

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт – Физико-технический  
Направление – Ядерные физика и технологии  
Кафедра – Электроника и автоматика физических установок  
Специальность – Электроника и автоматика физических установок

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема работы
<b>РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ АМЕРИЦИЯ И КЮРИЯ МЕТОДОМ ИОНООБМЕННОЙ КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩЕЙ ХРОМАТОГРАФИИ</b>

УДК 621.039.54:543.544.1:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0701	Гожимов А.И.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чурсин Ю.А.	канд. техн. наук, доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Е.В.	канд. филос. наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Усов В.Ф.	канд. техн. наук		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭАФУ	Горюнов А.Г.	д-р техн. наук, доцент		

Томск – 2016 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Представлять современную картину мира на основе целостной системы естественнонаучных и математических знаний, а также культурных ценностей; понимать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности, защите интересов личности, общества и государства; быть готовым к анализу социально-значимых процессов и явлений, применять основные положения и методы гуманитарных, социальных и экономических наук при организации работы в организации, к осуществлению воспитательной и образовательной деятельности в сфере публичной и частной жизни.
P2	Обладать способностями: действовать в соответствии с Конституцией РФ, исполнять свой гражданский и профессиональный долг, руководствуясь принципами законности и патриотизма, правилами и положениями, установленные законами и другими нормативными правовыми актами; к логическому мышлению, обобщению, анализу, прогнозированию, постановке исследовательских задач и выбору путей их достижения; понимать основы национальной и военной безопасности РФ; работать в многонациональном коллективе; формировать цели команды, применять методы конструктивного разрешения конфликтных ситуаций; использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ.

Р3	Самостоятельно, методически правильно применять методы самостоятельного физического воспитания для повышения адаптационных резервов организма и укрепления здоровья, готовностью к достижению и поддержанию должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р4	Свободно владеть литературной и деловой письменной и устной речью на русском языке, навыками публичной и научной речи. Уметь создавать и редактировать тексты профессионального назначения, владеть одним из иностранных языков как средством делового общения.
Р5	Находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; быть готовым к принятию ответственности за свои решения в рамках профессиональной компетенции, принимать решения в нестандартных условиях обстановки и организовывать его выполнение, самостоятельно действовать в пределах предоставленных прав; самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности, развития социальных и профессиональных компетенций.
Р6	Применять основные законы естественнонаучных дисциплин, математический аппарат, вычислительную технику, современные методы исследований процессов и объектов для формализации, анализа и выработки решения профессиональных задач.
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
Р7	Уметь самостоятельно повышать уровень знаний в области

	<p>профессиональной деятельности, приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт, методы научно-исследовательской и практической деятельности, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; работать с информацией в глобальных компьютерных сетях; оценивать перспективы развития АСУ и АСНИ физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики), использовать современные достижения в научно-исследовательских работах.</p>
Р8	<p>Применять знания о процессах в ядерных энергетических и физических установках, и о технологических процессах ядерного топливного цикла используя методы математического моделирования отдельных стадий и всего процесса для разработки АСУ ТП и АСНИ с применением пакетов автоматизированного проектирования и исследований.</p>
Р9	<p>Использовать знания о протекающих процессах в ядерных энергетических установках, аппаратах производств ядерного топливного цикла, теории и практики АСУ ТП, при проектировании, настройке, наладке, испытаниях и эксплуатации современного оборудования, информационного, организационного, математического и программного обеспечения, специальных технических средств, сооружений, объектов и их систем; организовать эксплуатацию физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики), современного оборудования и приборов с учетом требований руководящих и</p>

	<p>нормативных документов; быть готовым к освоению новых образцов физических установок, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний.</p>
P10	<p>Использовать технические средства и информационные технологии, проводить предварительное технико-экономического обоснования проектных расчетов устройств и узлов приборов и установок, расчет, концептуальную и проектную проработку программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ, применять методы оптимизации, анализа вариантов, поиска решения многокритериальных задач с учетом неопределенностей объекта управления, разрабатывать способы применения программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ, решать инженерно-физические и экономические задачи, применяя знания теории и практики АСУ, включающее математическое, информационное и техническое обеспечения, для проектирования, испытания, внедрения и эксплуатации АСУ ТП и АСНИ.</p>
P11	<p>Понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, соблюдать основные требования безопасности и защиты государственной тайны; выполнять мероприятия по восстановлению работоспособности физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики) при возникновении аварийных ситуаций, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения; проводить анализ и оценку обстановки для принятия решения в случае возникновения аварийных ситуаций, экологическую безопасность, нормы и правило производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности.</p>

P12	<p>Разрабатывать проекты нормативных и методических материалов, технических условий, стандартов и технических описаний средств АСУ ТП и АСНИ, регламентирующих работу в сфере профессиональной деятельности; осуществлять разработку технического задания, расчет, проектную проработку современных устройств и узлов приборов, установок (образцов вооружения, программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ), использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов.</p>
P13	<p>Использовать в профессиональной деятельности нормативные правовые акты в области защиты государственной тайны, интеллектуальной собственности, авторского права и в других областях; осуществлять поиск, изучение, обобщение и систематизацию научно-технической информации, нормативных и методических материалов в сфере своей профессиональной деятельности.</p>
P14	<p>Проявлять и активно применять способность к организации и управлению работой коллектива, в том числе: находить и принять управленческие решения в сфере профессиональной деятельности; разрабатывать планы работы коллективов; контролировать соблюдение технологической дисциплины, обслуживания, технического оснащения, размещения технологического оборудования; организовывать учет и сохранность физических установок (вооружения и техники), соблюдение требований безопасности при эксплуатации; использовать основные методы защиты персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий.</p>

P15	<p>Демонстрировать способность к осуществлению и анализу научно-исследовательских, технологических и пуско-наладочных работ, разработке планов и программ их проведения, включая ядерно-физические эксперименты, выбору методов и средств решения новых задач с применением современных электронных устройств, представлению результатов исследований и формулированию практических рекомендаций их использования в формах научно-технических отчетов, обзоров, публикаций по результатам выполненных работ; выполнять полный объем работ, связанных с техническим обслуживанием физических установок с учетом требований руководящих и нормативных документов.</p>
-----	---

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт – Физико-технический  
Направление – Ядерные физика и технологии  
Кафедра – Электроника и автоматика физических установок  
Специальность – Электроника и автоматика физических установок

**УТВЕРЖДАЮ**  
Зав. кафедрой ЭАФУ ФТИ  
\_\_\_\_\_ А.Г. Горюнов  
«12» октября 2015 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

**В форме:**

Дипломного проекта
--------------------

**Студенту:**

Группа	ФИО
0701	Гожимову А.И.

