащей минорных изотопов, непригодна для решения задачи обогащения в условиях многократного рецикла, так как с помощью нее нет возможности использовать весь регенерированный уран на производство НОУ-продукта, как показано на рис. 3.8.

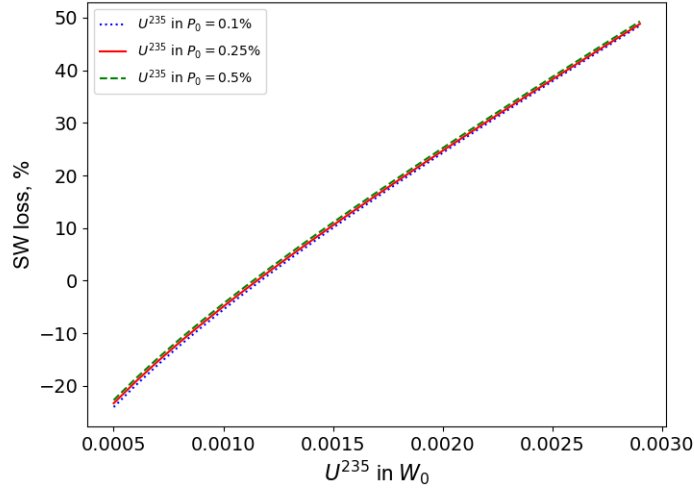


Рисунок 3.8 — Потери работы разделения по отношению к ординарному каскаду для обогащения природного урана для различных концентраций  $^{235}\text{U}$  в потоках продукта и отвала каскада, обогащающего регенерат

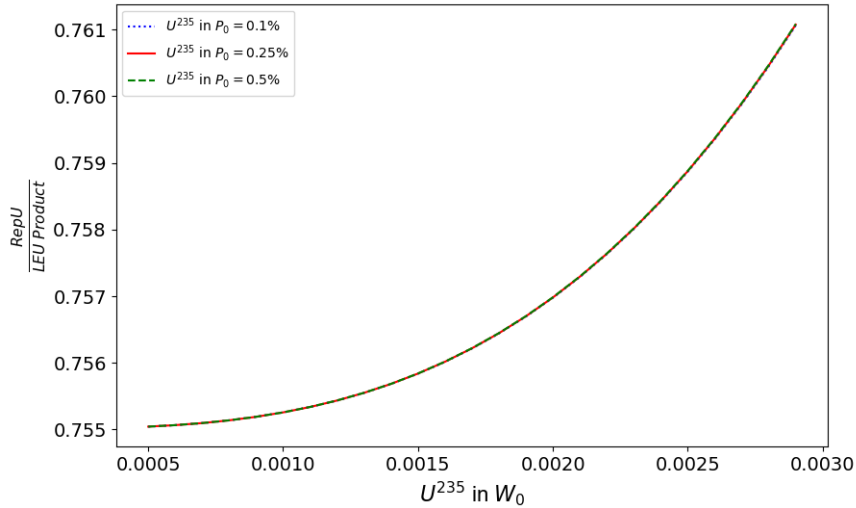


Рисунок 3.9 — Расход регенерата на единицу конечного НОУ-продукта для различных концентраций  $^{235}\text{U}$  в потоках продукта и отвала каскада, обогащающего регенерат

Однако, такую схему можно использовать для решения задачи повторного использования урана для возврата (дообогащения) регенерата на первом рецикле. Поэтому важно исследовать закономерности, характерные для схемы с разбавлением обогащенного регенерата. Анализ рабочих диапазонов для схемы демонстрирует, что уменьшение концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $W_0$  позволяет достичь экономии природного урана на единицу продукта (рис. 3.6), за счет понижения концентрации  $^{235}\text{U}$  в НОУ-разбавителе (рис. 3.7), а также сэкономить работу

разделения (рис. 3.8), при том что расход регенерата на единицу продукта будет меньше на пренебрежимо малую величину (рис. 3.9). Анализ графиков (рис. 3.6 и 3.7) демонстрирует возможность с увеличением уровня обогащения регенерата получить рост экономии природного урана за счет меньшей необходимой концентрации  $^{235}\text{U}$  в НОУ-разбавителе. Однако, следует отметить, что превышение концентрации  $^{235}\text{U}$  уровня НОУ в 20% может быть недопустимо на некоторых разделительных производствах, так как такой материал попадает в категорию высокообогащенного урана (ВОУ), на производство которого наложены ограничения [84].

### 3.2.3 Анализ схемы с разбавлением предварительно обогащенного природного урана регенератом

Перейдем к анализу схемы с разбавлением предварительно обогащенного природного урана регенератом, изображенной на рис. 3.10. Принцип работы такой схемы состоит в том, что предварительно обогащенный природный уран смешивается с возвращаемым в топливный цикл регенерированным ураном. Уровень предварительного обогащения (перед смешением) природного урана и отношение потоков обогащенного природного урана к регенерату определяются исходя из условий задачи. Таким образом, в такой схеме, как и в схеме с разбавлением предварительно обогащенного регенерата природным ураном (рис. 3.1), на одну независимую переменную (степень свободы) меньше, чем условий в задаче, поскольку мы не можем контролировать разбавитель до его смешивания с обогащенной в каскаде смесью. Проанализируем возможность нахождения решения поставленной задачи с помощью этой схемы.

Из результатов вычислительных экспериментов, проведенных для входного состава регенерата второго рецикла, следует, что для рассматриваемой схемы с разбавлением предварительно обогащенного природного урана регенератом, принимая жесткие требования к четным изотопам, возможно получение решения, удовлетворяющего заданным условиям. Однако, как и в случае применения схемы рис. 3.1, не удастся добиться условия возврата заданной пропорции регенерата, так как в найденном решении недостаточен расход регенерата на единицу НОУ-продукта и составляет ( $\approx 0,75$ ). При этом уровень обогащения

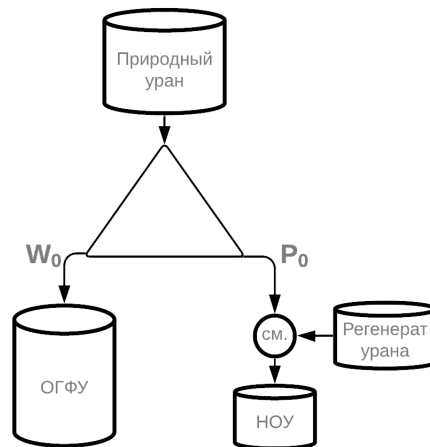


Рисунок 3.10 — Схема каскада с разбавлением предварительно обогащенного природного урана регенератором. Обозначения:  $P_0$  – поток отбора легкой фракции каскада;  $W_0$  – поток отвального ОГФУ тяжелого «конца» каскада; СМ. – узел смешения, на выходе из которого получается конечный НОУ-продукт – низкообогащенный уран

природного урана в каскаде достигает  $\approx 16\%$  при различных значениях концентрации  $^{235}\text{U}$  в отвале этого каскада. Следовательно, как показано на примере изотопного состава регенерированного урана второго рецикла, такая схема обогащения регенерата решает поставленную задачу для произвольного изотопного состава регенерата.

### 3.2.4 Анализ схемы с разбавлением регенерата природным ураном перед подачей в ординарный трехпоточный каскад

Еще одним вариантом реализации простейшей модификации ординарного каскада, используемого для обогащения природного урана, является предварительное смешение природного урана с регенератором перед подачей в каскад. Такая схема изображена на рис. 3.11. Пропорция смешения сырьевых природного и регенерированного урана определяется предварительно исходя из ограничений на четные изотопы в конечном НОУ-продукте.

Как показывает анализ поиска решений схемы с разбавлением регенерата природным ураном перед подачей на питание каскада (рис. 3.11), при использовании состава регенерата второго рецикла, в этом каскаде также невоз-

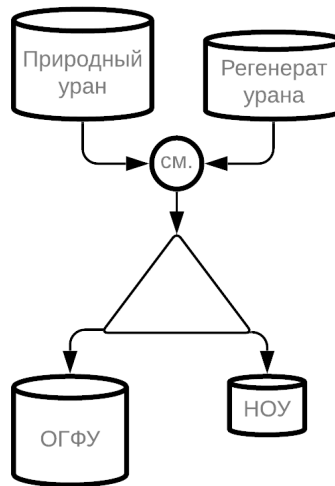


Рисунок 3.11 — Схема каскада со смешением регенерата и природного урана перед подачей на питание ординарного каскада. Обозначения:  $P_0$  – поток отбора легкой фракции каскада;  $W_0$  – поток отвального ОГФУ тяжелого «конца» каскада;  $СМ.$  – узел смешения входящих сырьевых потоков; – конечный НОУ-продукт схемы

можно достижение требуемой пропорции расхода регенерата урана на единицу финального продукта (рис. 3.12). Для каждого рассматриваемого значения концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $W_0$ , имеется единственно возможное решение системы двух нелинейных уравнений, где обе невязки  $\delta_1$  и  $\delta_2$  обращаются в нуль, и в этих решениях, расход регенерата на единицу продукта ( $\frac{RepU}{LEUP_{produce}}$ ) не превышает 80%. Эти решения изображены на пересечения кривых (рис. 3.12) с вертикальными и горизонтальными прямыми для указания на принимаемые ими значения расхода регенерата на единицу продукта ( $\frac{RepU}{LEUP_{produce}}$ ), а также доли регенерированного урана в смеси, питающей каскад ("RepU fraction in feed" на верхней горизонтальной оси).

### 3.2.5 Общий вывод для схем возврата регенерата в ЯТЦ на основе ординарного каскада

Проведенные для схем на основе простейших модификаций ординарного каскада численные эксперименты показали, что такие схемы невозможно ис-



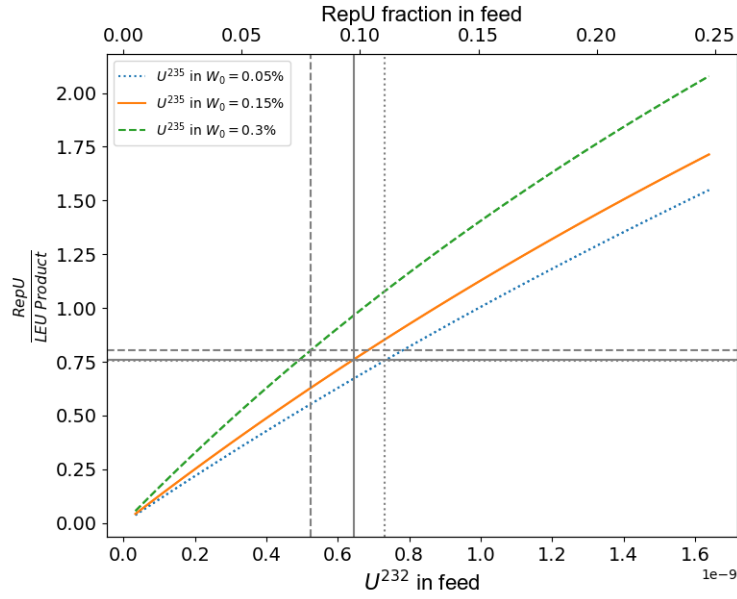


Рисунок 3.12 — Расход регенерированного урана на единицу НОУ-продукта при различной концентрации  $^{232}\text{U}$  в питающем потоке каскада для различных концентраций  $^{235}\text{U}$  в потоке отвала

пользовать для вовлечения всего регенерированного урана в ЯТЦ в условиях многократного рецикла.

При этом закономерно возникает следующий вопрос: возможно ли априорно оценить способность рассматриваемой схемы решить поставленную задачу? Для ответа на этот вопрос приведены следующие оценки.

Из уравнений балансов материальных потоков 2.22 путем предельного перехода получим частный случай балансового уравнения для самого легкого изотопа  $^{232}\text{U}$  3.3. Из этого уравнения следует, что задействование массы регенерата близкой к массе получаемого продукта ( $\approx 0,9-0,95$ ) может быть обеспечено только тогда, когда концентрация  $^{232}\text{U}$  в исходном регенерате ниже, чем ограничение на  $^{232}\text{U}$  в конечном НОУ-продукте.

$$C_{232U}^P \approx \frac{F}{P} C_{232U}^F \quad (3.3)$$

С помощью уравнения 3.3 можно вычислить максимально возможную долю питающего потока, содержащего  $^{232}\text{U}$ , как неизвестную переменную уравнения 3.3. При этом предполагая, что весь исходный  $^{232}\text{U}$  окажется в конечном счете в продукте, так как его относительный коэффициент обогащения является самым высоким для смеси изотопов регенерата в виду того, что  $^{232}\text{U}$  является

самым легким изотопом. На основе состава регенерата второго рецикла получаем 3.4:

$$5 \times 10^{-7}\% \approx \frac{RepU}{P} \times 6.622 \times 10^{-7}\% \Rightarrow \frac{RepU}{P} \approx 0.755 \quad (3.4)$$

Но, так как  $\frac{F}{P} = X$  требуется на уровне  $\approx 0,9-0,95$  для достижения условия, накладываемого учетом за оборотом ядерных материалов, можно сделать вывод, что полностью вернуть регенерат в топливный цикл с помощью схем на основе простейших модификаций ординарного каскада в условиях многократного рецикла невозможно, так как начиная со второго рецикла, концентрация  $^{232}\text{U}$  в регенерате превышает пороговое значение для НОУ  $5 \cdot 10^{-7}\%$ .

В качестве следующей аналитической оценки, вычислим предельный вклад  $^{235}\text{U}$  в НОУ-продукт от используемого регенерата. На этот раз необходимо учитывать концентрацию  $^{235}\text{U}$  и в потоке отвала (ОГФУ), так как некоторое количество этого изотопа попадает в отвал каскада. Из балансных уравнений 2.22 на основе данных концентрации  $^{235}\text{U}$  в составе регенерата второго рецикла, а также полученной выше достижимой пропорции  $\frac{F}{P} \approx 0.755$ , получаем:

$$\frac{\frac{RepU}{P} C_4^{RepU}}{\frac{X}{P} C_4^P} \Rightarrow X \approx 0.28, \text{ where } i = 4 \text{ corresponds to } ^{235}\text{U} \quad (3.5)$$

величину предельного вклад  $^{235}\text{U}$  в НОУ-продукт от регенерата, который будет составлять  $\approx 28\%$ . В реальной задаче, к сожалению, эта величина будет меньше из-за необходимости компенсации  $^{236}\text{U}$ .

Полученные аналитические оценки позволяют оценить возможность применения схем на основе простейших модификаций ординарного каскада, исходя из изотопного состава регенерата. Для рассматриваемого случая такие оценки позволяют априорно заключить, что, поскольку количество  $^{232}\text{U}$  в исходном регенерате второго цикла превышает ограничение в  $5 \cdot 10^{-7}\%$ , невозможно обеспечить возврат регенерированного урана в ЯТЦ в условиях многократного рецикла с помощью простейших модификаций ординарного каскада.

Таким образом, анализ схем на основе базового трехпоточного каскада демонстрирует потребность в модификации разделительного оборудования в контексте многократного рецикла урана, что и составляет цель диссертационной работы.

### 3.3 Обоснование необходимости составных схем

Как следует из вышеприведенных расчетов, на текущий момент имеются способы, позволяющие принципиально решить проблему выполнения требования по четным изотопам урана при обогащении регенерата, и основной проблемой, решаемой в рамках настоящей диссертационной работы, является поиск варианта каскадной схемы, позволяющей одновременно выполнить условия по четным изотопам и задействовать в обогащении весь имеющийся регенерат.

Если анализировать причины невозможности возврата регенерата в производство топлива в многочисленных модификациях каскада для обогащения многократно облученного регенерата, то становится очевидным, что это, во многом, связано с нарастанием относительных концентраций “легких” изотопов (в первую очередь  $^{232}\text{U}$ ) и  $^{235}\text{U}$ , а поскольку данные изотопы концентрируются вместе на легком «конце» каскада, то единственным способом понизить отношение их концентраций – это разбавить материалом, не содержащим  $^{232}\text{U}$ , например на входе в каскад. Как показали результаты, описанных в этой главе вычислительных экспериментов, для составов с достаточно высоким исходным содержанием  $^{232}\text{U}$  невозможно подобрать такой разбавитель, чтобы удовлетворить одновременно и условие полного возврата регенерата в цикл и условия на содержание четных изотопов.

Из приведенного выше анализа вытекает необходимость использовать каскады, предназначенные для отделения друг от друга изотопов легкой фракции:  $^{232,233,234}\text{U}$  и более тяжелой:  $^{235,236,238}\text{U}$ . Такие схемы могут быть основаны на двух связанных каскадах, где в первом каскаде изотоп  $^{235}\text{U}$  обогащается с одновременным увеличением концентрации изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , а во втором каскаде смесь изотопов разделяется на легкую ( $^{232,233,234}\text{U}$ ) и тяжелую фракции ( $^{235,238}\text{U}$ ) (рис. 1.8) [32].

## Глава 4. Разработка схем для многократного вовлечения регенерированного урана в топливный цикл

Далее будут представлены схемы, предложенные в диссертационной работе, позволяющие решить поставленную задачу в условиях многократного рецикла. Такие каскады позволяют добиться заданной цели возврата регенерата в топливный цикл – одновременно выполнить ограничения на концентрации четных изотопов в продукте и обеспечить заданную пропорцию между исходным регенератом и продуктом.

### 4.1 Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем

Развитием идеи двойного каскада является модификация в виде дополнительного использования в качестве разбавителя низкообогащенного урана, полученного из природного урана. Такая схема, представленная на рис. 4.1 была впервые предложена в работе [85]. Принцип работы такой схемы опирается на идею «пространственного» разделения на легкую ( $^{232,233,234}\text{U}$ ) и тяжелую фракции ( $^{235,238}\text{U}$ ), предложенную в двойном каскаде, и заключается в следующем.

В первом каскаде исходный материал обогащается по изотопам  $^{232,233,234,235,236}\text{U}$ , а во втором каскаде смесь делится на две фракции, так, чтобы в тяжелой фракции сконцентрировался продукт с пониженным содержанием  $^{232,233,234}\text{U}$  по отношению к питающей второй каскад смеси. Таким образом, в первом каскаде, на одном из концов, смесь обогащают по легким изотопам (в первую очередь  $^{232,233,234,235}\text{U}$ ) в потоке  $P_1$ .

Концентрацию  $^{235}\text{U}$  можно варьировать, подбирая наилучшее значение заданного критерия оптимизации, и для этого, если значение концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке  $P_2$  ограничено значением 20%, целесообразнее всего оставаться в диапазоне от 5% до 10%.

Верхние границы концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоках отбора зависит от наличия ограничений на производство высокообогащенного урана [83]. При этом нижняя граница концентрации  $^{235}\text{U}$  в отборных потоках обусловлена наличием ограничения на концентрацию  $^{235}\text{U}$  в каскаде. Если значение не должно пре-

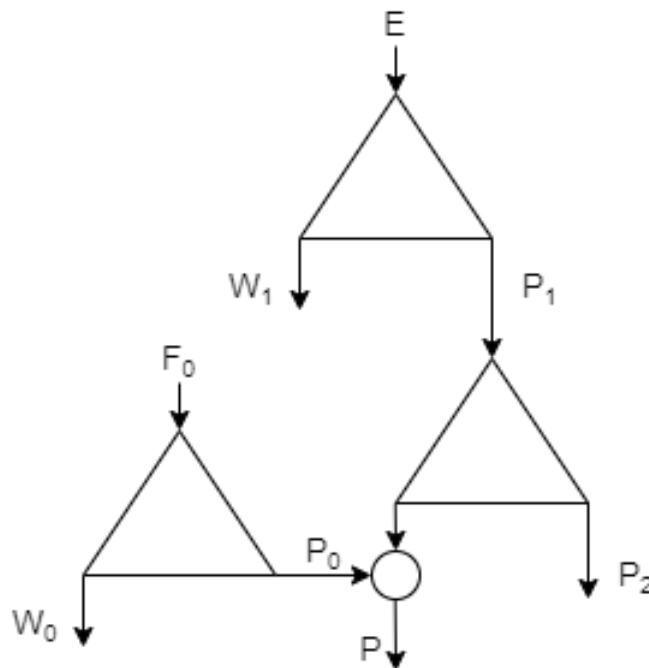


Рисунок 4.1 — Схема модифицированного двойного каскада для обогащения регенерированного урана. Обозначения:  $E$  – поток регенерированного урана;  $P_1$  – поток отбора первого каскада, выступающий питанием второго каскада;  $P_2$  – поток отбора второго каскада;  $W_1$  – поток отвала первого каскада;  $W_2$  – поток тяжелой фракции (условный «отвал») второго каскада;  $P_0$  – поток НОУ-разбавителя;  $P$  – финальный продукт (товарный низкообогащенный уран (НОУ))

вышать 20%, то концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке  $P_1$  должна быть выше требуемой к получению в потоке  $W_2$  второго каскада, где этот поток будет обеднен по  $^{235}\text{U}$  на  $\approx 0.5\%$ . Если такое ограничение отсутствует, концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке  $P_1$  должна быть близка к необходимой концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $W_2$ . В этом случае число ступеней в части каскада, заключенной между потоками  $P_1$  и  $W_2$ , будет в несколько раз меньше, чем в части между потоками  $P_1$  и 2. При таких условиях поток тяжелой фракции  $W_2$  будет близок по величине к потоку питания второго каскада.