**Тема работы:**

Тема ВКР в соответствии с приказом
------------------------------------

<b>Утверждена приказом директора ФТИ</b>	от 23.11.2015 № 9128/с
--	------------------------

<b>Дата сдачи студентом выполненной работы</b>	25 января 2016 г.
--	-------------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования – препаративная хроматографическая установка, предназначенная для разделения америция и кюрия из переработанного ядерного топлива.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Аналитический обзор существующих моделей хроматографических процессов, аналитический обзор протекающий при разделении процессов, разработка математической модели процесса разделения методом ионообменной комплексообразующей хроматографии, реализация модели для численного моделирования, проверка модели на адекватность.



<b>Перечень графического материала</b>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент, канд. филос. наук Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	доцент, канд. техн. наук Усов В.Ф.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	12 октября 2015 г.
---	--------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чурсин Ю.А.	канд. техн. наук, доцент		12.10.15

**Задание принял к исполнению студент**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0701	Гожимов А.И.		12.10.15

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 87 с., 16 рис., 14 табл., 18 источников, 2 прил., 18 л. графического материала

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА, ХРОМАТОГРАФИЯ, СОРБЦИЯ, ИОННЫЙ ОБМЕН, КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ, ЭЛЮИРОВАНИЕ, АМЕРИЦИЙ, КЮРИЙ, РАЗДЕЛЕНИЕ ТПЭ И РЗЭ, ВРЕМЯ УДЕРЖИВАНИЯ

Объектом исследования является (являются) процесс разделения америция и кюрия методом ионообменной комплексообразующей хроматографии

Цель работы – разработка математической модели процесса разделения америция и кюрия методом ионообменной комплексообразующей хроматографии

В процессе исследования проводился аналитический обзор физико-химических процессов, протекающих при разделении америция и кюрия

В результате исследования разработана математическая модель процесса разделения методом ионообменной комплексообразующей хроматографии, адекватность которой проверена на экспериментальных данных.

Область применения: оптимизация технологического процесса.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в возможности оптимизации технологического процесса путем имитационного моделирования.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В данной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.9–95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования

ГОСТ 7.32–2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления

ГОСТ 8.417–2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**элюирование:** Извлечение вещества из твердого носителя вымыванием его подходящим растворителем.

**хроматограмма:** Результат регистрирования зависимости концентрации веществ на выходе колонки от времени.

В данной работе применены следующие сокращения:

редкоземельные элементы; РЗЭ.

трансплутониевые элементы; ТПЭ.

диэтилтриаминпентауксусная кислота; ДТПА.

радиоактивные отходы; РАО.

нитрилотриуксусная кислота; НТА.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	15
1 Аналитический обзор.....	16
1.1 Актуальность работы.....	16
1.2 Ионообменная хроматография .....	17
1.2.1 Понятие ионообменной хроматографии .....	17
1.2.2 Механизм ионного обмена.....	18
1.2.3 Элюирование фракций разделяемых компонентов.....	19
1.2.4 Описание хроматографической установки .....	20
1.2.5 Технологическая схема разделения ТПЭ-РЗЭ.....	22
1.3 Обзор существующих математических моделей.....	23
1.3.1 Математическая модель по методу «теоретических тарелок»....	23
1.3.2 Общая сорбционная модель.....	23
1.3.3 Общая модель ионообменной хроматографии .....	24
1.3.4 Вывод по обзору математических моделей .....	25
2 Разработка математической модели	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.1 Анализ физико-химических процессов	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2 Составление математической модели	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2.1 Переход веществ из жидкой фазы в пленку	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2.2 Ионный обмен .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2.3 Перемещение веществ в потоке	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2.4 Комплексообразование.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.3 Система дифференциальных уравнений	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

3	Моделирование.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.1	Разработка скрипта численного моделирования	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.2	Представление результатов моделирования	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.2.1	Ввод исходного раствора в колонку	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.2.2	Распределение веществ вдоль колонки	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.2.3	Элюирование .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.3	Адекватность математической модели	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.4	Моделирование каскада колонн	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....		26
4.1	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....		26
4.2	SWOT-анализ.....		27
4.3	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....		29
4.4	Инициация проекта .....		32
4.5	План проекта.....		34
4.6	Бюджет научного исследования .....		35
4.6.1	Основная заработная плата .....		36
4.6.2	Расчет потребляемой электроэнергии .....		37
4.6.3	Затраты на спецоборудование .....		38
4.7	Группировка затрат по статьям .....		39
4.8	Оценка сравнительной эффективности исследования .....		41
5	Социальная ответственность.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
5.1	Введение.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	

5.2	Характеристика вредных и опасных факторов, имеющих место в лаборатории .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.3	Электробезопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4	Требования безопасности при работе видеотерминалов и ПЭВМ	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4.1	Эргономика и организация рабочего места	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4.2	Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4.3	Мероприятия по борьбе с производственным шумом .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4.4	Мероприятия по радиационной безопасности	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4.5	Мероприятия по выполнению норм вентиляции и отопления	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4.6	Мероприятия по пожарной безопасности	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.5	Мероприятия по охране окружающей природной среды ...	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.6	Выводы по разделу .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	Заключение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	Список публикаций студента .....	44
	Список использованных источников	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	Приложение А .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	Приложение Б. на отдельных листах	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
	Титульный лист .....	1
	Актуальность работы.....	2
	Цель и задачи .....	3
	Анализ объекта моделирования .....	4
	Этапы разделения.....	5

Физико-химические процессы.....	6
Требования к модели .....	8
Обзор существующих моделей .....	9
Основные допущения .....	10
Математическое описание .....	11
Условный эксперимент .....	12
Адекватность модели.....	14
Моделирование каскада колонок .....	17
Результаты работы .....	18
Диск CD-R.....	в конверте на обороте обложки
643.ФЮРА.00003-01 81 01. Пояснительная записка ВКР. Файл	

Гожимов\_ВКР.docx

Презентация к ВКР. Файл Гожимов\_ВКР\_презентация.pptx

643.ФЮРА.00003-01 81 01. Текст программы. Файл IES.m

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в рамках проектного направления «Прорыв» ведутся научно-исследовательские и инженерно-технические работы по разработке реакторов большой мощности на быстрых нейтронах, технологий замыкания ядерного топливного цикла для использования полного энергетического потенциала уранового топлива, а также по созданию новых видов материалов и топлива.

Основная цель проектного направления «Прорыв» – создание ядерного комплекса с АЭС на быстрых нейтронах, производства по переработке ядерного топлива, а также подготовка РАО к удалению из технологического цикла.

В процессе эксплуатации ядерного топлива в результате ядерных реакций образуются очень ценные редкоземельные металлы и ТПЭ, которые можно выделить из отработавшего ядерного топлива для дальнейшего использования. В качестве основной технологии разделения америция и кюрия принят вытеснительный ионообменный комплексообразующий хроматографический метод, для которого разработаны технологические схемы исходного раствора и рассчитаны удельные потоки реагентов.

Для оптимизации работы и синтеза алгоритма управления промышленным стендом разделения ТПЭ и РЗЭ необходима адекватная математическая модель данного аппарата. Целью выпускной квалификационной работы является разработка математической модели процесса разделения этих веществ в каскаде хроматографических колонн.

					<i>643.ФЮРА.00003-01 81 01</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>	<i>Гожимов</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Чурсин</i>						
<i>Консульт</i>					<i>Введение</i>		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Ефремов</i>						
<i>Утверд.</i>	<i>Горюнов</i>						
					<i>ТПУ</i>	<i>ФТИ</i>	
					<i>Группа</i>	<i>0701</i>	



# 1 Аналитический обзор

## 1.1 Актуальность работы

В настоящее время остро стоит вопрос увеличения производительности и эффективности работы промышленных аппаратов. В химической промышленности эффективность работы аппарата во многом зависит от температуры рабочей среды, концентраций веществ, давления, плотности и других физических величин, а также и от геометрии самого аппарата. Для получения оптимального режима работы необходимо знать, какие процессы протекают внутри аппарата, связи между физическими параметрами процесса и выходным результатом, то есть знать, как ведет себя процесс при изменении определенных параметров. Одним из наиболее распространенных способов описания технологического аппарата является его математическое описание, или математическая модель.

Наличие адекватной математической модели промышленного аппарата позволяет отработать на ней различные алгоритмы работы, найти оптимальный режим работы, исследовать влияние параметров процесса на выходные величины. Собственно, целью данной работы является разработка математической модели разделения веществ методом ионообменной хроматографии.

					<i>643.ФЮРА.00003-01 81 01</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Гожимов</i>				<i>Аналитический обзор</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Чурсин</i>							
<i>Консульт</i>								
<i>Н. Контр.</i>	<i>Ефремов</i>							
<i>Утверд.</i>	<i>Горюнов</i>							
						<i>ТПУ</i>	<i>ФТИ</i>	
						<i>Группа</i>	<i>0701</i>	

## **1.2 Ионообменная хроматография**

### **1.2.1 Понятие ионообменной хроматографии**

Ионообменная хроматография – сорбционный динамический метод разделения смесей ионов на ионообменниках за счет обратимого стехиометрического обмена ионов исходных компонентов в жидкой фазе и заряженных функциональных групп в твердой фазе. Разделение происходит за счет различного сродства разделяемых ионов к ионообменнику, вследствие чего ионы двигаются вдоль хроматографической колонки с разными скоростями [1].

В качестве неподвижной фазы в ионообменной хроматографии используются вещества, которые называются ионитами. Они представляют собой твердые, нерастворимые в воде полимерные вещества, содержащие функциональные заряженные группы, которые способны удерживать противоположно заряженные ионы раствора [2].

В качестве подвижной фазы в ионообменной хроматографии используются водные растворы солей, кислот и оснований, которые способны ионизировать соединения.

В зависимости от состава неподвижной фазы ионообменная хроматография подразделяется на три типа – катионообменную, анионообменную и смешанную. При катионообменной хроматографии катионы исходных веществ взаимодействуют с отрицательно заряженными функциональными группами катионита. При анионообменной хроматографии, соответственно, анионы исходных веществ взаимодействуют с положительно заряженными функциональными группами анионита. При смешанной хроматографии в составе твердой фазы имеются как положительно заряженные, так и отрицательно заряженные функциональные группы и, следовательно, ионообменник может сорбировать как катионы, так и анионы. Это свойство применяется для разделения протеинов, поскольку при растворении протеины при растворении могут быть положительно или отрицательно заряжены.

### 1.2.2 Механизм ионного обмена

Ионный обмен представляет собой обратимую гетерогенную реакцию эквивалентного обмена ионов, находящихся в твердой и жидкой фазах [3]. Реакцию ионного обмена можно представить в следующем виде (формулы (1.1) и (1.2)).



где  $R$  – каркас ионита;  
 $M_1^+, M_2^+$  – катионы.



где  $R$  – каркас ионита;  
 $M_1^-, M_2^-$  – анионы.

В формуле (1.1) представлена реакция катионного обмена, в (1.2) – анионного обмена.

Константа равновесия реакции ионного обмена имеет вид (формула (1.3)).

$$K_{M_2}^{M_1} = \frac{\overline{[M_2^+]}[M_1^+]}{[M_1^+]\overline{[M_2^+]}} \quad (1.3)$$

где  $\overline{[M_1^+]}, \overline{[M_2^+]}$  – концентрации ионов 1 и 2 в твердой фазе;  
 $[M_1^+], [M_2^+]$  – концентрации ионов 1 и 2 в жидкой фазе.

Эта величина характеризует способность ионита сорбировать ионы из раствора. При значении константы больше единицы, ион, находящийся в

растворе имеет большее сродство к иониту, и, соответственно, вытесняет ион в ионите. При значении менее единицы ион слабо сорбируется ионитом. При значении равной единице, сродство иона в растворе и сродство иона в твердой фазе к иониту одинаковое [3].