В легком конце второго каскада сконцентрируются (будут доведены до более высокой концентрации, чем исходная) как изотопы  $^{232,233,234}\text{U}$ , так и  $^{235}\text{U}$ . Концентрация изотопа  $^{235}\text{U}$  в этом потоке ( $P_2$ ) может достигать значений, близких к 20% и, если есть возможность добиться при этом улучшения целевых критериев производственного процесса, теоретически может быть доведена до 90% при получении соответствующих разрешений. Следующим шагом к полу-

чению конечного НОУ является разбавление потока тяжелой фракции второго каскада  $W_2$  сырьем, не содержащим искусственных изотопов урана для выполнения ограничений по  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ . В этом шаге и заключается отличие этой схемы от схемы двойного каскада.

Таким образом, первые два каскада в данной схеме работают только с регенерированным ураном, позволяя частично отделить  $^{235}\text{U}$  от более легких  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Роль третьего каскада состоит в наработке разбавителя  $P_0$ , необходимого для формирования требуемой массы конечного продукта с одновременным выполнением условий по четным изотопам в этом продукте.

Подмешивание НОУ-разбавителя позволяет добиться требуемых пропорций вовлечения облученного топлива в воспроизводство свежего НОУ-топлива или, иными словами, выполнения условия полного использования регенерата. Для строгого соблюдения такой заранее определенной пропорции, вычисляется и пропорция подмешиваемого НОУ-разбавителя, легко рассчитываемая на основании параметров двойного каскада. Для этого, из известных соотношений в двойном каскаде  $\frac{W_2}{P_1}$  и  $\frac{P_1}{RepU}$ , а также желаемого соотношения  $\frac{RepU}{P}$ , вычисляется пропорция  $W_2$  к конечному продукту  $\frac{W_2}{P}$ , откуда, вычитая ее из единицы, можно получить соотношение дополнительного НОУ-разбавителя к финальному НОУ-продукту  $\frac{P_0}{P}$ , где  $RepU$  – это поток регенерата, а  $P$  – поток финального НОУ-продукта.

Анализ показывает, что единственным параметром, позволяющим влиять на концентрацию  $^{235}\text{U}$  в товарном продукте является концентрация данного изотопа в разбавителе (поток  $P_0$  на схеме). Довольно очевидно, что поскольку питанием первого каскада выступает только регенерат, а питанием второго – полученный из него средне-обогащенный регенерат, то поток тяжелой фракции на выходе из второго каскада ( $W_2$ ) будет в несколько раз меньше, чем исходный поток регенерата. Иными словами, при такой работе каскад будет обеспечивать перерасход регенерата на единицу продукта. Следовательно, поток разбавителя ( $P_0$ ) должен в несколько раз превосходить по величине поток  $W_2$ . Однако, если в качестве разбавителя использовать, например, природный уран, это условие может привести к снижению концентрации  $^{235}\text{U}$  ниже требуемой величины. В этой связи целесообразно, в качестве разбавителя использовать низкообогащенный уран, поскольку ввиду более высокой концентрации  $^{235}\text{U}$  по отношению к природной смеси можно увеличить пропорцию разбавителя и разбавляемого вещества. Однако, в качестве сырья  $F_0$  для наработки разбавителя, наряду

с природным ураном, может быть использован и складской обедненный уран, нарабатывавшийся в ходе производства обогащенного урана из природного урана. Выбор ОГФУ в качестве сырья НОУ-разбавителя позволяет не расходовать природный уран в процессе рециклирования топлива, ценой дополнительных затрат разделительной работы, что может оказаться привлекательной возможностью в некоторых случаях, особенно при росте цены на природный уран.

Для осуществления проектировочного расчета двойного каскада с НОУ-разбавителем, результатом которого будет получение его параметров, необходимых для задания при требуемых концентрациях в выходных потоках, выбираются переменные  $C_{W_2}^{235}$  и  $C_{P_0}^{235}$  при невязках, связанными с достижением требуемой концентрации  $^{235}\text{U}$  в продукте, с учетом поправки на  $^{236}\text{U}$ :  $C_{235}^P = C_{235}^P + \Delta C_{235}$ , а также с выполнением ограничения на концентрацию  $^{232}\text{U}$ , задавая содержание этого изотопа в продукте равным предельно допустимому значению, что необходимо для решения получившейся системы нелинейных уравнений (СНАУ). Такая постановка задачи, реализованная, например, в [86], позволила показать возможность решения задачи возврата регенерата в цикл для состава пятого рецикла при заданной пропорции регенерата к конечному продукту, соответствующей использованию всего выделенного из ОЯТ урана. Как показывают результаты анализа повторного обогащения регенерата пятого рецикла с помощью такой схемы, это операция ценой расхода дополнительных  $\approx 6\%$  работы разделения, удастся вернуть заданное количество переработанного урана, прошедшего пятикратное (5 топливных кампаний) облучение, сэкономив  $\approx 10\%$  природного урана, сравнивая приведенные показатели со схемой ординарного каскада для обогащения природного урана, получающего на выходах в продукте и отвале такие же концентрации  $^{235}\text{U}$  (соответствующую  $C_{235}$  в продукте).

Далее представлены результаты расчёта параметров модификации двойного каскада, представленной на рис. 4.1, для различных ограничений на концентрацию изотопа  $^{232}\text{U}$  в продукте, а также соотношения между расходами исходного регенерата и получаемым товарным НОУ.

Начнем с примера использования такой схемы при заданных постановкой задачи условиях, но при отличающейся требуемой концентрации в продукте 4.7%. В такой постановке задачи удалось добиться использования всего выделенного из ОЯТ регенерата, сэкономив при этом  $\approx 10\%$  природного урана, затратив дополнительно  $\approx 6\%$  работы разделения [86], относительно базово-

го сценария – обогащения природного урана в трехпоточном каскаде. Для концентрации 4.95% в НОУ-продукте, как предлагается постановкой задачи в диссертационной работе, можно сэкономить  $\approx 9\%$  природного урана, также затратив дополнительно  $\approx 6\%$  работы разделения.

Рассмотрим возможность подбора наилучших параметров для рассматриваемой каскадной схемы. В диссертационной работе предложена оригинальная методика, основанная на использовании оптимизации и реализованная в виде разработанного в НИЯУ МИФИ программного кода, которая позволяет реализовывать описанный алгоритм для подбора наиболее эффективной схемы для заданных критериев. Рассмотрим подробнее алгоритм подбора параметров каскадной схемы, который позволяет осуществить проектировочный расчет двойного каскада с НОУ-разбавителем.

1. варьируется (с шагом в 1%) концентрация  $^{235}\text{U}$ , задаваемая в потоке отбора  $P_2$  второго каскада. В качестве начальной точки задается значение 7%, а финальной – верхний порог ограничения на обогащение  $^{235}\text{U}$ : 20% или 90%;
2. внутри приведенного выше цикла со счётчиком, в котором переменная концентрации  $^{235}\text{U}$  изменяет своё значение от заданного начального значения (7%) до конечного значения (20% или 90%) с шагом 1%, для каждого значения этой выполняется тело цикла, в котором осуществляется подбор концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке отбора  $P_1$  первого каскада. Они представляет собой цикл со счётчиком с шагом в 1%, где варьируется концентрация  $^{235}\text{U}$ , задаваемая в потоке отбора  $P_1$  первого каскада, начиная с 5% до текущего значения концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $P_2$  минус 2%.
3. при определенных этими двумя циклами (варьирования  $^{235}\text{U}$  в  $P_2$  и вложенным циклом варьирования  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$ ) концентрациях  $^{235}\text{U}$  в потоках отбора первого и второго каскада, осуществляется расчет системы нелинейных алгебраических уравнений с помощью вычислительного пакета MINPACK [87], переменными в которой выступают концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке отвала второго каскада и в потоке отбора каскада, нарабатывающего НОУ-разбавитель. Невязками для этой системы служат расхождения, заданные условием задачи:

- а) концентрации  $^{235}\text{U}$  в конечном НОУ-продукте, с учетом поправки на  $^{236}\text{U}$ :  $C_{235}^P = C_{235}^P + \Delta C_{235}$  от расчетного значения;



- б) концентрации  $^{232}\text{U}$  в конечном продукте от расчетного значения этой концентрации.

При решении заданной СНАУ, сходимость достигается с помощью квазиньютоновского численного алгоритма trust-region, для которого якобиан вычисляется методом автодифференциации;

4. на каждой итерации с помощью подбираемых значений переменных рассчитываются основные параметры входящих в схему ординарных каскадов;
5. затем, на их основании необходимо рассчитать пропорции потоков  $W_2$  и  $P_0$  в конечном продукте, для того чтобы получить массив значений изотопных концентраций для этого состава. Для этого, на основе вычисленных отношений потоков  $\frac{P_1}{RepU}$  и  $\frac{W_2}{P_1}$  для первого и второго каскадов, а также заданной условиями задачи пропорции  $\frac{RepU}{P}$ , где  $RepU$  – это поток регенерата, а  $P$  – поток финального НОУ-продукта, вычисляется значение  $\frac{W_2}{P}$  как произведение  $\frac{P_1}{RepU}$ ,  $\frac{W_2}{P_1}$  и  $\frac{RepU}{P}$ . Затем, вычитанием из единицы отношения  $\frac{W_2}{P}$ , получается  $\frac{P_0}{P}$ ;
6. поочередно складывая покомпонентно умноженные доли  $\frac{W_2}{P}$  и  $\frac{P_0}{P}$  на соответствующие изотопные концентрации потоков  $W_2$  и  $P_0$ , получается массив изотопных концентраций конечного НОУ-продукта. Для полученных в этом массиве значений концентраций  $^{232}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ , рассчитываются текущие величины расхождения (невязки) для двух равенств в СНАУ. Для каждой из них относительная ошибка (отклонение от единицы отношений левой и правой частей равенства) не должна превышать  $10^{-8}$ ;
7. соответствие выполненных условий для невязок означает схождение численного метода – завершение вычислительных итераций и сохранением полученного решения для заданных внешними циклами значений концентраций  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$  и  $P_2$ ;
8. для полученного решения затем вычисляются основные характеристики схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем, такие как расход работы разделения схемы или расход дополнительного сырья, которые позволяют оценить критерии эффективности каскадной схемы. Их значения также сохраняются для возможности последующего выбора решения исходя из выбора критерия эффективности.

Представленная оптимизационная задача с математической точки зрения является задачей безусловной оптимизации функции многих переменных для целевой функции – минимума расхода работы разделения схемы, определенной на многомерном пространстве переменных. Решение задач такого класса требует использования специальных методов условной оптимизации. В дополнение к этому на каждой итерации оптимизационной процедуры необходимо рассчитывать каждый из каскадов схемы также с использованием численных методов решения систем нелинейных уравнений, возникающих для «невязок» заданных концентраций целевого компонента в отборе и отвале каждого из каскадов.

Перейдем к вычислительным экспериментам, использующим предложенный метод подбора оптимальной схемы, для более подробного исследования схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем.

### **Анализ влияния ограничений предельно допустимой концентрации $^{232}\text{U}$ в товарном НОУ**

Согласно цели диссертации, состоящей в исследовании возможностей полного возврата регенерата в режиме многократного рецикла, в качестве сырья для обогащения был рассмотрен регенерированный уран, испытавший несколько циклов облучения (табл. 2) [80].

Расчёты проведены при следующих условиях:

1. обогащение по изотопу  $^{235}\text{U}$  составляло 4,95%;
2. относительный коэффициент разделения компонентов  $^{235}\text{UF}_6$  и  $^{238}\text{UF}_6$  принят равным 1,2 [15];
3. предельно допустимая концентрация изотопа  $^{232}\text{U}$  в НОУ не должна превышать величины  $5 \cdot 10^{-7}\%$ ,  $2 \cdot 10^{-7}\%$ ,  $1 \cdot 10^{-7}\%$ ;
4. потеря реактивности из-за присутствия  $^{236}\text{U}$  скомпенсирована добавочным обогащением по  $^{235}\text{U}$ ;
5. рассматривался состав обогащаемого регенерированного урана пятого рецикла (табл. 2);
6. концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке легкой фракции второго каскада не превышала 20%, что соответствует порогу, принятому МАГАТЭ для материала прямого использования [88];

7. расход регенерированного урана на единицу продукта ( $E/P$ ), с целью моделирования соответствия условию полного возврата, принят равным:
  - Случай 1: 0,93 кг на 1 кг НОУ-продукта для моделирования возврата облученного топлива к НОУ-продукту в соотношении 1:1;
  - Случай 2: 1,86 кг на 1 кг НОУ-продукта для моделирования возврата облученного топлива к НОУ-продукту в соотношении 2:1.
8. в качестве расчётной использована модель «квазиидеального» каскада [72] с несмешиванием по относительным концентрациям выбранной пары компонентов (R-каскада) [46]. В каждом каскаде были выбраны следующие пары компонентов, по которым было выполнено условие несмешивания их относительных концентраций: первый каскад –  $^{235}\text{U}/^{236}\text{U}$ , второй каскад –  $^{235}\text{U}/^{234}\text{U}$ , вспомогательный каскад –  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ;
9. концентрацию  $^{235}\text{U}$  в потоке  $P_1$  варьировали в пределах 5–20% с шагом 1%, в качестве рабочего значения для каждого случая выбирали величину, соответствующую минимуму расхода работы разделения схемы, а также обеспечивающую выполнение ограничения на содержание  $^{235}\text{U}$  в разбавителе, полученном из природного урана, не более 5,0%. Такое ограничение было выбрано исходя из предварительных оценок, показавших, что это предотвратит непродуктивное увеличение затрат работы разделения, ввиду того, что значительная ее часть будет затрачена на обогащение сырья для НОУ-разбавителя.

Как было описано в алгоритме расчета схемы, процедура оптимизационного расчета заключается в следующем: при заданных внешних условиях (выше) необходимо определить наилучшее значение критерия эффективности – расхода работы разделения каскадной схемы, в зависимости от следующих переменных: а) концентраций  $^{235}\text{U}$  в потоках  $P_1$ ,  $P_2$ ; б) конфигураций (число ступеней, номер ступени подачи внешнего питания, распределение потока питания по ступеням и пр.) каскадов, составляющих схему. С помощью итерационной процедуры перебора этих переменных алгоритм сходится, обеспечивая значение невязки в пределах заданной точности (величина относительной ошибки не превышает  $10^{-8}$ ).

Массовое число	Ограничение по изотопу $^{232}\text{U}$ , $\times 10^{-7}$		
	1	2	5
Случай 1 ( $E/P = 0,93$ )			
232	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$2,00 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$
233	$2,12 \cdot 10^{-7}$	$3,62 \cdot 10^{-7}$	$7,41 \cdot 10^{-7}$
234	$4,90 \cdot 10^{-2}$	$5,30 \cdot 10^{-2}$	$6,21 \cdot 10^{-2}$
235	5,06	5,09	5,14
236	$3,70 \cdot 10^{-1}$	$4,67 \cdot 10^{-1}$	$6,61 \cdot 10^{-1}$
Случай 2 ( $E/P = 1,86$ )			
232	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$2,00 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$
233	$2,40 \cdot 10^{-7}$	$4,12 \cdot 10^{-7}$	$8,55 \cdot 10^{-7}$
234	$5,09 \cdot 10^{-2}$	$5,60 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-2}$
235	5,10	5,15	5,24
236	$5,26 \cdot 10^{-1}$	$6,73 \cdot 10^{-1}$	$9,85 \cdot 10^{-1}$

Таблица 3 — Изотопные составы продукта в модифицированном двойном каскаде для различных условий

Ключевые обобщающие характеристики для сравнения с референтным ординарным каскадом для обогащения природного урана: удельный расход природного урана, удельные затраты работы разделения. Также важно контролировать показатель отношения потока легкой фракции второго каскада к конечному продукту  $\frac{P_2}{P}$ . Уменьшение этого значения означает, что будет произведено меньшее количество загрязнённого  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  изотопами материала  $P_2$ , хранение которого требует определённых процедур, которые могут быть дорогостоящими, поскольку такой материал представляет повышенную радиационную опасность.

Достижение указанных выше внешних условий возможно при формально бесконечном множестве наборов концентраций в отборе первого каскада. Для данной схемы осуществляли оптимизационный расчёт, в качестве критерия минимизации для которого выбран показатель расхода работы разделения схемы. В расчетах оптимальные значения для ключевых параметров достигались при условии несмешивания по относительной концентрации компонентов  $^{235}\text{UF}_6$  к  $^{236}\text{UF}_6$  в первом и втором каскаде схемы, соответственно.

В табл. 3 представлены результаты расчёта изотопных составов.

$^{235}\text{U}$ в потоке отбора первого каскада, %	Экономия природного урана, %	Перерасход работы разделения, %	Отношение потока отбора второго каскада к продукту	Ограничение по изотопу $^{232}\text{U}$ , $\times 10^{-7}$
Случай 1 ( $E_1/P_0 = 0,93$ )				
11	4,9	17,2	0,02785	1
10	6,7	14,7	0,02201	2
8	10,3	9,7	0,01038	5
Случай 2 ( $E_1/P_0 = 1,86$ )				
13	6,6818	39,0985	0,06648	1
12	9,2857	35,4797	0,05798	2
10	14,7795	27,7759	0,04005	5

Таблица 4 — Интегральные параметры рассматриваемого двойного каскада для различных внешних условий

Анализ полученных (табл. 3) изотопных составов позволяет сделать заключение о применимости схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем для задачи возврата регенерата в ядерный топливный цикл в условиях многократного рецикла даже в условиях жестких ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$ , чем современные требования, а также при более ограничивающем условии задействовании двух удельных единиц облученного топлива для производства одной единицы НОУ-продукта (1,86) так как производимый конечный продукт удовлетворяет заданным ограничениям на четные изотопы.

В табл. 4 представлены основные характеристические показатели: удельный расход природного урана, интегральные характеристики экономии природного урана и перерасхода работы разделения по сравнению с ординарным каскадом, питаемым природным ураном, получающим продукт с эквивалентной эффективной концентрацией  $^{235}\text{U}$ , а также соотношения получаемого загрязненного потока легкой фракции второго каскада к итоговому НОУ-продукту  $\frac{P_2}{P}$ .

Анализ результатов таблицы 3 показывает, что уменьшение допустимой концентрации  $^{232}\text{U}$  в продукте при фиксированном отношении исходного регенерата к товарному НОУ обуславливает существенное снижение экономии природного урана и изменение числа центрифуг в каскадной схеме. При отношении регенерата к конечному продукту на уровне 0,93 экономия природного

урана уменьшилась в  $\approx 2$  раза, при этом перерасход работы разделения увеличился в  $\approx 2$  раза при изменении ограничения на  $^{232}\text{U}$  с  $5 \cdot 10^{-7}\%$  до  $1 \cdot 10^{-7}\%$ . Однако введение более жёстких ограничений на  $^{232}\text{U}$  способствовало одновременному снижению концентрации и остальных чётных изотопов в получаемом продукте, особенно  $^{236}\text{U}$ . Данный фактор является положительным в случае многократного рециклирования урана, поскольку будет обеспечивать более медленное накопление  $^{232}\text{U}$  на последующих рециклах [29].

### Оптимизация схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях

Для демонстрации возможностей, получаемых применением предложенных в диссертации методик оптимизации, представим серию расчетов двойного каскада с НОУ-разбавителем, получив интегральные показатели для различных оптимизационных критериев. Это позволит проанализировать преимущества и недостатки, получаемые при подборе схемы, опираясь на те или иные критерии эффективности.

В качестве критериев оптимальности, помимо минимума работы разделения схемы, соответствующего минимуму расхода работы разделения каскада 2.58, оптимизационными критериями могут выступать минимум расхода природного урана, а также максимум суммарной степени извлечения  $^{235}\text{U}$  в схеме (4.1) и из регенерата (4.2) для двойного каскада, соответственно.

$$U_{Rec}^{235} = \frac{LEU_{Product} \cdot C_{np}}{F_0 \cdot C_{NatU}^{235} + RepU \cdot C_{RepU}^{235}}, \quad (4.1)$$

$$RepU_{Rec}^{235} = \frac{W_2 \cdot C_{W_2}^{235}}{RepU \cdot C_{RepU}^{235}} \quad (4.2)$$

, где  $RepU$  - это поток регенерата. Работа разделения в схеме – сумма удельных затрат работы разделения отдельных каскадов, отнесенных к общей величине конечного НОУ-продукта.

Также критерием оптимальности для случая, когда сырьем для наработки НОУ-разбавителя служит природный уран, может служить его расход на единицу продукта.

Все четыре представленные критерия были использованы для проведения расчетов, позволяющих проанализировать физику массопереноса в схеме двойного каскада с НОУ-разбавителем. В результатах вычислений, представленных ниже, для критериев оптимизации приняты следующие обозначения:  $\max I$  – максимум интегральной степени извлечения схемы;  $\max IP$  – максимум степени извлечения из регенерата;  $\min PP$  – минимум потерь работы разделения;  $\min NatU$  – минимум расхода природного урана.