### **1.2.3 Элюирование фракций разделяемых компонентов**

Элюирование – процесс извлечения вещества из твердого носителя вымыванием его подходящим растворителем – элюентом.

Элюирование разделяемых компонентов производится раствором элюента, в составе которого имеется вода, ДТПА, гидроксид аммония, а также, при необходимости, лимонная кислота и НТА. ДТПА и НТА образуют комплексы с разделяемыми компонентами в подвижной и неподвижной фазах. Лимонная кислота и вода не взаимодействуют с ионитом и компонентами разделяемой смеси. Гидроксид аммония выполняет роль вытеснителя и определяет скорость движения разделяемых элементов по колонне.

Обработка колонок проводится последовательно одним потоком элюента, который подается на первую колонку. Расход элюента определяется положением кюрия. При переходе полосы кюрия из первой колонны во вторую, расход элюента уменьшается для того, чтобы обеспечить требуемую скорость подачи во вторую колонку. После выхода кюрия из последней колонки расход элюента остается на постоянном уровне до выхода вытеснителя.

Таким образом, при элюировании смеси америция, кюрия и РЗЭ в колоннах, переведенных в форму удерживающего иона, наблюдается следующий порядок выхода компонентов. Самыми первыми на выходе последней колонки появятся фракции, содержащие удерживающий ион, воду и инертные добавки при их наличии. Затем выходят по порядку кюрий, америций, европий и другие тяжелые РЗЭ. После выходит чистый раствор комплексона. Самым последним из колонки выходит раствор вытеснителя. Легкие РЗЭ при данном составе элюента останутся в твердой фазе колонки.

В хроматографии разделяют два режима элюирования – изократический и градиентный режим элюирования (рисунок 1). При изократическом режиме состав элюента не изменяется на всем интервале разделения веществ. При градиентном режиме состав элюента изменяется, к примеру, увеличивается концентрация растворителя по определенному закону (линейный градиент, ступенчатое изменение) или добавляется более сильный растворитель. Оптимизируя этап элюирования можно достичь более быстрого и более эффективного разделение исходной смеси.

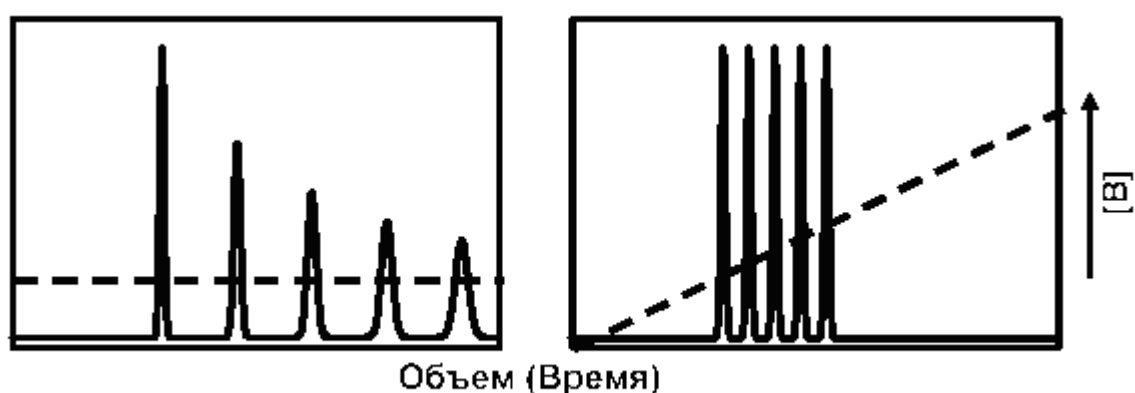


Рисунок 1 – Вид хроматограммы при изократическом и градиентном элюировании

#### 1.2.4 Описание хроматографической установки

Процесс хроматографического разделения ТПЭ-РЗЭ выполняется на установке, состоящей из последовательно установленных колонок, заполненных ионообменной смолой (рисунок 2). Все разделительные колонки имеют одинаковую высоту, при этом сечение каждой следующей колонки уменьшается по сравнению с предыдущей. Каждая колонка снабжена дополнительным оборудованием:

- греющая рубашка;
- штуцеры для подачи разделительной смеси;

- штуцеры для загрузки и выгрузки смолы;
- емкости для накопления и хранения продуктов схемы;
- емкость для подготовки раствора для сорбции;
- насосное оборудование для подачи жидких продуктов схемы;
- автоклавное оборудование для разрушения комплексонов;
- оборудование газоочистки.

Характеристики колонок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики разделительных колонок

№ колонны	Назначение колонны	Высота Н, см	Диаметр d, см	Сечение s, см <sup>2</sup>	Объем колонны V, л
1	Сорбц.-разделительная	120	7,5	44,2	5,30
2	Разделительная	120	5,6	24,6	2,96
3	Разделительная	120	3,7	10,8	1,29
4	Разделительная	120	1,9	2,84	0,340
5	Разделительная	120	1,0	0,785	0,094

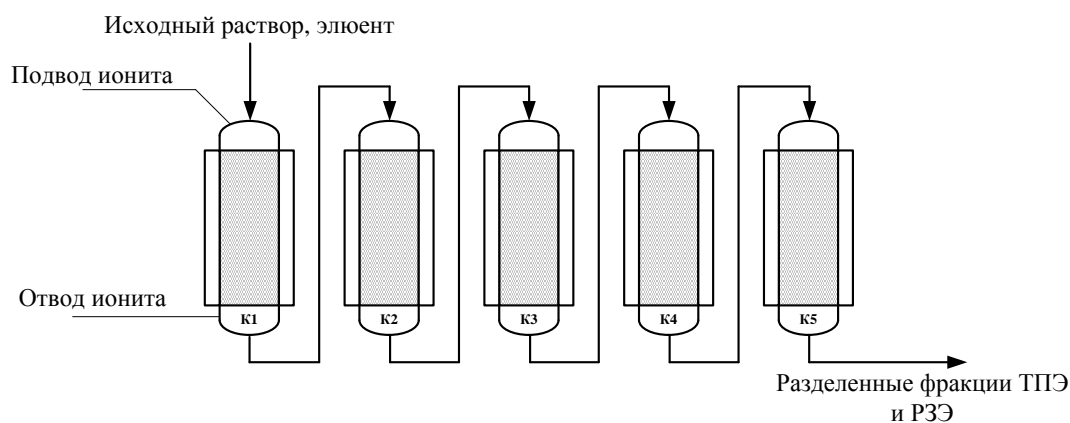


Рисунок 2 – Обобщенная схема хроматографической установки

### 1.2.5 Технологическая схема разделения ТПЭ-РЗЭ

Из всего технологического процесса разделения можно выделить цепочку основных операций (рисунок 3), которые выполняются в строго определенной последовательности на одном и том же оборудовании.

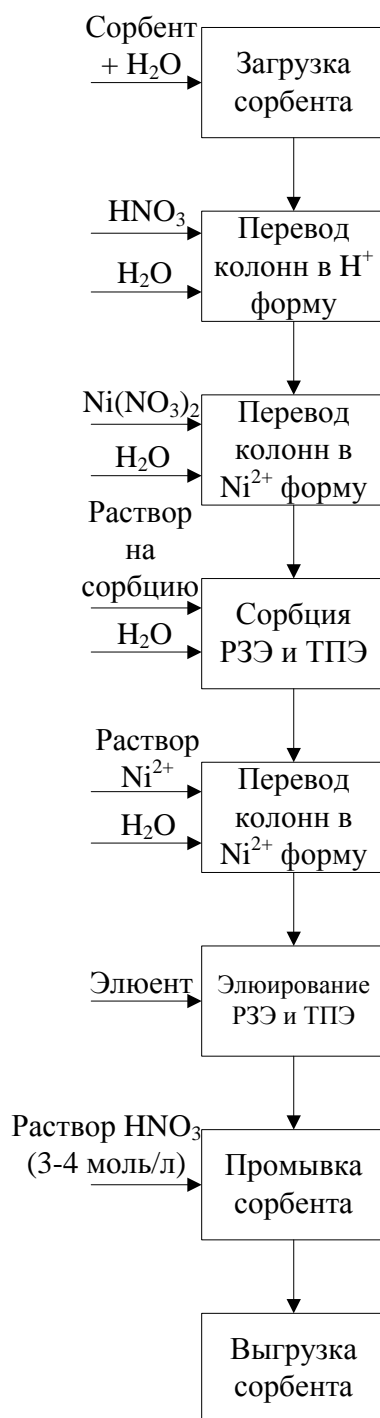


Рисунок 3 – Основные операции хроматографического разделения ТПЭ-РЗЭ

Кроме основной цепочки операций в технологической схеме присутствуют дополнительные операции, параллельные основным и связанные с центральной цепочкой отдельными потоками. К дополнительным относятся следующие операции: автоклавное разрушение комплексонов (ДТПА, НТА и др.) в смешанных фракциях ТПЭ, автоклавное разрушение комплексонов во фракции никеля, а также смешение раствора ТПЭ-РЗЭ перед сорбцией.

### 1.3 Обзор существующих математических моделей

#### 1.3.1 Математическая модель по методу «теоретических тарелок»

В работе [4] авторами предложена математическая модель, основанная на методе «теоретических тарелок». Данная модель позволяет рассчитывать хроматографические процессы с элюированием при нелинейном градиенте. В данной модели отсутствуют фундаментальные уравнения сорбции, в расчетах используются эмпирические величины, которыми описывается распределение веществ вдоль колонки.

#### 1.3.2 Общая сорбционная модель

Данная модель основана на динамике сорбции и массопереносе веществ. Основными уравнениями, описывающими данную модель являются материальный баланс в твердой и жидкой фазах, а также уравнение изотермы сорбции (формулы (1.4)–(1.6)).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial q_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} = D_L \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}, \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = k(Q_{\text{РАВН}} - Q_i), \quad (1.5)$$

$$Q_{\text{РАВН}} = f(C_i) \quad (1.6)$$



где  $C_i$  – концентрация элемента в жидкой фазе;  
 $q_i$  – концентрация элемента в твердой фазе;  
 $u$  – линейная скорость перемещения раствора;  
 $\varepsilon$  – полная пористость колонки;  
 $D_L$  – коэффициент диффузии.

Сорбционная модель применима к ионообменной хроматографии с некоторыми допущениями, поскольку динамика ионного обмена с некоторой точностью может быть приближенно заменена на динамику сорбции.

### 1.3.3 Общая модель ионообменной хроматографии

А.М. Долгоносов, М.М. Сенявин и И.Н. Волощик в работе [5] предложили общую математическую модель ионообменной хроматографии на основе динамики сорбции и динамики ионного обмена. Данная модель достаточно полно описывает все протекающие процессы при хроматографическом разделении, но в ней не учитывается влияние кислотности на емкость ионита (рисунок 4) [6, 7] и комплексообразование. Поскольку в хроматографической установке, для которой разрабатывается математическая модель, исходный раствор и элюент представляют собой кислые растворы, это также повлияет на динамику сорбции из-за изменения обменной емкости ионита.