Для представленных далее таблиц также принимаются следующие обозначения:

- П-р – параметр;
- К-й – критерий;
- Сумм. степень изв-я – суммарная степень извлечения  $^{235}\text{U}$  в схеме 4.1;
- Степень изв-я из рег-та – степень извлечения  $^{235}\text{U}$  схемой из регенерированного урана 4.2;
- Потери  $PP$ , % – доля потерь работы разделения относительно референтной схемы трехпоточного каскада для обогащения природного урана. Наименьшие потери соответствуют минимуму суммарного потока схемы 2.58. Если величина отрицательная, значение соответствует проценту экономии работы разделения, по сравнению с референтной схемой трехпоточного каскада для обогащения природного урана.
- Расх. пр.  $U$  на ед. прод. – удельный расход природного урана на единицу производимого товарного НОУ;
- $Mk1$  – масса изотопа, выбранного в качестве опорного компонента при расчете  $R$ -каскада (2.60)–(2.61), для первого каскада в схеме, в который поступает регенерат;
- $Mk2$  – масса изотопа, выбранного в качестве опорного компонента при расчете  $R$ -каскада (2.60)–(2.61), для второго каскада в схеме, на питание которого поступает поток легкой фракции второго каскада;
- Уд. сумм. поток к-а 1 – удельный расход работы разделения (отнесенный к потоку  $P_1$ ) первого каскада, соответствующий суммарному потоку каскада  $\sum_{s=1}^N \frac{L(s)}{P_1}$  (2.52);
- Уд. сумм. поток к-а 2 – удельный расхода работы разделения (отнесенный к потоку  $P_2$ ) второго каскада, соответствующий суммарному потоку каскада  $\sum_{s=1}^N \frac{L(s)}{P_2}$  (2.52);

- U-232, U-234, U-235, U-236 – концентрации изотопов урана в конечном НОУ-продукте;
- $P_1$ ,  $W_2$ ,  $P_0$ ,  $P_2$  – потоки, выраженные в килограммах гексафторида урана ( $UF_6$ ), получаемые в схеме при производстве 1 тонны металлического урана НОУ-продукта.

Оптимизацию параметров четырех выбранных критериев эффективности проводили методом прямого поиска при шаге по концентрации в потоке отбора первого каскада и потоках отбора и отвала второго каскада равном 1%. В расчетах, приведенных ниже, помимо приведенного алгоритма подбора концентраций  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$  и  $P_2$ , для первого и второго каскадов был осуществлен перебор опорных компонент R-каскада (2.60)–(2.61).

Анализируя результаты, приведенные в таблице 5, можно заметить, что концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке  $W_2$  отличаются от соответствующих концентраций  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$  не более чем на  $\approx 0.5\%$ , что позволяет сохранять  $^{235}\text{U}$ , отправляя меньшее его количество в  $P_2$ .

Заметим также, что решения для наилучшего значения степени извлечения в схеме (max И) и наивыгоднейшего уровня затрат работы разделения (min PP) совпадают. При этом критерии экономии PP и экономии природного урана являются конкурирующими, то есть при улучшении одного из них ухудшается другой.

Как показано в таблице 5, решение, где наблюдается оптимальный расход природного урана (min NatU), позволяет на производство 1 т НОУ-продукта сэкономить  $\approx 43$  кг природного урана, по сравнению с решением с оптимальным расходом работы разделения и степенью извлечения, и  $\approx 62$  кг по сравнению с решением с наилучшим извлечением из регенерата, при этом для такого решения показатели степеней извлечения в схеме и из регенерата отличаются менее чем на десятую долю процента. Это решения можно предпочесть также и на том основании, что в конечном НОУ-продукте оказывается на  $\approx 15\%$  меньше  $^{236}\text{U}$ , что является очень существенным аргументом в пользу предпочтения такого решения в условиях многократного рецикла, где важно избегать накопления четных изотопов  $^{232,236}\text{U}$ , а присутствие  $^{236}\text{U}$  ускоряет накопление изотопа  $^{232}\text{U}$ , являясь его предшественником в цепочке ядерных превращений [15]. Дополнительным преимуществом решения с наибольшей экономией природного урана является то, что оно позволяет задействовать в качестве НОУ-разбавителя изотопный состав с наименьшим содержанием  $^{235}\text{U}$ , что может быть



П-р   К-й опт-и	max И	max ИР	min PP	min NatU
Сумм. степень изв-я	0.8767	0.8761	0.8767	0.8766
Степень изв-я из рег-та	0.8733	0.8764	0.8733	0.8729
Потери PP, %	−4.973	−4.783	−4.973	−0.8255
Расх. пр. U на ед. прод.	6.384	6.403	6.384	6.341
CnP1, %	7.0	5.0	7.0	7.0
CnW2, %	6.653	4.708	6.653	6.651
CnP0, %	4.828	5.302	4.828	4.796
CnP2, %	20.0	20.0	20.0	20.0
C232P1, %	$3.44e - 6$	$2.443e - 6$	$3.44e - 6$	$3.441e - 6$
C232W2, %	$2.868e - 6$	$1.998e - 6$	$2.868e - 6$	$2.869e - 6$
C232P2, %	$2.486e - 5$	$2.526e - 5$	$2.486e - 5$	$2.474e - 5$
C234P1, %	0.1686	0.1198	0.1686	0.1699
C234W2, %	0.1548	0.1084	0.1548	0.156
C234P0, %	0.04024	0.04426	0.04024	0.03997
C234P2, %	0.6834	0.7049	0.6834	0.6872
C236P1, %	3.977	2.942	3.977	3.441
C236W2, %	3.878	2.856	3.878	3.354
C236P2, %	7.708	7.385	7.708	6.685
Mk1	238	238	238	236
Mk2	232	236	232	232
Уд. сумм. поток к-а 1	427.6	369.8	427.6	564.9
Уд. сумм. поток к-а 2	1.638	2.627	1.638	1.629
Уд. сумм. поток доп. к-а	2278.0	2340.0	2278.0	2259.0
U-232, %	$5.0e - 7$	$4.94e - 7$	$5.0e - 7$	$5.0e - 7$
U-234, %	0.06022	0.06011	0.06022	0.06019
U-235, %	5.146	5.155	5.146	5.12
U-236, %	0.676	0.706	0.676	0.5846
P1, кг	264.7	372.8	264.7	264.7
W2, кг	257.8	365.6	257.8	257.8
P0, кг	1221.0	1113.0	1221.0	1221.0
P2, кг	6.884	7.127	6.884	6.928

Таблица 5 — Параметры схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях оптимизации для обогащения регенерата второго рецикла с ограничением обогащения 20%.

удобно с практической точки зрения ввиду того, что не будет необходимости создавать отдельный каскад для наработки НОУ-разбавителя, а можно будет использовать независимо нарабатываемый товарный НОУ. Впрочем, важно отметить, что и решение с оптимальным расходом работы разделения и степенью извлечения тоже может отвечать этому критерию. Недостатком решения с предельной экономией природного урана является отсутствие возможности достичь экономии работы разделения, которая имеется в других решениях ( $\approx 5\%$  относительно ординарного каскадом для обогащения природного урана), но тем не менее дефицит природного урана и удешевление единицы работы разделения со временем будут весомыми аргументами в пользу именно этого решения.

Более высокий расход работы разделения при решении с минимизацией использования природного урана, происходит из-за возрастания удельного расхода работы разделения в первом каскаде за счет выбора более легкого опорного компонента при расчете R-каскада ( $^{236}\text{U}$ , вместо используемого в остальных решениях  $^{238}\text{U}$ ). Это позволяет при тех же  $7\%$   $^{235}\text{U}$  в  $P_1$ , что и с прочих решениях, получить меньшую концентрацию нежелательного  $^{236}\text{U}$  в этом отборном потоке. При этом масса потока  $P_1$  в решении, где наблюдается оптимальный расход природного урана, аналогична массе  $P_1$  при решении для наилучших значений степени извлечения в схеме и затрат работы разделения. В результате, если в качестве опорного компонента первого каскада выбирается более легкий изотоп, в конечном НОУ-продукте оказывается меньше  $^{236}\text{U}$ , что позволяет затрачивать меньше сырья-разбавителя на разбавление  $^{236}\text{U}$  дополнительным количеством  $^{235}\text{U}$ .

Для решения, нацеленного на оптимизацию извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата (max ИР) можно наблюдать следующую закономерность. При том что выбор такого критерия эффективности не позволил достичь значимого прироста в этом показателе (улучшение составляют сотые доли процента), выбор более низкой концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$ , чем в остальных решениях привел к тому, что в качестве НОУ-разбавителя потребовался изотопный состав с содержанием  $^{235}\text{U} > 5\%$ , чтобы компенсировать неизбежное падение концентрации, которое происходит в отвальной части второго каскада, ввиду чего в  $W_1$  содержание  $^{235}\text{U}$  будет ниже требуемой в конечном продукте, а значит в разбавителе потребуются концентрация  $^{235}\text{U}$  выше, чем необходимо в производимом НОУ-продукте. А это, как видно из результатов, представленных в таблице 5, приводит и к боль-

шим затратам работы разделения в схеме и к большому расходу природного урана на единицу финального НОУ.

Допуская обогащение  $>20\%$  в схеме можно найти решения с лучшим значением любого из представленных критериев эффективности, как показано в таблице 6. Например, для степеней извлечения  $^{235}\text{U}$  в схеме и из регенерата удастся улучшить показатель на  $\approx 5\%$ . Такой же по масштабу эффект достигается для экономии расхода природного урана, а для критерия экономии работы разделения возможно дополнительно сэкономить  $\approx 1,5\%$  работы разделения, по сравнению с трехпоточным каскадом для обогащения природного урана.

Для полученного набора результирующих параметров, решения для наилучшего значения степени извлечения  $^{235}\text{U}$  в схеме (max И) и наилучшего извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата (max ИР) совпадают. Как и в случае наличия ограничения на обогащение в  $20\%$  (таблица 5), можно наблюдать как выбор опорного компонента с меньшим массовым числом позволяет добиться содержания в продукте меньшего количества  $^{236}\text{U}$ , вместе с тем экономя сырье для наработки НОУ-разбавителя ( $P_0$ ). При этом такое преимущество связано с необходимостью затрачивать больше работы разделения в первом каскаде – удельный расход работы разделения в нем будет в два раза выше. Такая разница в расходах работы разделения обусловлена и тем, что в отсутствии ограничения на обогащение  $^{235}\text{U}$ , оптимальные значения по его извлечению достигаются, когда отборная часть первого каскада значительно удлиняется – в нашем случае в отборном потоке концентрации  $^{235}\text{U}$  превышают  $60\%$ . Эта возможность важна и тем, что позволяет сконцентрировать в потоке отхода  $P_2$  изотопы  $^{232,234}\text{U}$  в высоких концентрациях.  $^{234}\text{U}$  в этом потоке будет составлять основную часть порядка  $60\%$ , а концентрация  $^{232}\text{U}$  возрастет на три порядка. Заметим что все эти преимущества будут достигнуты при умеренных затратах дополнительной работы разделения  $5\text{--}6\%$  относительно ординарного каскада для обогащения природного урана. Еще одним важным преимуществом такой конфигурации каскадной схемы, когда в  $P_2$  удастся добиться высоких концентраций  $^{232,234}\text{U}$  для их последующего вывода из системы, является то, что в финальном НОУ-продукте требуемого содержания  $^{235}\text{U}$  с учетом компенсации  $^{236}\text{U}$  удастся добиться при значениях концентрации  $^{232}\text{U}$  на порядки ниже верхнепороговых (на четыре порядка).

Также как и в расчете, в котором имело место ограничение на  $^{235}\text{U}$   $20\%$  (таблица 5), в таблице 6 можно проследить следующую закономерность.

П-р   К-й опт-и	max И	max ИР	min PP	min NatU
Сумм. степень изв-я	0.8935	0.8935	0.8888	0.8934
Степень изв-я из рег-та	0.9302	0.9302	0.9259	0.9295
Потери PP, %	5.603	5.603	−6.366	6.069
Расх. пр. U на ед. прод.	6.057	6.057	6.286	6.048
CnP1, %	61.0	61.0	7.0	66.0
CnW2, %	61.07	61.07	6.881	66.09
CnP0, %	3.88	3.88	4.78	3.869
CnP2, %	34.56	34.56	80.0	40.19
C232P1, %	$3.037e - 5$	$3.037e - 5$	$3.44e - 6$	$3.287e - 5$
C232W2, %	$1.213e - 9$	$1.213e - 9$	$2.798e - 6$	$6.557e - 10$
C232P2, %	0.0121	0.0121	0.000398	0.009693
C234P1, %	1.503	1.503	0.1686	1.626
C234W2, %	1.342	1.342	0.159	1.429
C234P0, %	0.03219	0.03219	0.03983	0.0321
C234P2, %	65.29	65.29	6.069	59.63
C236P1, %	14.75	14.75	3.977	14.91
C236W2, %	14.79	14.79	3.969	14.96
C236P2, %	0.1057	0.1057	9.443	0.1472
Mk1	236	236	238	236
Mk2	232	232	234	232
Уд. сумм. поток к-а 1	942.9	942.9	427.6	959.6
Уд. сумм. поток к-а 2	40.09	40.09	2.781	41.29
Уд. сумм. поток доп. к-а	2026.0	2026.0	2237.0	2021.0
U-232, %	$2.454e - 11$	$2.454e - 11$	$5.0e - 7$	$1.225e - 11$
U-234, %	0.05869	0.05869	0.06113	0.05819
U-235, %	5.037	5.037	5.156	5.031
U-236, %	0.2992	0.2992	0.7091	0.2793
P1, кг	29.99	29.99	264.7	27.72
W2, кг	29.92	29.92	264.3	27.62
P0, кг	1449.0	1449.0	1215.0	1451.0
P2, кг	0.07525	0.07525	0.4299	0.09397

Таблица 6 — Параметры схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях оптимизации для обогащения регенерата второго рецикла с ограничением обогащения 90%.

Меньшая концентрация  $^{235}\text{U}$  в потоке  $P_1$  приводит к тому, что поток  $W_2$  будет необходимо разбавлять НОУ-разбавителем с более высокой концентрацией изотопа  $^{235}\text{U}$ , что неизбежно приведет к более высоким затратам сырьевого материала, из которого нарабатывается это разбавитель, в данном случае – природного урана.

Важно также заметить, что выход за границу 20% позволяет на 2 порядка сократить объем производимого нештатного отхода в потоке  $P_2$  – на одну тонну товарного НОУ образуется лишь  $\approx 70$  г радиоактивного отхода, тогда как при ограничении в 20%, в 100 раз больше  $\approx 7$  кг. Таким образом, решение проблемы накопления отхода, образующегося в  $P_2$  актуально только при наличии ограничения на получение высокообогащенного урана. Для такого ограничения далее будут рассмотрены способы решения проблемы утилизации нештатного отхода  $P_2$  различными путями.

Перейдем к анализу расчета двойной схемы с НОУ-разбавителем, осуществляющей возврат уже значительно загрязненной изотопной фракции – урана пятого рецикла.

При загрязненном составе регенерата, при тех же ограничениях в 20% на  $^{235}\text{U}$ , резко (на  $\approx 10\%$ ) падает степень извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерированного урана. Общее извлечение (из схемы) также спадает, однако не так существенно (на  $\approx 1-3\%$ ). Для получения продукта из такого загрязненного изотопами регенерата придется затратить на  $\approx 10\%$  природного урана на единицу товарного ноу, порядка дополнительных 700 кг на тонну НОУ-продукта. При этом экономия  $\approx 5-6\%$  работы разделения в схеме обернется расходом дополнительных  $> 700$  кг природного урана на тонну конечного НОУ-продукта. Однако, решение, требующее больших, чем остальные, затрат природного урана, может показаться более привлекательным в условиях многократно рецикла, ввиду того, что в конечном продукте оказываются существенно меньшие концентрации нежелательных четных изотопов: в  $\approx 3$  раза  $^{232}\text{U}$  и  $> 10$  раз меньше  $^{236}\text{U}$ . Но это происходит ввиду того, что в конечном продукте оказываются существенно меньшие концентрации нежелательных четных изотопов: в  $\approx 3$  раза  $^{232}\text{U}$  и  $> 10$  раз меньше  $^{236}\text{U}$ . Но это происходит ввиду того, что степень извлечения  $^{235}\text{U}$  для такого решения очень низка ( $\approx 5\%$  при том, что обычно она составляет  $\approx 77\%$ ) и, как следствие, продукт по нарабатывается в основном из  $^{235}\text{U}$ , источником которого случит сырье разбавителя, а большая часть  $^{235}\text{U}$  из регенерата отправляется в отвал первого же каскада. Доказательством этому служит то, что при переборе опор-

П-р   К-й опт-и	max И	max ИР	min PP	min NatU
Сумм. степень изв-я	0.8594	0.8594	0.7529	0.8538
Степень изв-я из рег-та	0.776	0.776	0.05207	0.7363
Потери PP, %	5.095	5.095	−0.4509	8.975
Расх. пр. U на ед. прод.	7.129	7.129	7.869	7.09
CnP1, %	5.0	5.0	5.095	7.0
CnW2, %	4.371	4.371	4.952	6.026
CnP0, %	5.392	5.392	4.963	5.034
CnP2, %	20.0	20.0	20.0	20.0
C232P1, %	$5.191e - 6$	$5.191e - 6$	$1.425e - 5$	$7.316e - 6$
C232W2, %	$2.837e - 6$	$2.837e - 6$	$1.264e - 5$	$4.122e - 6$
C232P2, %	$6.134e - 5$	$6.134e - 5$	0.0001812	$4.993e - 5$
C234P1, %	0.1944	0.1944	0.2841	0.2769
C234W2, %	0.1519	0.1519	0.27	0.214
C234P0, %	0.04503	0.04503	0.04138	0.04199
C234P2, %	1.208	1.208	1.749	1.117
C236P1, %	5.446	5.446	4.239	6.25
C236W2, %	5.126	5.126	4.183	5.816
C236P2, %	13.06	13.06	10.05	12.03
Mk1	238	238	234	236
Mk2	232	232	232	232
Уд. сумм. поток к-а 1	371.5	371.5	7.501	542.7
Уд. сумм. поток к-а 2	6.583	6.583	0.07315	3.898
Уд. сумм. поток доп. к-а	2616.0	2616.0	2829.0	2558.0
U-232, %	$5.0e - 7$	$5.0e - 7$	$1.32e - 7$	$5.0e - 7$
U-234, %	0.06386	0.06386	0.04377	0.06285
U-235, %	5.212	5.212	4.963	5.155
U-236, %	0.9034	0.9034	0.04367	0.7056
P1, кг	271.6	271.6	15.59	192.9
W2, кг	260.7	260.7	15.44	179.4
P0, кг	1218.0	1218.0	1464.0	1300.0
P2, кг	10.93	10.93	0.1487	13.45

Таблица 7 — Параметры схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях оптимизации для обогащения регенерата пятого рецикла с ограничением обогащения 20%.

ных компонент от массовых чисел 232 до 238, решение для наименьших затрат работы разделения нашлось для значения массы опорного компонента 234, что приведет к тому, что  $^{235}\text{U}$  будет в большей степени отправляться к тяжелому «концу» каскада. По этой причине, связанной с выбором опорного компонента в первом каскаде с массовым числом меньшим, чем у изотопа  $^{235}\text{U}$ , массовый поток  $2$  будет значительно меньше, чем в других решениях:  $\approx 150$  г, тогда как в решениях с эффективным значением степени извлечения из регенерата  $\approx 11$  кг. Также закономерно, что такой выбор опорного компонента в первом каскаде позволяет добиться в  $2$  более высокой концентрации  $^{232}\text{U}$  (в  $\approx 50$  раз).

Для рассмотренного состава все оптимальные решения потребуют использования НОУ-разбавителя с содержанием  $^{235}\text{U} > 5\%$ , а концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке  $W_2$  могут отличаться от соответствующих концентраций  $^{235}\text{U}$  в  $1$  на более чем  $\approx 0.5\%$ .

Перейдем к рассмотрению результатов оптимизации схемы, возвращающей в ЯТЦ загрязненный уран пятого рецикла, при отсутствии ограничения на получение высокообогащенного урана (когда концентрация  $^{235}\text{U}$  может превышать 20%).

Из анализа результатов, представленных в таблицах 8 и 7 видно, что можно получить финальный продукт с многократно более низкими концентрациями нежелательных четных искусственных изотопов  $^{232,236}\text{U}$ . Но в этом случае также потребуются больший, чем для остальных решений, удельный расход природного урана, а степень извлечения  $^{235}\text{U}$  для такого решения очень низка и ограничивается  $\approx 5\%$ , при том, что для других решений при тех же исходных данных она составляет  $\approx 90\%$ . То есть, при таких подобранных оптимизатором параметрах, НОУ-продукт по нарабатывается в основном из  $^{235}\text{U}$ , источником которого случит сырье разбавителя, а большая часть  $^{235}\text{U}$  из регенерата отправляется в отвал первого же каскада. При переборе опорных компонент от массовых чисел 232 до 238, решение для наименьших затрат работы разделения нашлось для значения массы опорного компонента 234, что приведет к тому, что  $^{235}\text{U}$  будет в большей степени концентрироваться в тяжелом конце каскада. По этой причине, связанной с выбором опорного компонента в первом каскаде с массовым числом меньшим, чем у изотопа  $^{235}\text{U}$ , массовый поток  $2$  будет значительно меньше, чем в других решениях. Также закономерно, что такой выбор опорного компонента в первом каскаде позволяет добиться в  $2$  более высокой концентрации  $^{232}\text{U}$  (в  $\approx 6$  раз).