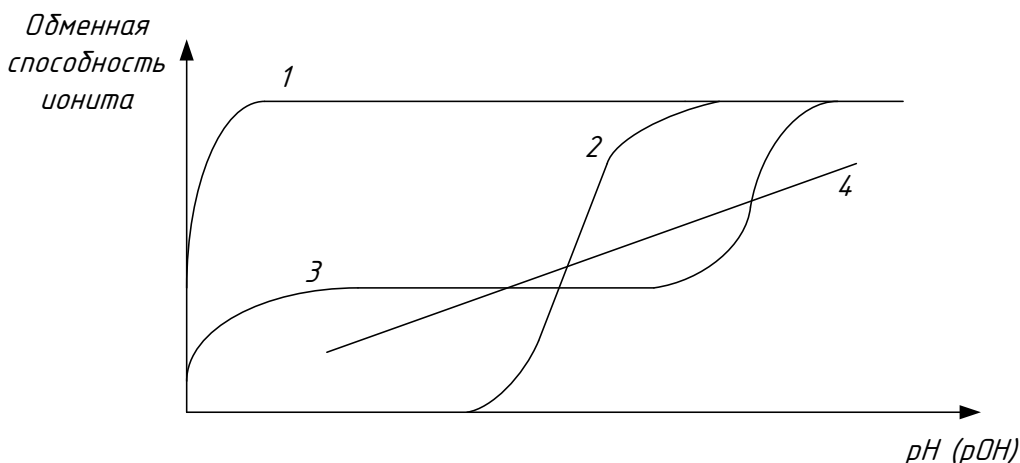


Рисунок 4 – Влияние кислотности на обменную емкость ионита

### **1.3.4 Вывод по обзору математических моделей**

Рассмотренные выше математические модели не могут быть применимы к описанию ионообменной комплексообразующей хроматографии, поскольку в них не учитывается комплексообразование в процессе элюирования, что является существенным фактором при разделении америция и кюрия и, по сути, является основным фактором разделения. Также, в рассмотренных моделях не учитывается влияние кислотности на обменную емкость ионита, которая зависит от кислотности и влияет на сорбцию разделяемых компонентов. Если в качестве ионита используется универсальный ионит, то влияние кислотности незначительно, что и будет учтено в данной работе, поскольку в рассматриваемой хроматографической установке используется катионит КУ-2.

## 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 4.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Поскольку рынок и технологии находятся в постоянном движении и развитии, необходимо проводить детальный анализ конкурирующих разработок. Данный анализ позволит внести коррективы в развитие научного исследования, а также даст оценку сильным и слабым сторонам всем конкурентным разработкам.

Основным конкурентным решением является проведение экспериментов на реальной промышленной установке.

Анализ конкурентных технических решений целесообразно проводить с помощью оценочной карты (таблица 3).

Таблица 2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк1	Кф	Кк1
1 Достоверность полученных данных	25 %	3	5	0,75	1,25
2 Длительность проведения эксперимента	25 %	5	2	1,25	0,5
3 Ресурсоэффективность	15 %	5	1	0,75	0,15
4 Безопасность	10 %	5	3	0,5	0,3

<b>643.ФЮРА.00003-01 81 01</b>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Гожимов</i>			
<i>Провер.</i>	<i>Чурсин</i>			
<i>Консульт</i>	<i>Меньшикова</i>			
<i>Н. Контр.</i>	<i>Ефремов</i>			
<i>Утверд.</i>	<i>Горюнов</i>			
<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>				
		<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>ТПУ</i>	<i>ФТИ</i>	
		<i>Группа</i>	<i>0701</i>	

Продолжение таблицы 3

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк1	Кф	Кк1
5 Гибкость системы	10 %	4	2	0,4	0,2
6 Простота использования	5 %	4	2	0,2	0,1
7 Уровень шума	2,5 %	4	2	0,1	0,05
8 Предполагаемый срок эксплуатации	2,5 %	3	3	0,075	0,075
9 Проведение эксперимента в предельных режимах работы	2,5 %	4	2	0,1	0,05
10 Обслуживание при эксплуатации	2,5 %	5	3	0,125	0,075
Итого	100 %	42	25	4,25	2,75

Как видно из таблицы 2, наиболее значимыми критериями являются достоверность данных, время проведения эксперимента и ресурсосбережение при проведении эксперимента. Предлагаемая разработка математической модели позволит экономить время (примерно 2 часа компьютерного моделирования против 30 часов реального эксперимента, в которых не учтено время на подготовку промышленных аппаратов), а также исходные материалы. Другими не менее важными критериями являются безопасность и гибкость системы, преимущество которых предлагаемой разработки очевидно.

#### 4.2 SWOT-анализ

Для объективного оценивания конкурентоспособности и перспектив развития разработки необходимо проанализировать сильные и слабые стороны, а также угрозы и возможности, которые могут повлиять на разработку. SWOT-

анализ позволит сформировать направление, в котором необходимо работать, чтобы повысить конкурентоспособность научной разработки.

Для составления итоговой матрицы SWOT-анализа необходимо определить сильные и слабые стороны проекта, угрозы и возможности проекта, а также взаимную корреляцию между ними.

Сильными сторонами разрабатываемого проекта являются замещение реального эксперимента на численное моделирование, быстрота расчета, гибкость системы, экономия значительного количества ресурсов.

Слабыми сторонами проекта являются ограниченная точность получения данных, по сравнению с реальными экспериментальными данными.

Возможностью проекта является применение данной технологии в других сферах деятельности (нефтепромышленность, фармацевтика и т.п.) и, соответственно, с помощью разрабатываемой математической модели можно будет моделировать процессы в этих сферах.

Угрозой данному проекту является изменение технологии разделения или разработка принципиально новой технологии, в которой применяются другие физико-химические принципы, что приведет к неактуальности разрабатываемой математической модели.

Корреляция между сильными и слабыми сторонами проекта с возможностями и угрозами отображена в итоговой матрице SWOT-анализа (таблица 4).

Основной стратегией для данного научного проекта является разработка адекватной математической модели процесса разделения, которая могла бы применяться в других сферах при аналогичной технологии.

Таблица 3 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1 Замещение эксперимента численным моделированием.</p> <p>С2 Быстрота расчета.</p> <p>С3 Гибкость системы.</p> <p>С4 Экономия ресурсов.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1 Достоверность полученных данных.</p>
<p>Возможности проекта:</p> <p>В1 Другие сферы (нефтепромышленность, фармацевтика и т.п.)</p>	<p>Разработка более полной модели процесса, применимой в других сферах</p>	<p>Внедрение в модель расчет процессов, протекающих при разделении в других сферах</p>
<p>Угрозы проекта:</p> <p>У1 Изменение технологии.</p>	<p>Разработка модели для измененной технологии</p>	<p>Разработка модели для измененной технологии</p>

### 4.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На любой стадии жизненного цикла проекта полезно оценивать степень его готовности к коммерциализации. Для этого необходимо оценить степень проработанности научного проекта и уровень имеющихся знаний у разработчика (таблица 5).

Таблица 4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
Определены перспективные направления коммерциализации задела	4	4
Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
Определена товарная форма задела для представления на рынок	2	2
Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	4
Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1

Продолжение таблицы 5

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	3
Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	3
Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
Проработаны вопросы финансирования научной разработки	1	1



Продолжение таблицы 5

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	39	38

Исходя из оценок степени готовности проекта к коммерциализации видно, что проект имеет среднюю степень готовности. По вопросам маркетинговых исследований, финансирования коммерциализации, необходимо привлечение в команду проекта специалистов из данных областей.

#### **4.4 Инициация проекта**

Инициация проекта состоит из процессов, которые выполняются для нового проекта или новой стадии проекта. Для этого определяются начальные цели, содержание, фиксируются ресурсы. Также определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны проекта отображены в таблице 6.

Таблица 5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Госкорпорация «Росатом» в рамках проекта «Прорыв»	Получение математической модели процесса разделения америция и кюрия методом ионообменной комплексообразующей хроматографии для автоматизации данной промышленной установки
НИ ТПУ, кафедра ЭАФУ	Внедрение математической модели в виде программного кода в проект «SimSAR» в качестве отдельного аппарата

В таблице 7 представлена информация о целях проекта, критериях достижения целей, а также требования к результатам проекта.

Таблица 6 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	Моделирование процесса разделения америция и кюрия из отработавшего ядерного топлива;
Ожидаемые результаты проекта	Оптимизация режима работы хроматографической установки в процессе моделирования; Синтез системы автоматического управления для хроматографической установки в процессе моделирования;
Критерии приемки результата проекта	Адекватность математической модели процесса разделения
Требования к результату проекта	Компьютерная математическая модель процесса разделения, удовлетворяющая требованиям скорости, точности расчета, гибкости системы

Рабочая группа проекта отображена в таблице 8.

Таблица 7 – Рабочая группа проекта

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, ч.
Чурсин Ю.А., ТПУ, кафедра ЭАФУ, доцент	Научный руководитель	Консультирование, определение задач, контроль выполнения.	86
Гожимов А.И., ТПУ, кафедра ЭАФУ, техник	Инженер (дипломник)	Анализ литературных источников, моделирование, программирование	163

#### 4.5 План проекта

В рамках планирования научного проекта составляется календарный график проекта, который может быть представлен в виде линейного графика.

Линейный график представлен в таблице 9.

Таблица 8 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	4	06.06.15	09.06.15	Чурсин Ю.А.
2	Изучение литературы	44	10.06.15	23.07.15	Гожимов А.И.

Продолжение таблицы 9

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
3	Анализ процессов	10	24.07.15	02.08.15	Гожимов А.И.
4	Математическое описание	23	03.08.15	25.08.15	Гожимов А.И.
5	Разработка программы	4	26.08.15	29.08.15	Гожимов А.И.
6	Проведение экспериментов	73	30.08.15	10.11.15	Гожимов А.И., Чурсин Ю.А.
7	Внедрение в программный комплекс SimSAR	9	06.10.15	14.10.15	Гожимов А.И., Чурсин Ю.А.

#### 4.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

В данной научной разработке планируемыми расходами являются основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды, накладные расходы, а также расходы на электроэнергию при работе с компьютером.

#### 4.6.1 Основная заработная плата

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников. Величина расходов определяется из трудоемкости выполняемых работ. Расчет основной заработной платы представлен в таблице 10.

Основная заработная плата работника рассчитывается по следующей формуле (4.1):

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} \quad (4.1)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата,

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника,

$T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых работником.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле (4.2):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (4.2)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – оклад работника,

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в год,

$F_{\text{д}}$  – годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала.

Оклад руководителя составляет 23264,86 р.

Оклад дипломника составляет 7483,58 р.

Среднедневная заработная плата руководителя (формула (4.3)):

$$Z_{\text{д}}^{\text{рук}} = \frac{23264,86 \cdot 11,2}{247} = 1058 \text{ р.} \quad (4.3)$$

Среднедневная заработная плата дипломника (формула (4.4)):

$$z_{\text{д}}^{\text{дип}} = \frac{7483,58 \cdot 11,2}{247} = 340,1 \text{ р.} \quad (4.4)$$

Таблица 9 – Расчет основной заработной платы

Этап	Исполнитель	Трудоемкость, чел.-дн.	З/п на один чел.-дн., р.	Всего з/п, р.
Составление ТЗ	Руководитель	4	1058	4232
Изучение литературы	Дипломник	44	340,1	14964,4
Анализ процессов	Дипломник	10	340,1	3401
Мат. описание	Дипломник	23	340,1	7822,3
Разработка программы	Дипломник	4	340,1	1360,4
Проведение экспериментов	Дипломник	73	340,1	24827,3
Проведение экспериментов	Руководитель	73	1058	77234
Внедрение	Дипломник	9	340,1	3060,9
Внедрение	Руководитель	9	1058	9522
Итого				146424,3

#### 4.6.2 Расчет потребляемой электроэнергии

Основным потребляемым сырьем в данной научной разработке является потребление электроэнергии компьютером. Для расчета стоимости потребляемой электроэнергии необходимо знать потребляемую мощность

компьютером, время работы и текущий тариф на электроэнергию (формула (4.5)).

$$C_{\text{ээ}} = 8 \cdot Д \cdot Т \cdot М \quad (4.5)$$

где 8 – 8-часовой рабочий день;

Д – продолжительность работ;

Т – тариф на электроэнергию;

М – мощность, потребляемая ноутбуком.

По техническим характеристикам, ноутбук потребляет 64,935 Вт электроэнергии. Стоимость одного киловатт-часа электроэнергии составляет 4.36 рублей. Значит, за 8-часовой рабочий день затраты на работу ноутбука составят:  $8 \cdot 1 \cdot 4,36 / 1000 \cdot 64,935 = 2,26$  р.

### **4.6.3 Затраты на спецоборудование**

В статью «затраты на специальное оборудование для научных работ» включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. В эту статью следует отнести персональный компьютер, который использовался непосредственно как средство разработки. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

Для расчета амортизационных отчислений был выбран срок полезного использования  $n$  равный 5 лет. Тогда норма амортизации  $a$  равна (формула (4.6)):

$$a = \frac{100}{n} = \frac{100}{5} = 20 \% \quad (4.6)$$

Зная норму амортизации можно найти годовую сумму амортизации для машин и оборудования  $A$  (формула (4.7)):

$$A = \frac{15 \cdot 20}{100} = 3000 \text{ р.} \quad (4.7)$$

Поэтому общая стоимость оборудования будет складываться из суммы цены оборудования, затрат на доставку и монтаж и нормы амортизации. Расчеты по данной статье приведены в таблице 11.