П-р   К-й опт-и	max И	max ИР	min PP	min NatU
Сумм. степень изв-я	0.8848	0.8822	0.7525	0.8801
Степень изв-я из рег-та	0.9068	0.9131	0.05077	0.8783
Потери PP, %	10.47	2.62	−0.6754	13.21
Расх. пр. U на ед. прод.	6.662	6.952	7.856	6.615
CnP1, %	50.0	5.0	5.432	76.0
CnW2, %	50.07	4.941	5.333	76.18
CnP0, %	4.248	5.307	4.95	4.192
CnP2, %	26.65	72.16	33.0	71.08
C232P1, %	$5.291e - 5$	$5.191e - 6$	$1.57e - 5$	$8.047e - 5$
C232W2, %	$7.962e - 8$	$2.725e - 6$	$1.407e - 5$	$1.925e - 8$
C232P2, %	0.01868	0.002804	0.0004709	0.002341
C234P1, %	2.01	0.1944	0.3075	3.061
C234W2, %	1.808	0.18	0.296	2.205
C234P0, %	0.03532	0.0443	0.04128	0.03484
C234P2, %	73.15	16.56	3.524	27.09
C236P1, %	23.37	5.446	4.43	19.21
C236W2, %	23.44	5.442	4.399	19.83
C236P2, %	0.1642	9.632	13.02	1.817
Mk1	236	238	234	236
Mk2	232	232	232	232
Уд. сумм. поток к-а 1	832.8	371.5	7.61	936.8
Уд. сумм. поток к-а 2	21.72	10.64	0.07208	21.39
Уд. сумм. поток доп. к-а	2293.0	2542.0	2822.0	2267.0
U-232, %	$1.432e - 9$	$5.0e - 7$	$1.33e - 7$	$2.204e - 10$
U-234, %	0.0672	0.0692	0.04368	0.05968
U-235, %	5.072	5.24	4.954	5.016
U-236, %	0.4214	0.9984	0.04158	0.227
P1, кг	26.67	271.6	14.03	17.53
W2, кг	26.59	271.3	13.98	16.93
P0, кг	1452.0	1208.0	1465.0	1462.0
P2, кг	0.07544	0.2391	0.05	0.6027

Таблица 8 — Параметры схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях оптимизации для обогащения регенерата пятого рецикла с ограничением обогащения 90%.



При заданном критерии оптимальности – максимальной степени извлечения  $^{235}\text{U}$  в схеме, концентрация  $^{235}\text{U}$  в отборе первого каскада достигает максимального значения, а во втором каскаде в потоке отбора, за счет того, что он составляет миллионные доли от потока конечного продукта, концентрируется  $^{232}\text{U}$ , и удастся добиться меньшего содержания  $^{235}\text{U}$ , чем в потоке питания второго каскада.

По результатам анализа представленных решений (табл. 5–8) можно сделать следующие выводы:

- минимум работы разделения и минимум расхода природного урана – конкурирующие критерии;
- меньшая концентрация  $^{235}\text{U}$  в легкой фракции первого каскада приводит к необходимости использовать НОУ-разбавитель с более высоким содержанием  $^{235}\text{U}$  для того чтобы добиться требуемой концентрации  $^{235}\text{U}$  в конечном продукте, что приводит к большему расходу незагрязненного четными изотопами сырьевого материала. При этом, при ограничении на обогащение  $^{235}\text{U}$  в 20% оптимальные по извлечению  $^{235}\text{U}$  из регенерата решения соответствуют минимально заданной (5%) концентрации в  $P_1$ ;
- для загрязненного четными изотопами состава регенерата (в рассматриваем случае – урана пятого рецикла) в процессе оптимизации работы разделения могут быть найдены в качестве оптимальных такие решения, при которых оптимум работы разделения будет достигнут за счет наработки НОУ-продукта по большей части за счет сырья, не содержащего четные изотопы. Поэтому особенно важно контролировать показатель извлечения ценного изотопа  $^{235}\text{U}$  из возвращаемого в цикл материала;
- при наличии ограничения в 20% на концентрацию  $^{235}\text{U}$ , которую можно достигать в каскадной схеме, для любых критериев эффективности решения находились на верхней границе в 20%  $^{235}\text{U}$  в  $P_2$ , при том что значения концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $P_2$  подбирались в интервале от 7%.
- отсутствие ограничения в 20% на обогащение  $^{235}\text{U}$  в каскадной схемы, позволяет улучшить все целевые критерии за счет эффективного концентрирования изотопов  $^{232,236}\text{U}$  в потоке  $P_2$ , выводимом из системы. Для этих случаев, по сравнению с сопоставимыми исходными условиями, когда приходится соблюдать ограничение в 20%, в  $P_2$  оказывается

меньшая масса изотопа  $^{235}\text{U}$  за счет уменьшения самого потока  $P_2$  на 2 порядка. Таким образом, вопрос утилизации нештатного отхода 2 для более глубокого извлечения  $^{235}\text{U}$  из исходного регенерированного урана, актуален только в случае наличия ограничения на получение высокообогащенного урана. Схемы, направленные на решение этой проблемы и будут рассмотрены в следующих подразделах диссертации.

### **Общие выводы по результатам анализа схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем**

В качестве обобщающих выводов по результатам анализа схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем (рис. 4.1), обозначим следующее:

1. схема применима для обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла урана в топливе легководных реакторов, поскольку позволяет получать продукт, отвечающий всем требованиям на концентрации четных изотопов для регенерата различного исходного состава, включая рециклы, к которым накопилось повышенное содержание четных изотопов (на примере пятого рецикла);
2. схема позволяет отделить участки обогащения регенерированного урана (где разделительное оборудование будет подвержено загрязнению минорными изотопами) от каскадов, обогащающих не содержащий  $^{232,236}\text{U}$  природный уран или ОГФУ. При этом доля разделительных мощностей, отводимых под работу с регенерированным ураном при наработке НОУ для загрузки реактора составляет не более 10%;
3. содержание изотопов  $^{232,234}\text{U}$  в отвале каскада 1 на порядки ниже предельно допустимых нормативных значений, что делает возможным долговременное хранение подобного отвала в виде гексафторида урана или его перевод в другое, более удобное химическое соединение, например, на установках дефторирования, таких как W-ЭХЗ;
4. в схеме на каждом рецикле происходит накопление побочно производимого материала – высокоактивного отхода (отбор второго каскада), в котором к тому же происходит потеря делящегося  $^{235}\text{U}$ . Стратегии дальнейшего обращения с данным отходом требуют отдельного анализа.

Одним из вариантов решения этой проблемы является его перемешивание с отвалом каскада 1.

5. несмотря на потери целевого изотопа  $^{235}\text{U}$  в схеме в потоках отвалов  $W_0$ ,  $W_1$ , а также в выводимом из схемы  $P_2$ , обеспечивается более эффективное вовлечение  $^{235}\text{U}$  в цикл по сравнению с ординарным каскадом для обогащения обедненного урана;
6. работа схемы связана с потерями работы разделения при двух этапах производственного процесса:
  - а) обеднение отбора первого каскада  $P_1$  во втором каскаде;
  - б) смешивание потоков  $W_2$  с НОУ-разбавителем  $P_0$ , в которых различается содержание изотопа  $^{235}\text{U}$ ;

Отсюда, достоинствами рассматриваемой каскадной схемы являются:

1. возможность полностью решить задачу возврата регенерированного урана в условиях многократного рецикла;
2. частичное очищение регенерированного урана от четных изотопов  $^{232,233,234}\text{U}$ ;
3. обогащение даже загрязненного четными изотопами регенерированного урана, что делает схему применимой в условиях многократного рецикла.
4. загрязнение меньшей доли разделительных мощностей четными изотопами, чем у разбавляющих каскадов, рассмотренных в главе 1, так как занятые под получение разбавителя остаются незагрязненными четными изотопами. Вдобавок, такой подход позволяет легко переориентировать ту часть разделительных мощностей, которая не соприкасалась с регенератором (поскольку разбавление происходит вне каскадов), на решение других задач;
5. концентрации изотопов  $^{232,233,234}\text{U}$  в потоке  $W_1$  снижены по отношению к концентрациям в потоке  $E$  более чем на порядок, что делает хранение такой фракции более безопасным, чем хранение исходного регенерированного урана. Если же смешать отвальные потоки каскадной схемы ( $W_1$  и  $W_3$ ), получившийся обедненный уран будет иметь концентрации четных изотопов на несколько порядков ниже допустимых значений, что позволяет говорить о возможности его безопасного хранения и, при необходимости, последующего прямого обогащения до уровня НОУ;

6. в случае использования для производства НОУ-разбавителя обедненного урана, задействуется ресурс накопленного в больших количествах ОГФУ, что является немаловажным для эффективной утилизации данного материала и снижения динамики его накопления.

Основными недостатками рассматриваемой каскадной схемы, также как и рассмотренных ранее двойных каскадов, являются:

1. наличие «побочного» продукта в виде относительно небольшого (до 1–3% от общей массы входящего потока регенерата) количество отхода – загрязненной фракции, в которой сконцентрированы изотопы  $^{232}, ^{233}, ^{234}\text{U}$ , а также обогащен  $^{235}\text{U}$ ;
2. потери работы разделения при смешивании потоков с различным содержанием  $^{235}\text{U}$ .

#### 4.2 Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока $P_2$ в цикл

В качестве модификации каскадной схемы, представленной на рис. 4.2 предложен способ, позволяющий вернуть поток  $P_2$  в топливный цикл для производства НОУ-продукта (рис. 4.1) [81; 89]. Принцип ее работы состоит в следующем.

Учитывая, что каскадная схема двойного каскада с НОУ-разбавителем (рис. 4.1) предназначена для обогащения регенерата с высоким накопившимся в ходе серии пройденных рециклов содержанием изотопа  $^{232}\text{U}$ , можно использовать такую каскадную схему для вовлечения ранее полученного в потоке отбора второго каскада фракции  $P_2$  загрязненной изотопом  $^{232}\text{U}$ . Выведенный ранее из системы гексафторида урана может быть перемешан с регенератом, полученным из следующей партии отработавшего топлива, то есть с составом более загрязненным изотопами  $^{232}, ^{233}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ , чем исходно использовавшийся состав, побочным продуктом которого оказался этот  $P_2$ . Полученная таким образом в результате смешения  $P_2$  предыдущего рецикла и регенерата очередного рецикла смесь будет отправлена на последующее обогащение (рис. 4.2).

При использовании подобной схемы удастся полностью замкнуть топливный цикл по урану, а единственным отходом производства останется ОГФУ,

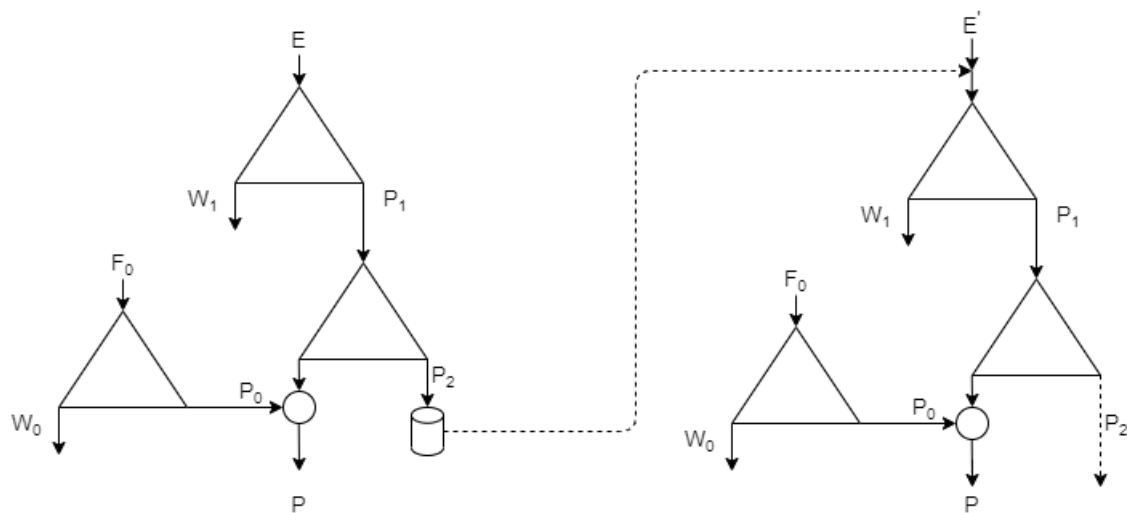


Рисунок 4.2 — Схема передачи загрязненной изотопом  $^{232}\text{U}$  фракции гексафторида урана в двойном каскаде от первой партии дообогащенного регенерированного урана к последующей. Обозначения:  $E$  – поток регенерированного урана;  $P_1$  – поток отбора первого каскада, выступающий питанием второго каскада;  $P_2$  – поток отбора второго каскада;  $W_1$  – поток отвала первого каскада;  $W_2$  – поток тяжелой фракции (условный «отвал») второго каскада;  $P_0$  – поток НОУ-разбавителя;  $P$  – финальный продукт (товарный низкообогащенный уран (НОУ), который подается на питание последующего двойного каскада, перемешиваясь с регенератором очередного рецикла

образующийся в отвале первого каскада, который можно считать штатным отходом обогатительного производства с отработанными технологиями хранения и переработки. При этом после завершения производственного цикла останется невостребованным только тот объем обогащенного по изотопу  $^{232}\text{U}$  гексафторида урана (загрязненной фракции легкого конца второго каскада (рис. 4.2)), который будет образован после обогащения последней партии регенерата. Таким образом, предложенный подход к дообогащению регенерата урана позволяет организовать полный возврат регенерированного урана в топливный цикл в течение всего жизненного цикла задействованного урана.

При схожем наборе достоинств и недостатков схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока  $P_2$  в цикл (рис. 4.2) с предшественницей, не предусматривающей использование загрязненного потока (рис. 4.1), достоинством схемы с возвратом  $P_2$  является более глубокая выработка потенциала делящегося  $^{235}\text{U}$ , накапливаемого совместно с изотопами  $^{232,233,234}\text{U}$  в загрязнен-

ной фракции второго каскада. Это позволяет добиваться меньших потерь  $^{235}\text{U}$  на всем жизненном цикле используемого урана.

#### 4.2.1 Расчет топливного цикла, осуществляемого посредством двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока $P_2$ в цикл

Вычислительный эксперимент выполнялся исходя из следующих предположений.

Ординарный каскад, с помощью которого был обогащен регенерат первого рецикла, заменяется для последующих рециклов двойным каскадом ((рис. 4.1) и полученная с его помощью партия последующего регенерата, произведенная после дообогащения регенерата первой партии регенерата (или регенерата, выделенного из первой выгруженной группы ТВС из реактора, работающего на РУТ-топливе первого рецикла) фракция, обогащенная по изотопу  $^{232}\text{U}$  и имеющая 20% содержание изотопа  $^{235}\text{U}$  смешивается с регенератом, полученным после переработки второй партии ОТВС. Полученную смесь направляют на дообогащение (рис. 4.2).

Результаты расчета параметров двойных каскадов для этого случая приведены в табл. 9. В случае, когда возврата потока отбора не происходит, параметры топлива для всех перегрузок второго рецикла совпадают с параметрами первой перегрузки из табл. 9, а изотопный состав урана, попадающего в отходы на каждой перегрузке, и его количество, совпадает с составом возвращаемой фракции первой перегрузки из табл. 9.

Как видно из данных табл. 9 предложенная схема рециклирования действительно позволяет полностью израсходовать и исходный регенерированный уран и образующийся в результате использования двойного каскада высокообогащенный отход.

Итак, опираясь на результаты расчетов, можно сделать общие выводы касательно двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока  $P_2$  в цикл:

1. схема принципиально применима для обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла урана в топливе легководных реакторов, поскольку позволяет получать продукт, отвечающий

Номер перегрузки		Первая перегрузка		Вторая перегрузка		Третья перегрузка	
Обогащение, %		4.95	4.4	4.95	4.4	4.95	4.4
Расх. пр. U, кг		139802.03	58291.31	135568.06	56351.24	133649.39	56868.06
Расх. рег. U, кг		20604.65	9961.54	20860.12	10082.89	20929.42	10118.06
Расх. РР, отн.ед.		263368.8	109887.15	254313.79	106009.0	252276.2	108260.0
Масса $P_2$ , кг		255.47	121.36	324.77	156.59	329.34	220.0
$C_i$ , %	$^{232}\text{U}$	$4.43 \times 10^{-7}$	$4.34 \times 10^{-7}$	$4.80 \times 10^{-7}$	$4.85 \times 10^{-7}$	$5.00 \times 10^{-7}$	$4.92 \times 10^{-7}$
	$^{233}\text{U}$	$1.33 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-6}$	$1.74 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-6}$
	$^{234}\text{U}$	$5.87 \times 10^{-2}$	$5.40 \times 10^{-2}$	$6.14 \times 10^{-2}$	$5.68 \times 10^{-2}$	$6.38 \times 10^{-2}$	$5.63 \times 10^{-2}$
	$^{235}\text{U}$	5.154	4.607	5.207	4.658	5.212	4.607
	$^{236}\text{U}$	$4.76 \times 10^{-1}$	$4.91 \times 10^{-1}$	$6.16 \times 10^{-1}$	$6.14 \times 10^{-1}$	$6.22 \times 10^{-1}$	$5.63 \times 10^{-1}$
	$^{238}\text{U}$	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное
Изотопный состав возвращаемой фракции, %							
$^{232}\text{U}$	$1.64 \times 10^{-5}$	$1.75 \times 10^{-5}$	$2.32 \times 10^{-5}$	$2.36 \times 10^{-5}$	$2.57 \times 10^{-5}$	$2.34 \times 10^{-5}$	$2.34 \times 10^{-5}$
$^{233}\text{U}$	$3.98 \times 10^{-5}$	$4.17 \times 10^{-5}$	$5.16 \times 10^{-5}$	$5.21 \times 10^{-5}$	$5.49 \times 10^{-5}$	$5.15 \times 10^{-5}$	$5.15 \times 10^{-5}$
$^{234}\text{U}$	$5.88 \times 10^{-1}$	$6.03 \times 10^{-1}$	$6.78 \times 10^{-1}$	$6.81 \times 10^{-1}$	$6.96 \times 10^{-1}$	$6.73 \times 10^{-1}$	$6.73 \times 10^{-1}$
$^{235}\text{U}$	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
$^{236}\text{U}$	7.11	7.04	6.54	6.54	6.46	6.55	6.55
$^{238}\text{U}$	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное

Таблица 9 — Изотопные составы и расходы природного урана для изготовления топлива для перегрузок реактора типа ВВЭР-1200 (без учета твэгов): топливо второго рецикла. Обозначения:  $C_i$  — изотопный состав возвращаемой фракции; Расх. РР, отн. ед. — расход работы разделения в относительных единицах; пр. U — природный уран; рег. U — урановый регенерат

- всем требованиям по концентрациям четных изотопов для регенерата различного исходного состава;
2. достоинством схемы является полное отсутствие потерь  $^{235}\text{U}$  (не считая потока отвала первого каскада) в процессе рециклирования, а также полное отсутствие нештатного отхода вплоть до последней перегрузки последнего рецикла; Однако, ввиду искусственного повышения содержания четных изотопов  $^{232,234}\text{U}$  в получаемом продукте с каждой последующей перегрузкой возрастает масса отхода  $P_2$  и, соответственно, масса концентрирующегося в нем изотопа  $^{235}\text{U}$ , что уменьшает эффект от возврата изотопа  $^{235}\text{U}$  в цикл из-за его потерь вследствие увеличения потока загрязненной фракции, которое происходит вследствие роста концентраций четных изотопов в исходной смеси.
  3. возврат фракции отхода (потока  $P_2$ ) в схему является причиной монотонного роста концентраций четных изотопов, что приводит к необходимости увеличения уровня обогащения получаемого НОУ и, тем самым, к росту затрат работы разделения, а также повышению концентрации изотопа  $^{235}\text{U}$  в НОУ-разбавителе ввиду необходимости компенсации влияния  $^{236}\text{U}$ ;
  4. в схеме присутствуют потери работы разделения из-за необходимости обеднять отбор второго ординарного каскада  $P_2$  в последующей составной каскадной схеме;

В качестве общего вывода по результатам анализа схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом  $P_2$  в топливный цикл (рис. 4.1) представим следующее:

1. схема применима для обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла урана в топливе легководных реакторов, поскольку позволяет получать продукт, отвечающий всем требованиям на концентрации четных изотопов на основе состава регенерата с повышенным исходным содержанием изотопов  $^{232,234}\text{U}$ , который не позволяет решить проблему с помощью ординарного каскада;
2. схема позволяет использовать поток «легкой» фракции второго каскада ( $P_2$ ), поскольку указанный поток возвращается в топливный цикл, что снимает проблемы его длительного хранения и связанные с ним затраты;



3. схема с возвратом  $P_2$  как и предшествующая схема без возврата  $P_2$ , подходит для решения задачи обогащения урана при одновременном выполнении всех сопутствующих условий, в том числе, при обогащении регенерированного урана, прошедшего несколько последовательных рециклов;
4. схема с возвратом  $P_2$  как и предшествующая схема двойного каскада с НОУ-разбавителем, позволяет задействовать для воспроизводства ядерного топлива накопленный в значительных количествах обедненный уран. Производимый ею отвал регенерированного урана ( $W_1$ ) имеет содержание четных изотопов на уровне ниже допустимых ограничений. Это позволяет говорить о том, что такие отвалы могут безопасно длительно храниться в виде гексафторида урана или быть переработанными на установке дефторирования;
5. в схеме на трех стадиях процесса обогащения происходят потери работы разделения:
  - а) обеднение отбора первого каскада  $P_1$  во втором каскаде;
  - б) смешивание потоков  $W_2$  с НОУ-разбавителем  $P_0$ , в которых различается содержание изотопа  $^{235}\text{U}$ ;
  - в) смешивания потоков  $P_2$  и  $E$  на входе в каскады, принимающие регенерат последующих рециклов (начиная с третьего).
6. в схеме, как и в предшествующей немодифицированной схеме двойного каскада с НОУ-разбавителем, физически разделены участки каскада с разделительным оборудованием, пропускающие через себя регенерированный урана (первые два каскады, принимающие на вход поток  $E$  на рисунке 4.2) и участок обогащения сырья для наработки НОУ-разбавителя – природного или обедненного урана – материалов, которые не загрязнены четными изотопами  $^{232,236}\text{U}$ . В дальнейшем это позволит задействовать оборудование каскада, использовавшегося для наработки разбавителя, в операциях обогащения природного урана или другого сырьевого материала, не загрязненного четными изотопами, а значит в менее жестконормированных условиях эксплуатации;
7. практическая реализация представляется нецелесообразной, поскольку данная схема не дает ощутимых преимуществ с точки зрения интегральной экономии  $^{235}\text{U}$  в топливном цикле по отношению к схеме двойного каскада с НОУ-разбавителем (рис. 4.1), причем реализации схемы с воз-

вратом  $P_2$  возможна только в условиях непрерывной работы реактора и постоянного поступления новых партий регенерата на дообогащение.

#### 4.2.2 Схема с замыканием для утилизации отходов очистки регенерата урана от четных изотопов в двойном каскаде

Процесс возврата данного материала в воспроизводство низкообогащенного урана может быть начат также и после дообогащения регенерата уже для одной ТВС и даже для ее части (непрерывный возврат), схема каскада при этом преобразуется к виду, изображенному на рис. 4.3.

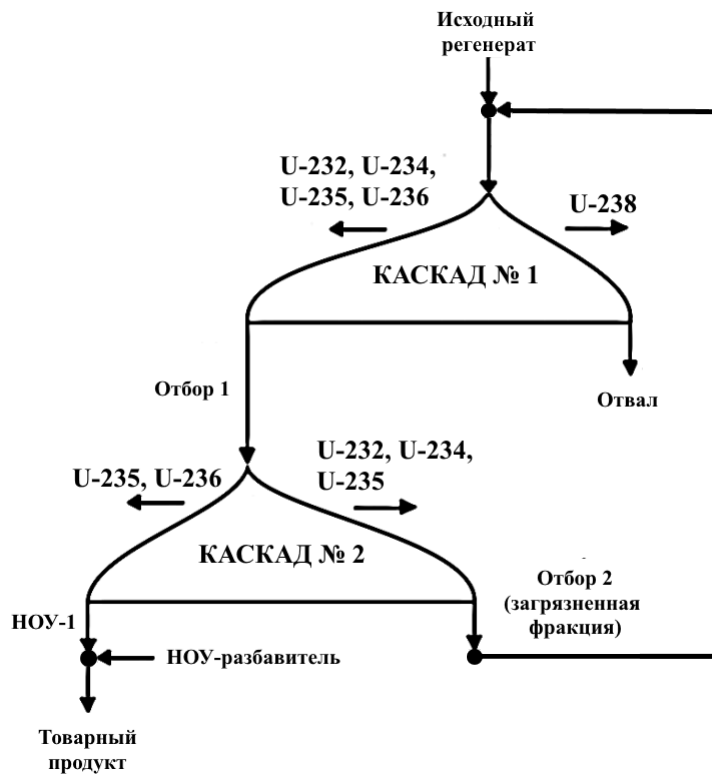


Рисунок 4.3 — Схема двойного каскада с возвратом потока отбора.

Очевидно, что при использовании предлагаемой схемы и непрерывной работе завода по обогащению, удастся полностью замкнуть топливный цикл по урану, а единственным отходом производства станет только обедненный гексафторид, образующийся в отвале первого каскада. Однако данный продукт можно считать штатным отходом обогатительного производства, для которого на сегодняшний день отработаны технологии хранения и переработки.

При этом после вывода завода из эксплуатации (или остановки на планово-предупредительный ремонт) останется не востребуемым только тот объем обогащенного по изотопу  $^{232}\text{U}$  гексафторида урана, который будет образован после обогащения последней партии регенерата на этом заводе. Таким образом, рассматриваемый подход к дообогащению регенерата урана позволяет организовать полный возврат регенерированного урана в топливный цикл в течение практически всего жизненного цикла топлива легководных реакторов, работающих в замкнутом топливном цикле.

Несмотря на очевидные достоинства рассматриваемого способа, возникает вопрос о его эффективности с точки зрения интегральных характеристик разделительного каскада, важных для экономики топливного цикла в целом. Речь идет об экономии природного урана в цикле и затратах работы разделения на единицу массы готового НОУ. В связи с этим целью настоящей работы явилась оценка интегральных показателей для рассматриваемой схемы в условиях ее использования для обогащения регенерированного урана и наработки НОУ для обеспечения поставок для формирования топлива нескольких последовательных загрузок реактора.

Исходный регенерат второго рецикла использован для производства тепловыделяющих сборок (ТВС) с обогащением: 4,95%. Из указанного состава изготавливают сначала топливо для первой перегрузки. Далее, загрязненную фракцию от обогащения регенерата для первой перегрузки перемешивают с регенератом исходного состава для второго рецикла и направляют на последующее обогащение для получения топлива следующей перегрузки. Всего рассмотрено 7 перегрузок. При расчете состава низкообогащенного урана после каскада при получении топлива для каждой из перегрузок решается оптимизационную задачу (метод прямого поиска) для шести выбранных критериев эффективности при шаге по концентрации в потоке отбора первого каскада и потоках отбора и отвала второго каскада равном 1%. Для сопоставления отбирали только те варианты, для которых выполнены описанные выше условия для концентраций четных изотопов. Диапазоны варьирования концентраций в выходящих потоках каскадной схемы были следующими. Концентрацию  $^{235}\text{U}$  в первом каскаде варьировали в диапазоне 7-17%, в отвале второго каскада 6-16%, в отборе второго каскада 10-20%.

Ввиду сложности многокритериального анализа для каждой из перегрузок был рассмотрен случай с параллельными «ветками», на каждой из которых

проводили последовательный расчет изотопных составов и параметров разделительного каскада для семи перегрузок, при условии оптимизации на каждом из шагов по одному и тому же критерию эффективности. В качестве критериев эффективности выступали величины: (1) минимум расхода природного урана на единицу продукта, (2) минимум затрат работы разделения на единицу продукта, (3) минимум концентрации изотопа  $^{232}\text{U}$  (в диапазоне  $2\text{--}5 \cdot 10^{-7}\%$ ), (4) минимум концентрации изотопа  $^{236}\text{U}$ , (5) минимум массы отхода двойного каскада, (6) максимум степени извлечения  $^{235}\text{U}$  из поступающего в обогащение регенерата. Под степенью извлечения  $^{235}\text{U}$  из исходного регенерированного урана понимали отношение массы  $^{235}\text{U}$  в отвале второго каскада к массе  $^{235}\text{U}$  в исходной смеси регенерата, поступившего для обогащения.

Далее представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов и проведен их анализ. На рисунке 4.4 представлено изменение удельного расхода природного урана при получении товарного НОУ при шести различных критериях эффективности, по которым осуществляли оптимизацию для каждой перегрузки. Как следует из анализа зависимостей, показанных на указанном рисунке при оптимизации по четырем, а именно: минимуму удельного расхода природного урана, минимуму удельных затрат работы разделения, минимуму массы отхода двойного каскада, максимуму степени извлечения  $^{235}\text{U}$  из поступающего в обогащение регенерата, зависимости практически совпадают. Это можно объяснить тем, что данные критерии близки по своей сути. Например, максимум степени извлечения  $^{235}\text{U}$  из поступающего в обогащение регенерата должен приводить к необходимости использования минимальной массы  $^{235}\text{U}$  из природного сырья, что и выражается в уменьшении расхода природного сырья. В целом все кривые представляют собой уменьшающиеся функции, что логично, учитывая, что с каждой перегрузкой масса исходного регенерата возрастает одновременно с повышением концентрации  $^{235}\text{U}$  в нем. Однако при использовании в качестве критериев эффективности минимумов концентраций  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  в товарном НОУ соответствующие кривые заметно отличаются от четырех упомянутых выше случаев. Как можно видеть из рисунка 4.4 (кривые 4 и 5) для этих случаев характерен заметно больший расход природного урана. Данный факт можно объяснить тем, что при оптимизации по минимуму концентраций четных изотопов в товарном НОУ происходит «вытеснение» четных изотопов, а вместе с ними и значительной массы  $^{235}\text{U}$  в отбор второго каскада. В результате заметно падает степень извлечения  $^{235}\text{U}$  из ис-

ходного регенерата (рисунок 4.5) и масса отхода, что отчетливо заметно по зависимостям на рисунке 4.6, в соответствии с которыми масса отхода для этих критериев на последних перегрузках превышает массу исходного регенерата и составляет величину более 30% от массы исходного регенерата. В то время как для других критериев эта величина даже на 7-й перегрузке не превышает 10%. Общей закономерностью для всех случаев является снижение расхода природного сырья с каждой перегрузкой (рисунок 4.7).

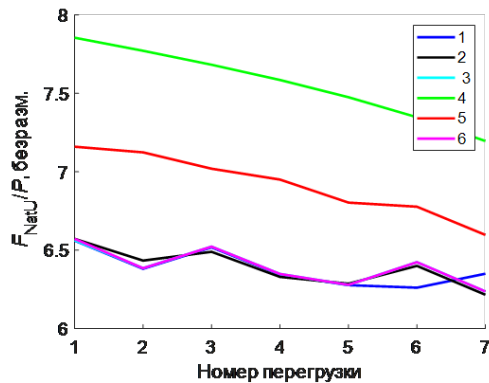


Рисунок 4.4 — Изменение величины удельного расхода природного урана в двойном каскаде с замыканием в зависимости от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

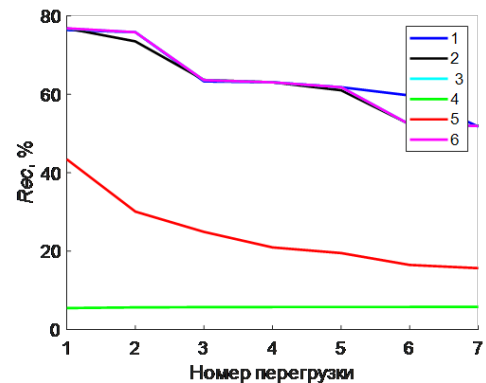


Рисунок 4.5 — Степень извлечения  $^{235}\text{U}$  из исходного регенерата в зависимости от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

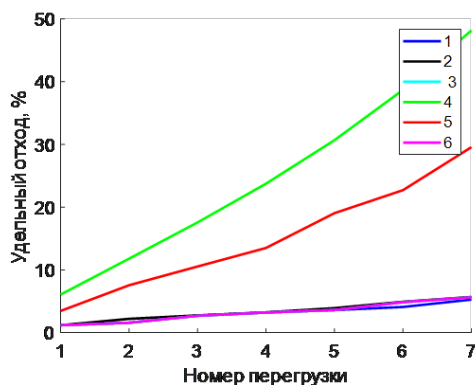


Рисунок 4.6 — Величину удельного отхода (на единицу исходного регенерата) в зависимости от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

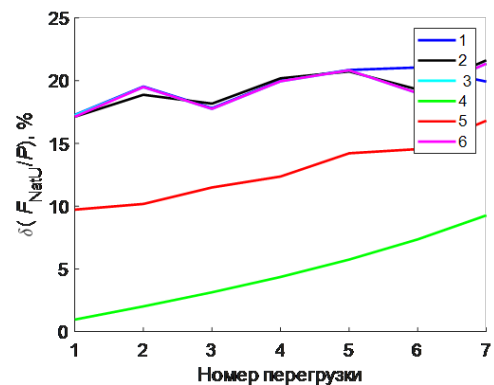


Рисунок 4.7 — Относительное изменение величины удельного расхода природного урана в двойном каскаде с замыканием в зависимости от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

Обозначения для рис. 4.4–4.7 приняты следующие. Кривая 1: оптимумы по расходу природного урана, кривая 2: оптимумы по затратам работы разделения, кривая 3: оптимумы по массе высокообогащенной фракции, кривая 4: минимум концентрации  $^{232}\text{U}$ , кривая 5: минимум концентрации  $^{236}\text{U}$ , кривая 6: максимум степени извлечения минимум  $^{235}\text{U}$  из регенерата урана.

В результате описанных выше процессов увеличивается и достигает значений, близких к 2, величина отношения (исходный регенерат)/продукт (рис. 4.8). Анализ зависимостей концентраций  $^{235}\text{U}$  и четных изотопов в регенерате, поступающем на обогащение после смешивания с высокообогащенной фракцией показывает, что все они повышается с каждой перегрузкой (рисунки 4.9–4.12). Однако при использовании в качестве критериев эффективности минимумов концентраций  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  в товарном НОУ концентрации всех указанных выше изотопов в исходном регенерате возрастают заметно интенсивнее. Важно при этом отметить, что на последних перегрузках концентрация  $^{235}\text{U}$  в исходном регенерате превышает величину, требуемую для финального продукта (рисунок 4.12). Это означает, что схема начинает обеднять смесь и «чистить» ее от четных, а не обогащать. Особенно сильно это проявляется при минимизации концентраций четных изотопов в продукте, поскольку в этих случаях концентрация  $^{235}\text{U}$  в исходном регенерате могут приближаться к 5% (рисунок 4.11). Подобные результаты говорят, в первую очередь, о нецелесообразности использования схемы в таком варианте для последовательного обогащения регенерата нескольких перегрузок с использованием в качестве критериев эффективности на каждом шаге требования минимальности концентраций  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  в товарном НОУ. Однако требуют дополнительных исследований возможности дальнейшей модификации предложенной схемы, в том числе, для более эффективного использования исходного регенерата с повышенным содержанием  $^{235}\text{U}$ . Одним из таких вариантов может стать расширение диапазона увеличения концентрации  $^{235}\text{U}$  в схеме, например, до 90%. Другие варианты могут быть основаны на введении дополнительных потоков для разбавления четных изотопов и снижения концентрации  $^{235}\text{U}$  до нужных значений.

Обозначения для рис. 4.8–4.12 приняты следующие. Кривая 1: оптимумы по расходу природного урана, кривая 2: оптимумы по затратам работы разделения, кривая 3: оптимумы по массе высокообогащенной фракции, кривая 4: минимум концентрации  $^{232}\text{U}$ , кривая 5: минимум концентрации  $^{236}\text{U}$ , кривая 6:

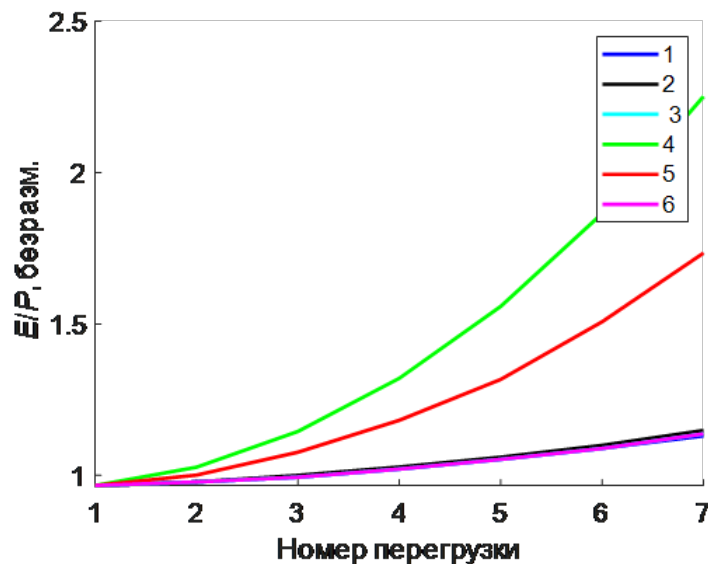


Рисунок 4.8 — Зависимость отношения потоков исходного регенерата и финального продукта (товарного НОУ) от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

максимум степени извлечения минимум  $^{235}\text{U}$  из регенерата урана),  $E$  – поток питающего каскадную схему регенерата,  $P$  – товарный НОУ.

Анализ изменения величины затрат работы разделения в зависимости от номера перегрузки и выбранного критерия эффективности показывает следующее. Для всех критериев, кроме случаев минимизации концентрации  $^{232}\text{U}$  или  $^{236}\text{U}$  затраты работы разделения сохраняются на определенном уровне, незначительно отличающемся от случая обогащения природного урана до соответствующей концентрации (рисунок 4.13). С увеличением номера перегрузки происходит незначительное снижение потерь работы разделения для этих случаев: с  $\approx 5\%$  до  $\approx 10\%$  (рисунок 4.14). При этом в случае минимизации концентраций изотопов  $^{232}\text{U}$  или  $^{236}\text{U}$  затраты работы разделения значительно выше и могут на десятки процентов превосходить аналогичные затраты для случая обогащения природного урана для получения эквивалентного количества требуемого НОУ.

Обозначения для рис. 4.13–4.14 приняты следующие. Кривая 1: оптимумы по расходу природного урана, кривая 2: оптимумы по затратам работы разделения, кривая 3: оптимумы по массе высокообогащенной фракции, кривая 4: минимум концентрации  $^{232}\text{U}$ , кривая 5: минимум концентрации  $^{236}\text{U}$ , кривая 6: максимум степени извлечения минимум  $^{235}\text{U}$  из регенерата урана.

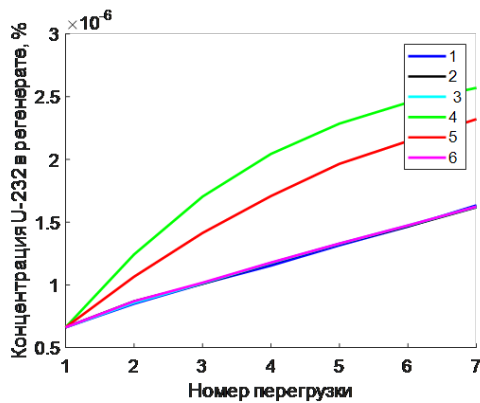


Рисунок 4.9 — Зависимость концентрации  $^{232}\text{U}$  в исходном регенерате от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

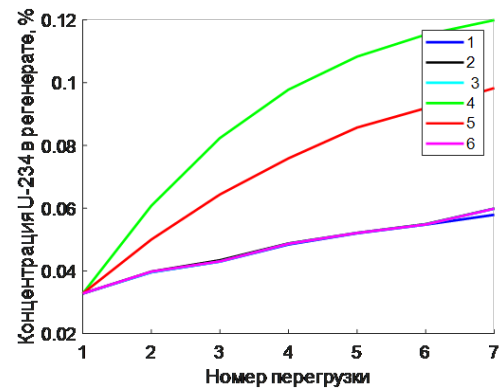


Рисунок 4.10 — Зависимость концентрации  $^{234}\text{U}$  в исходном регенерате от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

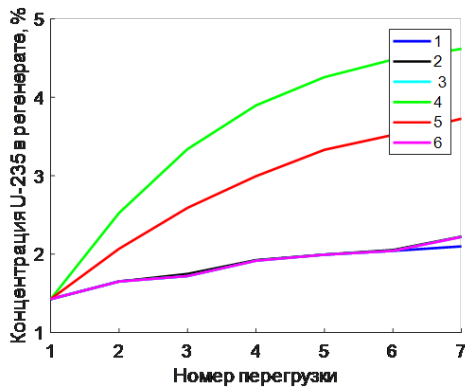


Рисунок 4.11 — Зависимость концентрации  $^{235}\text{U}$  в исходном регенерате от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

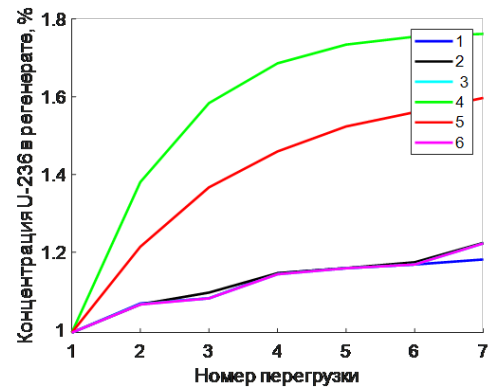


Рисунок 4.12 — Зависимость концентрации  $^{236}\text{U}$  в исходном регенерате от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

Рассматриваемая каскадная схема может работать в широком диапазоне изменения концентраций компонентов, в первую очередь, четных изотопов и  $^{235}\text{U}$  в исходном регенерате. Данный факт открывает возможности для применения схемы в условиях топливных циклов с увеличенной длительностью топливного цикла, а также в условиях многократного рецикла урана.