Таблица 10 – Затраты на специальное оборудование для научных работ

Наименование оборудования	Кол-во ед. оборудования	Цена ед. оборудования, р.	Общая стоимость оборудования, р.
Ноутбук HP Pavilion	1	15000	20250

#### 4.7 Группировка затрат по статьям

Группировка затрат по статьям отображена в таблице 12.

Весь бюджет исследования составил 247585,1 р.



Таблица 11 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Основная з/п, р.	Доп. з/п, р.	Отчисления на соц. нужды, р	Затраты на спецоборудование, р.	Прочие прямые расходы, р	Накладные расходы, р	Итого себестоимость, р
1	4232	423,2	1481,2	20250	9,04	423,2	6568,64
2	14964,4	1496,44	5237,54		99,44	1496,44	23294,26
3	3401	340,1	1190,35		22,6	340,1	5294,15
4	7822,3	782,23	2737,805		51,98	782,23	12176,55
5	1360,4	136,04	476,14		9,04	136,04	2117,66
6	102061,3	10206,13	35721,46		164,98	10206,13	158360
7	12582,9	1258,29	4404,015		20,34	1258,29	19523,84
Итого							247585,1

#### 4.8 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности  $I_{\Phi}^P$  и ресурсоэффективности  $I_m^P$ .

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают  $I_{\Phi}^P$  в ходе оценки бюджета затрат для вариантов исполнения научного исследования. Для разрабатываемой математической модели затратами на разработку модели, или 247585,1 рублей. В качестве аналога выступает промышленная хроматографическая установка, её рыночная цена составляет 2500000 рублей. Из этого следует, что затраты на установку будут являться наибольшим интегральным показателем реализации технической задачи  $\Phi_{max}$ .

Интегральный финансовый показатель разработки  $I_{\Phi}^P$  определяется (формула (4.8)):

$$I_{\Phi}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{247585,1}{2500000} = 0,099 \quad (4.8)$$

Интегральный финансовый показатель аналога  $I_{\Phi}^A$  (формула (4.9)):

$$I_{\Phi}^A = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{2500000}{2500000} = 1 \quad (4.9)$$

Показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения определяется как сумма произведений балла критерия на его оценку. Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитан в таблице 13.

Таблица 12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог
1 Способствует росту производительности	0,15	5	3
2 Удобство в эксплуатации	0,15	4	3
3 Помехоустойчивость	0,05	4	4
4 Энергосбережение	0,2	5	2
5 Надежность	0,2	3	5
6 Материалоемкость	0,25	5	2
Итого	1	26	19

Расчет интегральных показателей ресурсоэффективности разработки и аналога приведен в формулах (4.10) и (4.11).

$$I_{\text{финр}}^p = 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 = 4,4 \quad (4.10)$$

$$I_{\text{финр}}^a = 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,25 = 3 \quad (4.11)$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{\text{финр}}^p$  определяется по формуле (4.12).

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,4}{0,099} = 44,44 \quad (4.12)$$

Интегральный показатель эффективности аналога  $I_{\text{финр}}^a$  определяется по формуле (4.13).

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a} = \frac{3}{1} = 3 \quad (4.13)$$

Сравнение интегральных показателей эффективности текущего проекта и аналога позволяет определить сравнительную эффективность проекта  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  (формула (4.14)).

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^{\text{р}}}{I_{\text{финр}}^{\text{а}}} = \frac{44,44}{3} = 14,81 \quad (4.14)$$

Результаты расчетов сравнительной эффективности проекта приведены в таблице 14.

Таблица 13 – Сравнительная эффективность проекта

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,099
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3	4,4
Интегральный показатель эффективности	3	44,44
Сравнительная эффективность проекта	14,81	

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1 Чурсин Ю.А. Разработка кода оптимизации и диагностики технологических процессов (код ТП): Разработка системы визуализации / Ю.А. Чурсин, А.И. Гожимов. – Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий. Проект «Прорыв»: Материалы конференции в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ – 2015. – Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – 75 с.

2 Гожимов А.И. Выделение америция и кюрия из отработавшего ядерного топлива [Электронный ресурс] / А.И. Гожимов, Ю.А. Чурсин // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3–6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. А.Н. Дьяченко [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/035.pdf>, [С. 59]. – Заглавие с титульного экрана. – Свободный доступ из сети Интернет.

3 Ларина К.В. Разработка программного средства, моделирующего процессы ядерного топливного цикла [Электронный ресурс] / К.В. Ларина, Ю.А. Чурсин, А.И. Гожимов // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3–6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. А. Н. Дьяченко [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/287.pdf>, [С. 318]. – Заглавие с титульного экрана. – Свободный доступ из сети Интернет.

4 Моделирование роста кристаллов гексагидрата нитрата уранила в линейном кристаллизаторе для нано-очистки материалов с использованием программного комплекса SimSar [Электронный ресурс] = Modeling of uranyl nitrate hexahydrate (unh) crystal growth in linear crystallizer for nano-cleaning using simsar software / А.И. Гожимов [и др.]; науч. рук. С.Н. Ливенцов // Перспективы

развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ); Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ); Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) ; ред. кол. И.А. Курзина; Г.А. Воронова; С.А. Поробова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C21/338.pdf>, [С. 1064-1066]. – Заглавие с экрана. – Свободный доступ из сети Интернет.

5 Моделирование процесса кристаллизации нитрата уранила в линейном кристаллизаторе при помощи программного комплекса SimSar [Электронный ресурс] / А.И. Гожимов [и др.] // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3–6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А.Н. Дьяченко [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/299.pdf>, [С. 329]. – Заглавие с титульного экрана. – Свободный доступ из сети Интернет.

6 Гожимов А.И. Разработка математической модели процесса разделения америция и кюрия методом ионообменной комплексообразующей хроматографией / А.И. Гожимов, Ю.А. Чурсин. – Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортзамещение: проблемы и пути решения. – Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Том 2. – Уфа: УГНТУ, 2015. – с. 44–45.

7 Гожимов А.И. Код оптимизации и диагностики технологических процессов (код ТП) / А.И. Гожимов, Ю.А. Чурсин. – Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортзамещение: проблемы и пути решения. – Сборник

трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Том 2. – Уфа: УГНТУ, 2015. – С. 229–230.