В зависимости от выбранного критерия эффективности для оптимизации схемы при расчете изотопного состава НОУ для каждой новой перегрузки, возможно обеспечить широкую вариативность параметров рассматриваемой каскадной схемы. При этом в случае выбора в качестве критериев эффектив-



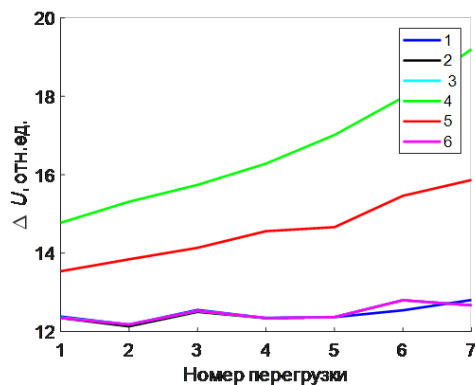


Рисунок 4.13 — Изменение величины удельных затрат работы разделения в двойном каскаде с замыканием в зависимости от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

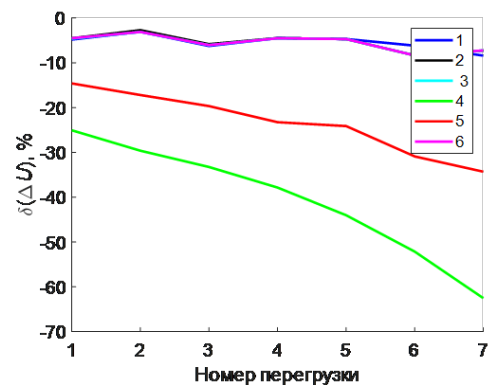


Рисунок 4.14 — Относительное изменение величины удельных затрат работы разделения в двойном каскаде с замыканием в зависимости от номера перегрузки для обогащения 4,95% для различных критериев эффективности.

ности величин удельного расхода природного урана, удельных затрат работы разделения, массы получаемого отхода или величины степени извлечения  $^{235}\text{U}$  из исходного регенерата оптимальные параметры схемы меняются незначительно. В то время, как при использовании в качестве критериев эффективности условий минимума концентраций  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  в товарном НОУ ключевые характеристики каскадов значительно отличаются от других критериев.

С ростом номера перегрузки происходит последовательно уменьшение расхода природного урана и затрат работы разделения. При этом на последних перегрузках экономия природного урана достигает величины 20% и более. Это означает, что экономия природного урана в цикле в среднем будет примерно на треть выше типичного значения в 15%. Причиной этому более эффективное использование  $^{235}\text{U}$  из регенерата.

### 4.3 Схема тройного каскада с НОУ-разбавителем и дополнительным разбавителем потока $P_2$ , возвращаемого в цикл

Другим вариантом модификации каскадной схемы, представленной на (рис. 4.1) стала схема тройного каскада [32]. Принцип ее работы состоит в следующем.

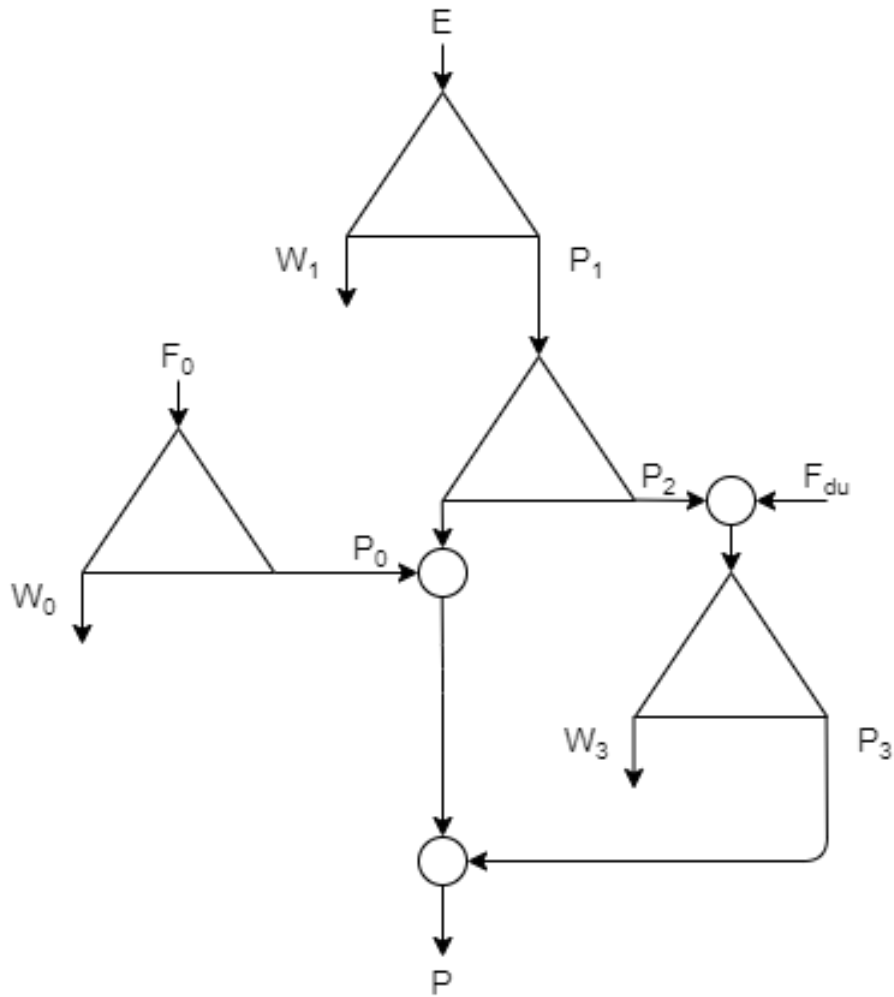


Рисунок 4.15 — Тройной каскад для обогащения регенерированного урана. Обозначения:  $E$  – поток регенерированного урана;  $P_1$  – поток отбора первого каскада, выступающий питанием второго каскада;  $P_2$  – поток отбора второго каскада;  $F_{du}$  – поток ОГФУ-разбавителя, смешиваемого с  $P_2$  перед подачей на вход третьего каскада;  $W_1$  – поток отвала первого каскада;  $W_2$  – поток тяжелой фракции (условный «отвал») второго каскада;  $P_0$  – поток НОУ-разбавителя;  $P$  – финальный продукт (товарный низкообогащенный уран (НОУ)), полученный смешиванием потоков  $W_2$ ,  $P_0$  и  $P_3$ , где  $P_3$  – отбор третьего каскада;  $W_3$  – отвал третьего каскада.

В реализации такой схемы поток легкой фракции второго каскада  $P_2$  с концентрацией изотопа  $^{235}\text{U}$  на уровне 20% перемешивается со складским ОГФУ и направляется на последующее обогащение в третий каскад (рис. 4.15). Пропорцию смешивания  $P_2$  с ОГФУ определяют исходя из возможности получить НОУ надлежащего качества при обогащении их смеси (оставаясь в рамках ограничений по четным изотопам). Остальные параметры схемы тройного каскада следует подбирать исходя из того, что финальный продукт будет получен сме-

шиванием трех потоков: низкообогащенного «чистого» разбавителя  $P_0$ , тяжелой «очищенной» фракции  $W_2$  второго каскада и, полученного при обогащении потока  $P_2$  и обедненного урана, изотопного состава  $P_3$ . Управляющими параметрами являются: концентрации на выходах  $P_1$  первого и  $P_2$  второго каскадов, а также в потоке НОУ-разбавителя  $P_0$ . При детерминированной их комбинации обеспечивается соответствие предзаданному отношению масс конечного продукта и исходного регенерата, за счет чего выполняется условие полного возврата. При этом проблема высокоактивного отхода решается без выхода за пределы концентрации допустимой для обогащения регенерата (20%). Также устраняется необходимость обращения с  $P_2$ , которое в схеме двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока  $P_2$  в цикл (рис. 4.2) связано с его отложенным вовлечением из-за зависимости от последующих поступлений на обогащение новых партий (последующих рециклов) регенерата.

Таким образом, решение проблемы накопления нештатного отхода, характерной для двойного каскада с НОУ-разбавителем, состоит в том, что поток легкой фракции второго каскада ( $P_2$ ) перемешивают с обедненным ураном и направляют на последующее обогащение в еще один каскад (крайний правый каскад на рисунке 4.15).

Для осуществления проектировочного расчета тройного каскада с НОУ-разбавителем, результатом которого будет нахождение параметров схемы, необходимых для задания при требуемых концентрациях в выходных потоках, выбираются переменные  $C_{W_2}^{235}$  и  $C_{P_0}^{235}$  при невязках, связанными с достижением требуемой концентрации  $^{235}\text{U}$  в продукте, с учетом поправки на  $^{236}\text{U}$ :  $C_{235}^P = C_{235}^P + \Delta C_{235}$ , а также с выполнением ограничения на концентрацию  $^{232}\text{U}$ , задавая содержание этого изотопа в продукте равным предельно допустимому значению, что необходимо для решения получившейся системы нелинейных уравнений (СНАУ). Такая постановка задачи, реализованная, например, в [86], позволила показать возможность решения задачи возврата регенерата в цикл для состава пятого рецикла при заданной пропорции регенерата к конечному продукту, соответствующей использованию всего выделенного из ОЯТ урана. Как показывают результаты анализа повторного обогащения регенерата пятого рецикла с помощью такой схемы, это операция ценой расхода дополнительных 25% работы разделения, удастся вернуть заданное количество переработанного урана, прошедшего пятикратное (5 топливных кампаний) облучение, сэкономив  $\approx 15\%$  природного урана, сравнивая приведенные показатели со схемой орди-

нарного каскада для обогащения природного урана, получающего на выходах в продукте и отвале такие же концентрации  $^{235}\text{U}$  (соответствующую  $C_{235}$  в продукте). В другом варианте реализации схемы с расходом дополнительных 25% работы разделения, удастся вернуть заданное количество переработанного урана, прошедшего пятикратное (5 топливных кампаний) облучение, сэкономив  $\approx 15\%$  природного урана, сравнивая приведенные показатели со схемой ординарного каскада для обогащения природного урана, получающего на выходах в продукте и отвале такие же концентрации  $^{235}\text{U}$  (соответствующую  $C_{235}$  в продукте) тройного каскада ценой расхода дополнительных 50% работы разделения, удастся вернуть заданное количество переработанного урана, прошедшего пятикратное (5 топливных кампаний) облучение, сэкономив  $\approx 23\%$  природного урана [86].

Для анализа возможностей схемы тройного каскада с НОУ-разбавителем, представим расчет, оценивающий издержки ее применения для возврата регенерата пятого рецикла. В качестве ключевых оцениваемых характеристик будем опираться на экономию природного урана, а также долю дополнительно задействуемых в каскаде центрифуг, по сравнению с ординарным каскадом для обогащения природного урана. Проведем сравнение со схемой с разбавлением регенерата природным ураном перед подачей в ординарный трехпоточный каскад 3.11 [90]. Обе сравниваемые схемы должны обеспечить производство НОУ коммерческого качества, то есть удовлетворяющего всем заданным условиям.

В таблице 10 представлены величина экономии природного урана, потребление регенерированного урана на единицу продукта, а также количество центрифуг для предложенной трехкаскадной схемы и модифицированного ординарного каскада, по сравнению с базовым вариантом – ординарным каскадом, обогащающим природный уран. Количество центрифуг для всех вариантов приводится к количеству центрифуг в ординарном каскаде для обогащения природного урана.

В табл. 11 показан изотопный состав НОУ коммерческого уровня, полученного в предлагаемом тройном каскаде.

Эти результаты показывают, что предложенная схема решает поставленную задачу. Сравнение с ординарным каскадом показывает, что даже при выбранном «грязном» составе регенерированного урана – составе пятого рецикла – можно сэкономить более трети природного урана, что намного больше, чем достижимо при использовании более простых модификаций. Однако, та-

Каскад	Экономия природного урана, %	Доп. разделительные мощности, %	Расход регенерата на ед. продукта
Ординарный моди- фицированный	7.1	3.6	49.2
Двойной каскад с НОУ-разбавителем	38.3	97.3	92.4

Таблица 10 — Оцениваемые параметры рассматриваемых схем

Массовое число	232	233	234	235	236
C, %	5.00e-7	6.88e-7	5.31e-2	5.11	0.57

Таблица 11 — Изотопный состав НОУ-продукта схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем и дополнительным разбавителем потока  $P_2$ , возвращаемого в цикл

кие преимущества влекут за собой увеличение затрат разделительной работы, а следовательно, и количества центрифуг по сравнению с ординарным трехпоточным каскадом, который обогащает природный уран (примерно на 97%). Схема также позволяет производить НОУ товарного качества, расходуя заранее определенное количество переработанного урана без нежелательных нештатных побочных продуктов, за исключением стандартных т.н. хвостов разделительного производства (потоков отходов) разделительных каскадов в виде обедненного урана.

Рассчитывая материальные балансы в этой схеме, исходя из предположения, что будет произведена ровно 21 тонна НОУ. Примерно такая масса урана требуется для загрузки реактора ВВЭР-1200 твэлами с обогащением 4,95%. Имея заданное отношение регенерата к конечному продукте 0,93, регенерированный уран будет израсходован из расчета 19,53 тонны на 21 тонну конечного продукта НОУ. В нашем случае первый каскад производит 17,5 т обедненного урана в потоке  $W_1$ , что дает  $\approx 2,03$  т  $P_1$  с концентрацией  $^{235}\text{U}$ , равной 9,41%. Поток  $P_1$  запитывает второй каскад, который, в свою очередь, производит «очищенную» смесь  $W_2$  (1,7 тонны, которая содержит 7,34%  $^{235}\text{U}$ ) и загрязненный  $P_2$  ( $\approx 332$  кг), который содержит 20%  $^{235}\text{U}$ .  $P_2$  поступает в третий каскад и там разбавляется 3298,88 т. обедненного урана с концентрацией  $^{235}\text{U}$  0,1%. В третьем

каскаде обедняющая часть состоит всего из 1 ступени, выдает  $\approx 3293,1$  тонны отходов  $W_3$  с  $0,093\%$   $^{235}\text{U}$ . НОУ-разбавитель  $P_0 \approx 13,2$  тонны смешивается с  $1,7$  тоннами  $W_2$ , образуя  $\approx 14,9$  тонны материала, которые затем, смешавшись с  $6,1$  тонны  $P_3$ , образуют  $21$  тонну конечного НОУ-продукта. Каскад, производящий НОУ-разбавитель  $P_0$  (с концентрацией  $^{235}\text{U}$   $4,9\%$ ), потребляет  $\approx 103,6$  тонны природного урана, отправляя в отвал  $W_0$   $90,4$  тонны (с концентрацией  $0,1\%$   $^{235}\text{U}$ ). В результате схема производит  $(90,4 + 17,5 + 3293) \approx 3401$  тонну обедненного урана. При этом на схему уходит  $\approx 3300$  тонн складских запасов обедненного урана. Следовательно, фактический выход обедненного урана составляет  $\approx 100$  тонн, при том что ординарный каскад для обогащения природного урана при производстве такого же количества продукта ( $21$  тонна) производит  $\approx 146$  тонн, то есть схема тройного каскада с НОУ-разбавителем и дополнительным разбавителем потока  $P_2$ , возвращаемого в цикл позволяет в полтора раза уменьшить накопление ОГФУ.

Также была предложена реализация поставленной задачи с помощью рассматриваемой схемы, в [86], демонстрирующей способ решения задачи возврата регенерата в цикл для состава пятого рецикла при заданной пропорции регенерата к конечному продукту, соответствующей использованию всего выделенного из ОЯТ урана, а также исключаящий накопление нештатного отхода за счет разбавления  $P_2$  обедненным гексафторидом с последующим обогащением. Как показывают результаты анализа повторного обогащения регенерата пятого рецикла с помощью такой схемы, осуществлять такую операцию можно с различными показателями затрат работы разделения, экономии природного урана, а также вовлечения ОГФУ. Например, ценой расхода дополнительных  $\approx 25\%$  работы разделения, удастся вернуть заданное количество переработанного урана, прошедшего пятикратное ( $5$  топливных кампаний) облучение, сэкономив  $\approx 15\%$  природного урана, при этом вовлекая в производство единицы конечного продукта  $\approx 31$  единицы смеси обедненного урана. Для экономии же природного урана на уровне  $\approx 23\%$ , необходимо, использовав  $\approx 74,5$  единиц ОГФУ на единицу продукта, допустив перерасход работы разделения на уровне  $\approx 50\%$ . Показатели приведены в соотношении с аналогичными для схемы ординарного каскада для обогащения природного урана, получающего на выходах в продукте и отвале такие же концентрации  $^{235}\text{U}$  (соответствующую  $C_{235}$  в продукте).

Стоит отметить, что представленные примеры приведены только в иллюстративных целях. Чтобы применить эту схему на практике, в первую очередь необходимо оптимизировать ее по выбранному критерию эффективности.

Рассматривая возможность постановки оптимизационной задачи для тройного каскада, в качестве управляющих оптимизационных переменных можно рассматривать: концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоках  $P_1$ ,  $P_2$  и  $W_3$  и отношение потоков  $F_{du}/P_2$ . Цель решения оптимизационной задачи: при заданных внешних условиях и выполнении заданных ограничений определить наилучшее значение критерия эффективности – расхода работы разделения каскадной схемы, в зависимости от варьируемых переменных.

Также, помимо минимума расхода работы разделения, оптимизационным критерием может выступать минимизация расхода природного урана, а также максимум суммарной степени извлечения  $^{235}\text{U}$  в схеме 4.3 и из регенерата 4.4 для тройного каскада, где  $RepU$  – это поток регенерата, а  $DepU_3$  – поток разбавляющего  $P_2$  ОГФУ.

$$U_{Rec}^{235} = \frac{LEUProduct \cdot C_{np}}{F_0 \cdot C_{NatU}^{235} + RepU \cdot C_{RepU}^{235} + DepU_3 \cdot C_{DepU}^{235}}, \quad (4.3)$$

$$RepU_{Rec}^{235} = \frac{W_2 \cdot C_{W_2}^{235} + P_3 \cdot C_{P_3}^{235} \cdot \frac{P_2 \cdot C_{P_2}^{235}}{P_2 \cdot C_{P_2}^{235} + DepU_3 \cdot C_{DepU}^{235}}}{RepU \cdot C_{RepU}^{235}} \quad (4.4)$$

Такой тип оптимизационной задачи также как и для предыдущих составных схем представляет собой задачу условной оптимизации функции многих переменных. В диссертационной работе предложена оригинальная методика, основанная на использовании современных методов условной оптимизации и реализованная в виде разработанного в НИЯУ МИФИ программного кода.

Для такого расчета расчета и оптимизации схемы тройного каскада предложена оригинальная методика, основанная на использовании современных методов условной оптимизации и реализованная в виде разработанного в НИЯУ МИФИ программного кода. Следует отметить, что в литературе по данной тематике отсутствуют методики оптимизации трех- и четырехкаскадных схем в случае разделения многокомпонентных смесей. Фактически подобные задачи решены впервые.



## Оптимизация схемы тройного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях

В диссертационной работе предложена оригинальная методика, основанная на использовании оптимизации и реализованная в виде разработанного в НИЯУ МИФИ программного кода, которая позволяет реализовывать описанный алгоритм для подбора наиболее эффективной схемы для заданных критериев. Рассмотрим подробнее алгоритм подбора параметров каскадной схемы, который позволяет осуществить проектировочный расчет тройного каскада с НОУ-разбавителем.

1. варьируется (с шагом в 1%) концентрация  $^{235}\text{U}$ , задаваемая в потоке отбора  $P_2$  второго каскада. В качестве начальной точки задается значение 7%, а финальной – верхний порог ограничения ан обогачение  $^{235}\text{U}$ : 20% или 90%;
2. внутри приведенного выше цикла со счётчиком, в котором переменная концентрации  $^{235}\text{U}$  изменяет своё значение от заданного начального значения (7%) до конечного значения (20% или 90%) с шагом 1%, для каждого значения этой выполняется тело цикла, в котором осуществляется подбор концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке отбора  $P_1$  первого каскада. Они представляет собой цикл со счетчиком с шагом в 1%, где варьируется концентрация  $^{235}\text{U}$ , задаваемая в потоке отбора  $P_1$  первого каскада, начиная с 5% до текущего значения концентрации  $^{235}\text{U}$  в  $P_2$  минус 2%.
3. при определенных этими двумя циклами (варьирования  $^{235}\text{U}$  в  $P_2$  и вложенным циклом варьирования  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$ ) концентрациях  $^{235}\text{U}$  в потоках отбора первого и второго каскада, осуществляется расчет системы нелинейных алгебраических уравнений с помощью вычислительного пакета MINPACK [87], переменными в которой выступают концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке отвала второго каскада, в потоке отбора третьего каскада, а также в потоке, полученном при смешении потоков  $P_0$  и  $W_2$  нарабатывающего НОУ-разбавитель. Невязками для этой системы служат расхождения, заданные условием задачи:

- а) концентрации  $^{235}\text{U}$  в конечном НОУ-продукте, с учетом поправки на  $^{236}\text{U}$ :  $C_{235}^P = C_{235}^P + \Delta C_{235}$  от расчетного значения;



- б) концентрации  $^{232}\text{U}$  в конечном продукте от расчетного значения этой концентрации.

При решении заданной СНАУ, сходимость достигается с помощью квазиньютоновского численного алгоритма trust-region, для которого якобиан вычисляется методом автодифференциации;

4. для каждой итерации цикла со счетчиком выполняется оптимизационный алгоритм поиска глобального оптимума для заданного критерия эффективности, с помощью которого подбираются такие параметры схемы как: пропорция потока  $P_2$  в питании третьего каскада; концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке отвала третьего каскада в интервалах  $[0.00001, 0.5]$  и  $[0.08\%, 0.13\%]$  соответственно. Для этого используется алгоритм оптимизации SHGO (simplicial homology global optimization) вычислительного пакета SciPy для Python [91].
5. на каждой итерации с помощью подбираемых значений переменных рассчитываются основные параметры входящих в схему ординарных каскадов;
6. затем, на их основании необходимо рассчитать пропорции потоков  $W_2$ ,  $P_3$  и  $P_0$  в конечном продукте, для того чтобы получить массив значений изотопных концентраций для этого состава. Для этого, на основе вычисленных отношений потоков  $\frac{P_1}{RepU}$ ,  $\frac{W_2}{P_1}$  и  $\frac{P_3}{F_3}$  для первого, второго и третьего каскадов, а также заданной условиями задачи пропорции  $\frac{RepU}{P}$ , где  $RepU$  – это поток регенерата, а  $P$  – поток финального НОУ-продукта, вычисляются необходимые параметры каскада;
7. поочередно складывая покомпонентно умноженные доли  $\frac{W_2}{P}$ ,  $\frac{P_3}{P}$  и  $\frac{P_0}{P}$  на соответствующие изотопные концентрации потоков  $W_2$ ,  $P_3$  и  $P_0$ , получается массив изотопных концентраций конечного НОУ-продукта. Для полученных в этом массиве значений концентраций  $^{232}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ , рассчитываются текущие величины расхождения (невязки) для двух равенств в СНАУ. Для каждой из них относительная ошибка (отклонение от единицы отношений левой и правой частей равенства) не должна превышать  $10^{-8}$ ;
8. соответствие выполненных условий для невязок означает схождение численного метода – завершение вычислительных итераций и сохранением полученного решения для заданных внешними циклами значений концентраций  $^{235}\text{U}$  в  $P_1$  и  $P_2$ , а также переменных (1) пропорция потока

$P_2$  в питании третьего каскада и (2)концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке отвала третьего каскада, при которых достигается оптимум для заданного критерия;

9. для полученного решения затем вычисляются основные характеристики схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем, такие как расход работы разделения схемы или расход дополнительного сырья, которые позволяют оценить критерии эффективности каскадной схемы. Их значения также сохраняются для возможности последующего выбора решения исходя из выбора критерия эффективности.

Для демонстрации возможностей, получаемых применением предложенных в диссертации методик оптимизации, представим серию расчетов тройного каскада с НОУ-разбавителем, получив интегральные показатели для различных оптимизационных критериев.

Анализируя результаты, представленные в 12, заметим, что для оптимумов извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата и расхода работы разделения полученные решения идентичны. Эти решения позволяют вовлечь регенерат второго рецикла в ЯТЦ, оптимальным образом извлекая  $^{235}\text{U}$ , выигрывая по этому показателю двойную схему, где  $P_2$  не используется в производстве НОУ-продукта, не затрачивая дополнительную работу разделения по сравнению со схемой ординарного каскада для обогащения природного урана. Схема также позволяет найти решения, минимизирующие расход природного урана, в которых его затраты на единицу продукта будут на порядок меньше, однако это достигается за счет высокого расхода ОГФУ, и как следствие, больших потерь работы разделения ( $>100\%$ ), а также ухудшения извлечения  $^{235}\text{U}$ .

Анализируя результаты, представленные в 13, заметим, что для оптимумов суммарной степени извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата и расхода работы разделения полученные решения идентичны. Однако для них наблюдается низкая степень извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата  $\approx 5\%$ . При этом в решении с оптимумом извлечения  $^{235}\text{U}$  из регенерата, очень низка интегральная степень извлечения  $^{235}\text{U}$  и составляет  $\approx 5\%$ .

Как результат, схема тройного каскада с НОУ-разбавителем и дополнительным разбавителем потока  $P_2$ , возвращаемого в цикл, позволяя в полноте решить поставленную задачу, не оставляет никакого нештатного отхода, требующего особых мер обращения. В конечном итоге образуется только штатный отход в виде отвалов  $W_1$  и  $W_3$ , процедуры обращения с которыми на

П-р   К-й опт-и	max И	max ИР	min PP	min NatU
Сумм. степень изв-я	0.778	0.07535	0.07535	0.03058
Степень изв-я из рег-та	0.7976	0.8765	0.8765	0.7504
Потери PP, %	6.814	−1.127	−1.127	137.4
Расх. пр. U на ед. прод.	6.217	6.246	6.246	0.922
Эк. пр. U, %	21.62	21.24	21.24	88.38
U-235 в P1, %	5.0	5.0	5.0	15.0
U-235 в W2, %	4.227	4.708	4.708	14.1
U-235 в P0, %	5.425	5.321	5.321	5.456
U-235 в P2, %	16.0	20.0	20.0	20.0
U-232 в P1, %	$2.443e - 6$	$2.443e - 6$	$2.443e - 6$	$7.431e - 6$
U-232 в W2, %	$1.515e - 6$	$1.998e - 6$	$1.998e - 6$	$6.329e - 6$
U-232 в P2, %	$1.564e - 5$	$2.526e - 5$	$2.526e - 5$	$1.357e - 5$
U-234 в P1, %	0.1198	0.1198	0.1198	0.3672
U-234 в W2, %	0.09223	0.1084	0.1084	0.3349
U-234 в P2, %	0.512	0.7049	0.7049	0.5472
U-236 в P1, %	2.942	2.942	2.942	6.159
U-236 в W2, %	2.69	2.856	2.856	5.955
Уд. сумм. поток к-а 2	6.009	2.627	2.627	0.2777
Уд. сумм. поток доп. к-а	2285.0	2285.0	2285.0	339.3
Доля P2 в F3	0.002519	$1.0e - 5$	$1.0e - 5$	$1.0e - 5$
U-235 в W3, %	0.13	0.13	0.13	0.1275
U-235 в P3, %	5.319	4.617	4.617	4.253
P3, кг	74.86	31.42	31.42	1219.0
U-232, %	$5.0e - 7$	$4.945e - 7$	$4.945e - 7$	$4.552e - 7$
U-234, %	0.05795	0.05973	0.05973	0.04356
U-235, %	5.137	5.155	5.155	5.072
U-236, %	0.6463	0.706	0.706	0.4194
P1, кг	372.8	372.8	372.8	122.6
W2, кг	348.3	365.6	365.6	103.9
P0, кг	1056.0	1082.0	1082.0	155.7
P2, кг	24.48	7.127	7.127	18.64

Таблица 12 — Параметры схемы тройного каскада с НОУ-разбавителем при различных критериях оптимизации для обогащения регенерата второго рецикла.

П-р   К-й опт-и	max И	max ИР	min PP	min NatU
Сумм. степень изв-я	0.7531	0.04262	0.7531	0.02461
Степень изв-я из рег-та	0.05408	0.7628	0.05408	0.648
Потери PP, %	−0.4811	11.38	−0.4811	173.3
Расх. пр. U на ед. прод.	7.866	6.882	7.866	0.2052
Эк. пр. U, %	0.8189	13.23	0.8189	97.41
U-235 в P1, %	5.095	5.0	5.095	9.0
U-235 в W2, %	4.923	4.334	4.923	7.583
U-235 в P0, %	4.963	5.428	4.963	4.736
U-235 в P2, %	16.0	18.0	16.0	16.0
U-232 в P1, %	$1.425e - 5$	$5.191e - 6$	$1.425e - 5$	$9.429e - 6$
U-232 в W2, %	$1.257e - 5$	$2.852e - 6$	$1.257e - 5$	$5.601e - 6$
U-232 в P2, %	0.0001205	$5.087e - 5$	0.0001205	$2.834e - 5$
U-234 в P1, %	0.2841	0.1944	0.2841	0.3528
U-234 в W2, %	0.2681	0.1507	0.2681	0.2694
U-234 в P2, %	1.295	1.048	1.295	0.765
U-236 в P1, %	4.239	5.446	4.239	9.226
U-236 в W2, %	4.167	5.095	4.167	8.432
U-236 в P2, %	8.804	12.3	8.804	13.14
Mk1	234	238	234	238
Mk2	232	232	232	232
Уд. сумм. поток к-а 1	7.501	371.5	7.501	441.2
Уд. сумм. поток к-а 2	0.06838	6.21	0.06838	1.869
Уд. сумм. поток доп. к-а	2828.0	2530.0	2828.0	72.87
Доля P2 в F3	0.25	$1.0e - 5$	0.25	$1.062e - 5$
U-235 в W3, %	0.105	0.13	0.105	0.1275
U-235 в P3, %	4.896	4.616	4.896	4.939
P3, кг	0.8097	52.46	0.8097	1315.0
U-232, %	$1.502e - 7$	$5.0e - 7$	$1.502e - 7$	$5.0e - 7$
U-234, %	0.04393	0.06286	0.04393	0.04301
U-235, %	4.963	5.208	4.963	5.156
U-236, %	0.04464	0.89	0.04464	0.7112
P1, кг	15.59	271.6	15.59	149.5
W2, кг	15.35	258.4	15.35	124.4
P0, кг	1463.0	1168.0	1463.0	40.04
P2, кг	0.2429	13.23	0.2429	25.17

Таблица 13 — Параметры схемы тройного каскада с НОУ-разбавителем при

разделительном производстве технологически отработаны. Если получить их смешением ( $W_1$  и  $W_3$ ) обедненный уран, он будет содержать изотопы  $^{232,234}\text{U}$  в количествах в десятки/сотни раз сниженных, относительно исходного регенерата. Следовательно, полученный в такой схеме обедненный уран может быть переведен в двуокись урана, например, при помощи установки «W-ЭХЗ». Отсутствие нештатных отходов, загрязненных четными изотопами и является отличительным достоинством рассмотренной схемы, тогда как недостатком выступают дополнительные потери работы разделения, возникающие при перемешивании потока  $P_2$  и подмешиваемого к нему в качестве разбавителя ОГФУ.

В качестве итогового списка характеристических особенностей схемы тройного каскада следует обозначить следующие:

1. применима для обогащения регенерированного урана в условиях многократного рецикла и позволяет получать продукт, отвечающий всем требованиям по концентрациям четных изотопов для регенерата различного исходного состава как показано на рассматриваемых входных изотопных составах;
2. достоинством схемы является полное отсутствие нештатных отходов, требующих специального обращения, поскольку на выходе из схемы, помимо основного продукта, возникают только потоки обедненного урана в виде отвалов каскадов схемы. Причем, в отличие от схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем, отход отсутствует при любом варианте использования: как для однократного обогащения регенерированного урана, так и в условиях постоянных поступлений партий регенерированного урана последовательных перегрузок реактора;
3. как и предшествующие схемы, схема позволяет задействовать для воспроизводства ядерного топлива накопленный в значительных количествах обедненный уран;
4. в схеме отделены участки обогащения регенерированного урана и участок обогащения обедненного или природного урана (каскад, расположенный на схеме слева (рис. 4.15)), не загрязненного четными изотопами. В дальнейшем это позволит использовать оборудование этого каскада для обогащения природного урана или другого сырьевого материала, не загрязненного четными изотопами;
5. получаемый в схеме отвал регенерированного урана в потока  $W_1$  и  $W_3$  имеет содержание изотопа  $^{232}\text{U}$  ниже, чем исходный регенерат. Подоб-

ный материал можно длительно хранить или отправить на переработку в установке дефторирования. В случае же необходимости дополнительного понижения концентраций четных изотопов данный поток может быть дополнительно разбавлен конечными отвалами с обогащением ниже 0,13%.

6. недостатком схемы являются потери работы разделения из-за необходимости:
  - а) обеднять отбор первого каскада в последующем втором каскаде;
  - б) смешивание потоков  $W_2$  с НОУ-разбавителем  $P_0$ , а затем и с  $P_3$  в которых различается содержание изотопа  $^{235}\text{U}$ ;
  - в) смешивания потоков  $P_2$  и  $F_{du}$  на входе в третий каскад.

#### 4.4 Схема независимой утилизации побочного продукта легкой фракции второго каскада схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем

В диссертационной работе также предложен способ обращения с  $P_2$  с содержанием  $^{235}\text{U}$  на уровне 20%, который позволяет вовлечь выведенный из системы схемой двойного каскада с НОУ-разбавителем изотоп (рис. 4.1)  $^{235}\text{U}$ . Предлагаемая схема направлена на решение следующих задач.

1. Сокращение доли потребляемого обедненного урана при сохранении возможности использования высокообогащенного побочного продукта;
2. Обеспечение полного возврата регенерированного урана в топливный цикл;
3. Повышение эффективности использования делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$  из регенерата;
4. Увеличение экономии природного урана на производство единицы свежего топлива для загрузки легководного реактора.

Принцип схемы, изображенной на рис. 4.16, представляющей из себя модификацию схемы двойного каскада с НОУ-разбавителями (рис. 4.1) состоит в следующем. Образовавшаяся на легком конце второго каскада изотопная легкая фракция  $P_2$  разбавляется потоком складского ОГФУ ( $F_{du}$ ) до такого уровня

$^{235}\text{U}$  в их смеси, который соответствует концентрации  $^{235}\text{U}$  в потоке дополнительного разбавителя в виде низкообогащенного урана ( $F_{leu}$ ), изготавливаемого из природного урана. необходимого в продукте, с добавкой, которая учитывает компенсацию  $^{236}\text{U}$ . Пропорцию этого НОУ-разбавителя подбирают таким образом, чтобы при обогащении полученной из этих трех компонентов смеси в ординарном каскаде, при достижении обогащаемой смесью на легком конце каскада (в  $P_{add}$ ) концентрации  $^{235}\text{U}$  требуемой в конечном НОУ-продукте, рассчитываемой с поправкой на компенсацию  $^{236}\text{U}$ , достигалось соответствие содержания  $^{232}\text{U}$  заданному предельному значению.

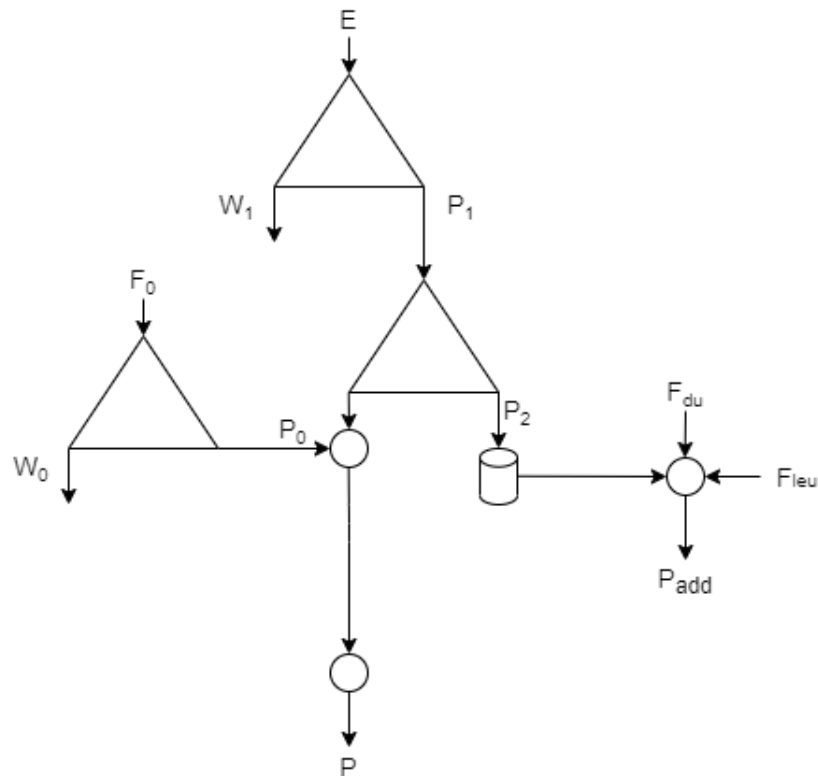


Рисунок 4.16 — Схема независимого вовлечения загрязненной изотопом  $^{232}\text{U}$  фракции с разбавлением обедненным и природным ураном

Расчет целевых показателей схемы – доли дополнительного НОУ-продукта, полученного из  $P_2$ , от новой ТВС (469 кг), а также экономии природного урана, производился на основе данных составов второго и пятого рециклов (см. постановку задачи), а также предположения двукратного увеличения предела содержания  $^{232}\text{U}$  в продукте, дополнительно произведенном из  $P_2$  ( $1 \cdot 10^{-7}\%$  вместо  $5 \cdot 10^{-7}\%$ ). Результаты вычислений представлены в таблице 14.

Проведем анализ численных результатов расчета. Значения в столбце «Дополнительный продукт из  $P_2$ , доля новой ТВС %» соответствуют доле дополнительно произведенного НОУ из побочного  $P_2$ , образовавшегося в процессе

ПДК $^{232}\text{U}$	Цикл №	$P_2$ , кг	Дополнительный продукт из $P_2$ , доля новой ТВС, %	Экономия природного урана, %
1.e-6%	2	1.09	7.11	14.6
	5	0.92	10.21	6.3
5.e-7%	2	1.33	14.22	7.3
	5	0.92	20.42	3.1

Таблица 14 — Результаты вовлечения  $P_2$  в производство дополнительного НОУ-продукта. Обозначения: ПДК  $^{232}\text{U}$  – предельно допустимая концентрация  $^{232}\text{U}$  в дополнительно производимом на основе  $P_2$  продукте.

обогащения топлива из регенерата для одной ТВС (469 кг), а экономия природного урана приведена относительно схемы ординарного каскада для обогащения природного урана.

Как можно заключить из результатов, представленных в таблице 14, предлагаемый способ использования  $P_2$  через модификацию схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем позволяет экономить дополнительное количество природного урана относительно двойного модифицированного каскада, в котором не предполагается задействование потока легкой фракции второго каскада. А эффект более значителен для случаев, когда задействуется побочный продукт  $P_2$  двойного каскада, образующийся на начальных стадиях рециклирования уранового топлива. В рассматриваемом случае – это второй рецикл (табл. 14). Схема рис. 4.16 также показывает себя как более предпочтительная в экономии природного урана (вдвое выигрышнее, согласно табл. 14), когда предельно допустимая концентрация  $^{232}\text{U}$  в получаемом из  $P_2$  конечном продукте допускается на уровне в два раза выше ( $1 \cdot 10^{-7}\%$  вместо  $5 \cdot 10^{-7}\%$ ). Значение экономии природного урана соответствует доле  $P_2$ , смешанной с обедненным ураном  $F_{du}$ , до того, как он будет смешан с НОУ-разбавителем  $F_{leu}$ , полученным из природного урана. Важно заметить, что значение этой доли соответствует экономии работы разделения, которая, в случае отказа от использования  $P_2$ , была бы затрачена на прямое обогащение природного урана в ординарном каскада для производства аналогичного замещающего количества свежего НОУ-продукта.

Итак, накопленный в ходе производства одной ТВС из регенерата побочный продукт  $P_2$  можно использовать для производства дополнительных  $\approx 7\%$  свежего НОУ-продукта от дополнительной топливной сборки. Это соответству-



ет возможности произвести дополнительную 15-ю тепловыделяющую сборку из накопленного  $P_2$ , образовавшегося при производстве предыдущих четырнадцати ТВС. Таким образом, для современного легководного реактора, такого как, например, российский ВВЭР-1200 или европейский PWR, где активная зона состоит из более чем 150 тепловыделяющих сборок, взяв за основу предложенную схему, можно изготовить дополнительно более 10 ТВС.

В качестве выводов, относящихся ко всем рассмотренным схемам, приведем следующие:

1. схемы на основе двойного каскада, использующие НОУ-разбавитель, принципиально пригодны для решения задачи обогащения регенерированного урана в рамках многократного рецикла урановой составляющей топлива легководных реакторов. При этом каждая из схем имеет собственные достоинства и недостатки;
2. характерным недостатком схемы, не предполагающей утилизацию нештатного отхода, образующегося в потоке  $P_2$ , является проблема с обращением с этим материалом, с высоким содержанием как четных изотопов (на 1-2 порядка выше, чем пределы для товарного НОУ) и  $^{235}\text{U}$  (до 20% или, в некоторых случаях, до 90%, в зависимости от выбранного режима работы каскадной схемы). Одним из вариантов обращения с ним, помимо схемы независимой утилизации побочного продукта легкой фракции второго каскада схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем (рис. 4.16), может стать его перемешивание с отвалом первого каскада при обогащении регенерата. Оценки показали, что в этом случае возможно получить обедненный уран с приемлемым содержанием  $^{232}\text{U}$  (не выше  $5 \cdot 10^{-7}\%$ );
3. характерными недостатком схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем с возвратом потока  $P_2$  в цикл (рис. 4.2) является возврат значительной части четных изотопов на вход каскадной схемы;
4. характерным недостатком схемы тройного каскада (рис. 4.15) являются дополнительные затраты работы разделения по отношению к схемам двойного каскада с НОУ-разбавителем, возникающие при обогащении разбавленного обедненным ураном отхода второго каскада схемы, загрязненного четными изотопами.

Анализ эффективности предложенных каскадных схем с точки зрения потерь  $^{235}\text{U}$  показал, что перспективными вариантами для дальнейшей тех-

нико-экономической проработки являются каскадные схемы двойного каскада с НОУ-разбавителем (рис. 4.1) и тройного каскада (рис. 4.15). Схема двойного каскада с НОУ-разбавителем на каждом из рассмотренных рециклах позволяет извлечь более 80% от массы  $^{235}\text{U}$  из исходного регенерированного урана, поступившего на обогащение.

Для каждой из предложенных схем разработаны оригинальные методики расчета и оптимизации ее переменных по критерию минимума расхода работы разделения 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.

Для выбора конкретного варианта каскадной схемы для организации производственного процесса, необходим детальный технико-экономический анализ каждой из схем на основе их интегральных показателей, таких как расход сырьевых материалов и работы разделения, в контексте всей цепочки ядерного топливного цикла, а также 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 каскадах, концентрирующие в легкой фракции  $\alpha$ -активные изотопы  $^{232,234}\text{U}$ .

## Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем. 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 МОХ 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 характери-

стики, 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 сокращений и условных обозначений

	$q_0$	коэффициент разделения
	$N$	длина каскада (число ступеней)
$f$	$N + 1 - f$	число ступеней в обеднительной и обогатительной частях.
	$n$	
	$k$	индексы целевого ( $^{235}\text{U}$ ) и опорного компонент.
	$F_i$	
	$P_i$	потоки питания, отбора и отвала, где $i$ – индекс каскада.
	$W_i$	
	<b>ЛВР</b>	легководный реактор
	<b>ВВЭР</b>	водо-водяной энергетический реактор
	<b>ЯТЦ</b>	ядерный топливный цикл
	<b>ЗЯТЦ</b>	замкнутый ядерный топливный цикл
	<b>ТВС</b>	тепловыделяющая сборка
<b>МОХ-топливо</b>		ядерное топливо, состоящее из смеси диоксидов урана и плутония
	<b>ОЯТ</b>	Облученное ядерное топливо, извлеченное из ядерного реактора после использования и для этой цели в имеющейся форме более непригодное
	<b>РАО</b>	Радиоактивные отходы. Существуют подклассы радиоактивных отходов: высокоактивные (ВАО), среднеактивные (САО), низкоактивные (НАО)
	<b>НОУ</b>	низкообогащенный уран
	<b>ВОУ</b>	высокообогащенный уран
	<b>ОГФУ</b>	обедненный гексафторид урана
	<b>РР</b>	работа разделения
	<b>ЕРР</b>	1 кг работы разделения, единица работы по разделению изотопов. Мера усилий, затрачиваемых на разделение материала определённого изотопного состава на две фракции с отличными изотопными составами; не зависит от применяемого процесса разделения.
	$UF_6$	гексафторид урана

$C_8H_3F_{13}$  фреон-346

**ASTM** международное общество по испытаниям и материалам

**ASTM** международное общество по испытаниям и материалам

**CHAU** система нелинейных алгебраических уравнений

## Приложение

Каскад   П-р	Уд. расход р-та	ЕРР
С доп. питанием	0.01686	11.82
С доп. продуктом	0.07994	11.95
С доп. потоком питания	0.7552	10.81

Таблица 15 — Параметры каскадов.

Каскад	Экономия ЕРР, %	Уд.расход Регенерата, %	Уд.расход ОГФУ, %	Теор.ст
1	7.31	1.04	0.49	
2	100	41.63	8.26	
3	10.07	6.08	0.93	
4	15.08	25	0.93	3
4	23.13	50	0.93	7

Таблица 16 — Таблица сравнения каскадов.

## 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. Storing Spent Fuel until Transport to Reprocessing or Disposal. — Vienna : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2019. — (Nuclear Energy Series ; NF-T—3.3).
6. Use of Reprocessed Uranium : Text. — 02/2019. — <https://www.iaea.org/publications>
7. Б.В. Никипелов, В.Б. Никипелов, «Судьбы Уранового Регенерата», Бюллетень По Атомной Энергии, 9 (2002): 34.
8. Kazuki Hida. Simultaneous Evaluation of the Effects of  $^{232}\text{U}$  and  $^{236}\text{U}$  on Uranium Recycling in Boiling Water Reactors / Kazuki Hida, S. Kusuno, S. Takeshi // Nuclear Technology. — 1986. — т. 75, № 2. — с. 148—159.
9. Исследование Каскадных Схем Для Разделения Многокомпонентной Смеси Изотопов Урана-232, -234, -235, -236, -238 При Регенерации Отработавшего Топлива АЭС / Р. Сиденко [и др.] // МИФИ, гос. рег. № ИК М31782. — . — с. 30.
10. Заключительный Отчет о НИР «Технико-экономический Анализ Возможных Вариантов Вовлечения Регенерируемых При Переработке ОЯТ Материалов в Топливные Циклы ВВЭР Большой Мощности» / В. Пшенин [и др.] // Институт промышленных ядерных технологий НИЯУ МИФИ, № ГР 01201278149. — Инв. № 700/О-39. — 2012. — с. 206.



11. *de la Garza, A.* Uranium-236 in Light Water Reactor Spent Fuel Recycled to an Enrichment Plant / A. de la Garza // Nuclear Technology. — 1977. — т. 32. — с. 176—185.
12. *Райс, Т.* Изготовление Оксидного Топлива Из Регенерированного Урана На Действующих Заводах / Т. Райс // Атомная техника за рубежом. — 1994. — № 12. — с. 19—22.
13. *Жиро, Ж.* Экономические Преимущества Переработки Ядерного Топлива / Ж. Жиро, Ж. Девезо де Лаверне // Атомная техника за рубежом. — 1997. — № 9. — с. 17—21.
14. *Лебедев, В.* Замкнутый Топливный Цикл АЭС России. Проблемы и Перспективы / В. Лебедев, В. Д. Давиденко, А. Архангельская // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. — 1999. — № 2. — с. 96—102.
15. Evolution of Isotopic Composition of Reprocessed Uranium during the Multiple Recycling in Light Water Reactors with Natural Uranium Feed / A. Y. Smirnov [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2012. — Dec. 1. — Vol. 75, no. 13. — P. 1616—1625.
16. Согласованный Подход к Моделированию Выгорания При Облучении и Молекулярно-Селективных Процессов в Разделительном Каскаде Для Оценки Перспектив Раздельного Рецикла Регенерированного Урана Топлива в Легководном Реакторе / В. Ю. Бландинский [и др.]. — 2018.
17. *Coleman, J. R.* Evaluation of Multiple, Self-Recycling of Reprocessed Uranium in LWR / J. R. Coleman, T. W. Knight // Nuclear Engineering and Design. — 2010. — May 1. — Vol. 240, no. 5. — P. 1028—1032.
18. *Проселков, В.* Анализ Возможности Использования Топлива На Основе Регенерата Урана в ВВЭР 1000 / В. Проселков, С. Алешин, С. Попов. — 2003.
19. Influence of  $^{236}\text{U}$  on the Efficacy of Recycling Regenerated Uranium in VVER Fuel / A. A. Dudnikov [et al.] // Atomic Energy. — 2016. — Feb. 1. — Vol. 119, no. 4. — P. 291—296.
20. *Матвеев, Л.* Уран-232 и Его Влияние На Радиационную Обстановку а Ядерном Топливном Цикле / Л. Матвеев, Э. Центер. — 1985.
21. Proliferation Resistance Features of Reprocessed Uranium in Light Water Reactor Fresh Fuel / K. Abbas [и др.] // ESARDA Bulletin. — 2013. — июль.

22. *Gresley, J.* Enriching Recycling Uranium / J. Gresley // Atom. — 1988.
23. Исследование Проблемы Вовлечения Отработанного Продукта в Топливный Цикл. Анализ Оптимального Использования Топлива в Реакторах ВВЭР и Возврата Отработавшего Горючего в Топливный Цикл. / Б. Ксенофонтов [и др.] // МИФИ. — 1988.
24. *De la Garza, A.* Multicomponent Isotope Separation in Cascades / A. de la Garza, G. A. Garrett, J. E. Murphy // Chemical Engineering Science. — 1961. — Sept. 1. — Vol. 15, no. 3. — P. 188–209.
25. Analysis of the Reuse of Uranium Recovered from the Reprocessing of Commercial LWR Spent Fuel : Report / G. D. DelCul [et al.]. — 01/02/2009.
26. *Дьяченко, А. И.* Использование Регенерированного Урана Из Топлива с Глубоким Выгоранием | Известия Вузов. Ядерная Энергетика / А. И. Дьяченко, Н. Балагуров, В. Артисюк. — 2012.
27. *Смирнов, А. Ю.* Каскадные Схемы в Задачах Исследования Закономерностей Изменения Изотопного Состава Многократно Регенерированного Урана / А. Ю. Смирнов, Г. А. Сулаберидзе, В. А. Невиница. — 2012.
28. *Сулаберидзе, Г. А.* О Некоторых Разделительных Проблемах При Вовлечении Регенерированного Урана в Топливный Цикл / Г. А. Сулаберидзе, В. Д. Борисевич, С. Цюаньсинь // (Сб. Докладов IX Всероссийской (Международной) Научной Конференции «Физико-Химические Процессы При Селекции Атомов и Молекул»). — Россия, Звенигород, 2004. — с. 78–85.
29. Обогащение Регенерированного Урана в Двойном Каскаде Газовых Центрифуг с Его Максимальным Возвратом в Производство Топлива / А. Ю. Смирнов [и др.]. — 2018.
30. *Прусаков, В.* Коррекция Изотопного Состава Регенерированного Урана По  $^{232}\text{U}$  Центробежным Методом с Введением Газа-Носителя / В. Прусаков, А. Сазыкин, Л. Соснин. — 2008.
31. *Игнатьев, В. Н.* Влияние Вида Топлива на Характеристики Воспроизводства В Реакторах Различного Типа / В. Н. Игнатьев, Г. С. Филиппов, В. А. Чирков // Научно-Технический Вестник Поволжья. — 2020. — № 6.
32. 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.

33. *Selvaduray, G.* Survey of Nuclear Fuel Reprocessing Technologies / G. Selvaduray, M. K. Goldstein, R. N. Anderson // Conservation & Recycling. — 1979. — Jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 93—134.
34. *Балихин, А. В.* О Состоянии И Перспективах Развития Методов Переработки Отработавшего Ядерного Топлива. Обзор / А. В. Балихин // Комплексное Использование Минерального Сырья. — 2018. — 1 (304). — с. 71—87.
35. *Ефименко, Н. А.* Проблемы И Перспективы Развития Бизнеса Госкорпорации "Росатом" В Сфере Back-End / Н. А. Ефименко, И. А. Ухалина, С. П. Агапова // Успехи Современной Науки И Образования. — 2017. — т. 2, № 1. — с. 144—147.
36. 05.05-19Л.394 Проверка новых технологий переработки ОЯТ АЭС для завода РТ-2 // РЖ 19Л. Технология Неорганических Веществ И Материалов. — 2005. — № 5.
37. Пятый Национальный Доклад Российской Федерации о Выполнении Обязательств, Вытекающих Из Объединенной Конвенции о Безопасности Обращения с Отработавшим Топливом и о Безопасности Обращения с Радиоактивными Отходами.
38. ВВЭР-1000/1200 - За Предел 5%. — <http://atominfo.ru/newsp/w0849.htm>.
39. *Волк, В.* Возврат Урана Из Отработавшего Топлива РБМК в Ядерный Топливный Цикл / В. Волк, А. Хаперская. — 2010.
40. *Кислов, А. и др.* Радиационные Аспекты Использования Регенерированного Урана На ОАО «МСЗ» При Производстве Ядерного Топлива / А. и др. Кислов. —.
41. Status and Advances in MOX Fuel Technology. — Vienna : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2003. — (Technical Reports Series ; 415).
42. Росатом Госкорпорация «Росатом» Ядерные Технологии Атомная Энергетика АЭС Ядерная Медицина. — <https://www.rosatom.ru/journalist/news/nachal>
43. *Пантелей, Д.* Особенности Международного Сотрудничества в Области Атомной Энергетики На Современном Этапе / Д. Пантелей // МИР. — 2017. — т. 8, № 3.

44. *Борман, В. Д.* Техничко-Экономический Анализ Возможных Вариантов Вовлечения Регенерируемых При Переработке ОЯТ Материалов в Топливные Циклы ВВЭР Большой Мощности / В. Д. Борман, Г. А. Сулаберидзе, А. Ю. Смирнов ; Институт промышленных ядерных технологий НИЯУ МИФИ. — 2012. — с. 206. — ГР 01201278149.
45. *Sulaberidze, G. A.* Quasi-Ideal Cascades with an Additional Flow for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures / G. A. Sulaberidze, V. D. Borisevich, Q. Xie // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. — 2006. — Jan. 1. — Vol. 40, no. 1. — P. 5—13.
46. *Сулаберидзе, Г. А.* Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей; под ред. В. Д. Бормана / Г. А. Сулаберидзе, В. А. Палкин, В. Д. Борисевич. — 2011.
47. *Palkin, V. A.* Separation of Uranium Isotopes in a Cascade with Intermediate Product / V. A. Palkin // Perspekt. Mater. — 2010. — № 8. — с. 11—14.
48. Management of High Enriched Uranium for Peaceful Purposes: Status and Trends. — Vienna : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2005. — (TECDOC Series ; 1452).
49. Способ Изотопного Восстановления Регенерированного Урана - Патент РФ 2497210 - Мазин Владимир Ильич ,Водолазских Виктор Васильевич ,Журин Владимир Анатольевич ,Крутых Виктор Николаевич ,Мазур Роман Леонидович ,Фомин Артем Владимирович. — URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2497210> (дата обр. 21.02.2020).
50. *Палкин, В. А.* Очистка Регенерированного Гексафторида Урана в Двухкаскадной Схеме При Обогащении  $^{235}\text{U}$  Менее 5% / В. А. Палкин // At. Energy. — 2013. — т. 115, № 1. — с. 28—33.
51. *Palkin, V.* Restoration of the Isotopic Composition of Reprocessed Uranium Hexafluoride Using Cascade with Additional Product / V. Palkin, E. Maslyukov // Nuclear Engineering and Technology. — 2020. — May 26.
52. *Смирнов, А. Ю.* Q-КАСКАДЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАЗДЕЛЯЕМЫХ СМЕСЕЙ / А. Ю. Смирнов, Г. А. Сулаберидзе // Теоретические Основы Химической Технологии. — 2013. — т. 47, № 4.

53. *Смирнов, А. Ю.* Влияние профиля потока питания ступеней каскада на массоперенос промежуточных компонентов / А. Ю. Смирнов, Г. А. Сулаберидзе, В. Д. Борисевич // Теоретические Основы Химической Технологии. — 2010. — т. 44, № 6.
54. *Палкин, В. А.* Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей / В. А. Палкин // Атомная энергия. — 2015. — т. 119, № 6. — с. 101—105.
55. Design of Cascade with Locally Enlarged Flow for Enrichment of Intermediate Components of Multi-Isotope Mixtures / A. Y. Smirnov [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. — 2015. — Mar. — Vol. 95. — P. 47—54.
56. Objective Function at Optimization of Separation Cascades / A. Mustafin [и др.] // AIP Conference Proceedings. — 2019. — апр. — т. 2101, № 1. — с. 020008.
57. *Сазыкин, А.* Усовершенствованный Метод Расчета Разделения Многокомпонентных Смесей На Центробежных Каскадах / А. Сазыкин, А. Руднев // Сб. Докладов 2-Ой Всерос. Научн. Конф. «Физ.-Хим. Процессы При Селекции Атомов и Молекул». — ЦНИИАтоминформ, 1997. — с. 159—161.
58. *Wu, H.* Calculation Methods for Determining the Distribution of Components in a Separation Cascade for Multicomponent Mixture / H. Wu, C. Ying, G. Liu // Sep. Sci. and Techn. 33(6). — 1988. — с. 887—898.
59. Эффективный Метод Расчета Каскадов Для Разделения Многокомпонентных Изотопных Смесей / Л. Холпанов [и др.] // Хим. Пром. — 1998. — № 3. — с. 44—50.
60. On Calculation of Squared-off Cascades for Multicomponent Isotope Separation / D. Potapov [и др.] // Proc. 5th. Workshop of Separation Phenomena in Liquids and Gases. Iguazu Falls, Brazil. — 1996. — с. 13—23.
61. *Zeng, S.* A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixture / S. Zeng, C. Ying // Sep. Sci. and Techn. — 2000. — т. 35, № 4. — с. 613—622.
62. *Миненко, В.* К Теории Каскадов Для Разделения Многокомпонентных Изотопных Смесей / В. Миненко, Р. Кучеров // Атомная энергия. — 1965. — т. 19, № 4. — с. 360—367.

63. *Жигаловский, Б.* Лекционные Материалы По Многокомпонентным Смесям. Новоуральск, УЭХК / Б. Жигаловский. — 1999.
64. Design of Cascades for Separating Isotope Mixtures / N. A. Kolokol'tsov [et al.] // Soviet Atomic Energy. — 1970. — Dec. 1. — Vol. 29, no. 6. — P. 1193—1198.
65. К вопросу о построении каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей / Н. А. Колокольцов [и др.]. — 1970.
66. *Миненко, В. П.* Предельное обогащение промежуточных изотопов в отборе с концов каскада / В. П. Миненко. — 1972.
67. YAMAMOTO, I. Multicomponent Isotope Separating Cascade Composed of Elements with Large Separation Factors / I. YAMAMOTO, A. KANAGAWA // Journal of Nuclear Science and Technology. — 1978. — 1 авг. — т. 15, № 8. — с. 580—584.
68. *Wu, J.* The Study of Multicomponent Isotope Separation of Uranium in Cascades by Centrifugal Method / J. Wu, Z. Fu // Proc. of 6th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases 1998. Nagoya, Japan. October. — с. 18—21.
69. *Борисевич, В. Д.* О Расчете Каскадов с Дополнительным Отбором Для Разделения Многокомпонентных Изотопных Смесей / В. Д. Борисевич, Д. Потапов, Г. А. Сулаберидзе. — 1993.
70. *Wood, H. G.* On a Criterion Efficiency for Multi-Isotope Mixtures Separation / H. G. Wood, V. D. Borisevich, G. A. Sulaberidze // Sep. Sci. and Technol. — 1999. — т. 34, № 3. — с. 343—357.
71. Особенности обогащения компонентов с промежуточной массой в квази-идеальном каскаде / Г. А. Сулаберидзе [и др.] // Атомная энергия. — 2006. — т. 100, № 1. — с. 51—56.
72. *Сазыкин, А.* Квазиидеальные Каскады Для Разделения Многокомпонентных Смесей Изотопов / А. Сазыкин. — 2000.
73. *Сулаберидзе, Г. А.* О Сравнение Оптимальных и Модельных Каскадов Для Разделения Многокомпонентных Смесей При Произвольном Обогащении На Ступени / Г. А. Сулаберидзе, В. Д. Борисевич, Ц. Се // Теорет. основы хим. технологии. — 2008. — т. 42, № 4. — с. 1—7.

74. Classification of Model Cascades for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures / G. A. Sulaberidze [и др.] // Separation Science and Technology. — 2020. — 21 апр. — т. 0, № 0. — с. 1—11.
75. *Borisevich, V.* New Approach to Optimize Q-Cascades / V. Borisevich, G. Sulaberidze, S. Zeng // Chemical Engineering Science. — 2011. — Vol. 66, no. 3. — P. 393—396.
76. The Q-Cascade Explanation / S. Zeng [et al.] // Separation Science and Technology. — 2012. — Vol. 47, no. 11. — P. 1591—1595.
77. Special Features of the Enrichment of Components with Intermediate Mass in a Quasi-Ideal Cascade / G. A. Sulaberidze [et al.] // Atomic Energy. — 2006. — Jan. 1. — Vol. 100, no. 1. — P. 53—59.
78. *Wood, H.* Effects of Separation Processes on Minor Uranium Isotopes in Enrichment Cascades / H. Wood // Science and Global Security. — 2008. — т. 16, № 1/2. — с. 26—36.
79. Comparative Study of the Model and Optimum Cascades for Multicomponent Isotope Separation / T. Song [и др.] // Separation Science and Technology. — 2010. — сент. — т. 45, № 14. — с. 2113—2118.
80. *Palkin, V. A.* Design-Analytical Research of a Refinement of the Recycled Uranium from  $^{236}\text{U}$  Isotope by Use of the Q-Cascade / V. A. Palkin, A. Y. Smirnov, G. A. Sulaberidze // (In: Proc. of SPLG-2010. Saint-Petersburg, Russia, 13—18 June). — 2010. — с. 142—149.
81. 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.
82. О ценности ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах / А. П. Соловьева [и др.] // Известия Высших Учебных Заведений. Ядерная Энергетика. — 2019. — № 2. — с. 140—152.
83. *Brown, A.* On the Origins and Significance of the Limit Demarcating Low-Enriched Uranium from Highly Enriched Uranium / A. Brown, A. Glaser // Science & Global Security. — 2016. — May. — Vol. 24, no. 2. — P. 131—137.

84. 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.
85. Способ Изотопного Восстановления Регенерированного Урана - Патент РФ 2282904 - Водолазских Виктор Васильевич ,Козлов Владимир Андреевич ,Мазин Владимир Ильич ,Стерхов Максим Иванович ,Шидловский Владимир Владиславович ,Щелканов Владимир Иванович / В. Водолазских [и др.]. — заявл. 2006.
86. *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.
87. *More, J.* MINPACK / J. More, K. Hillstrom // Argonne National Laboratory. —
88. The Concept of the Use of Recycled Uranium for Increasing the Degree of Security of Export Deliveries of Fuel for Light-Water Reactors / P. N. Alekseev [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2010. — Dec. 1. — Vol. 73, no. 14. — P. 2264—2270.
89. Способ Изотопного Восстановления Регенерированного Урана : 2702620 / В. А. Невиница, А. Ю. Смирнов, Г. А. Сулаберидзе. — заявл. 2019.
90. 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.
91. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python / P. Virtanen [et al.] // Nat Methods. — 2020. — Mar. — Vol. 17, no. 3. — P. 261—272.