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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика
Кафедра Высшей математики и математической физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Математическое моделирование нестационарных режимов работы линейного кристаллизатора непрерывного типа при переработке ОЯТ

УДК 519.876:621.039.59:66.065.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0ВМ51	Посеницкий Евгений Александрович		01.06.17 г

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Трифонов Андрей Юрьевич	д.ф.-м.н., профессор		02.06.17

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	к.э.н.		16.05.17 г

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		23.05.17 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Трифонов Андрей Юрьевич	д.ф.-м.н., профессор		02.06.17

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Профессиональные компетенции
	1) В области научно-исследовательской деятельности:
ПК-1	Способность проводить научные исследования и получать новые научные и прикладные результаты самостоятельно и в составе научного коллектива
ПК-2	Способность разрабатывать концептуальные и теоретические модели решаемых научных проблем и задач
	2) В проектной и производственно-технологической:
ПК-3	Способность понимания углубленного анализа проблем, постановки и обоснования задач научной и проектно- технологической деятельности
ПК-4	Способность разрабатывать концептуальные и теоретические модели решаемых задач проектной и производственно-технологической деятельности
	3) В организационно-управленческой деятельности:
ПК-5	Способность управлять проектами, планировать научно-исследовательскую деятельность, анализировать риски, управлять командой проекта
ПК-6	Способность разрабатывать и оптимизировать бизнес-планы научно-прикладных проектов
	4) В педагогической деятельности:
ПК-7	Способность к преподаванию математических дисциплин и информатики в образовательных организациях основного общего, среднего общего, среднего профессионального и высшего образования
ПК-8	Способность разрабатывать учебно-методические комплексы для электронного и мобильного обучения
	5) В консалтинговой деятельности:
ПК-9	Способность разрабатывать аналитические обзоры состояния области прикладной математики и информационных технологий
	6) В консорциумной деятельности:
ПК-10	Способность к взаимодействию в рамках международных проектов и сетевых сообществ

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика
Кафедра Высшей математики и математической физики

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ВММФ
А. Ю. Трифонов

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0ВМ51	Посеницкому Е.А.

Тема работы:

Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	№ 2777/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2017

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– Научно-техническая литература по методикам кристаллизационной очистки ОЯТ; – Научно-техническая литература по построению математических моделей химических процессов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	– Анализ научно-технической литературы и подробный вывод системы уравнений математической модели кристаллизационной очистки ОЯТ в линейном кристаллизаторе непрерывного типа; – Разработка численного алгоритма моделирования рассматриваемого процесса; – Анализ различных режимов работы аппарата, исследование функционирования аппарата в режиме максимальной эффективности, валидация математической модели на основе сравнения экспериментальных и расчетных данных; – Оформление реферата, пояснительной записки.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы:	
Раздел	**Консультант**
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Т.Г.
Социальная ответственность	Федорчук Ю.М.
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Приложение A Literature review	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику:	16.02.2017

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой ВММФ	Трифонов А.Ю.	д.ф.-м.н., профессор		16.02.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0ВМ51	Посеницкий Е.А.		16.02.2017

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0ВМ51	Посеницкий Евгений Александрович

Институт	ФТИ	Кафедра	ВММФ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	01.04.02 Прикладная математика и информатика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. *Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*	*Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах.*
2. *Нормы и нормативы расходования ресурсов*	
3. *Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. *Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения*	*Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта.*
2. *Определение возможных альтернатив проведения научных исследований*	*Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.*
3. *Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски.*	*Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ*
4. *Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективностей.*	*Проведение оценки экономической эффективности исследования.*
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей):*	
1. *Оценка конкурентоспособности технических решений* 2. *Матрица SWOT* 3. *График проведения и бюджет НТИ* 4. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ* 5. *Сравнительная эффективность разработки*	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.02.17

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	к.э.н		10.02.17

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0ВМ51	Посеницкий Евгений Александрович		10.02.17

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0ВМ51	Посеницкому Евгению Алекандровичу

Институт	Физико-технический	**Кафедра**	Высшей математики и математической физики
Уровень образования	Магистр	**Направление/специальность**	Прикладная математика и информатика
Тема выпускной квалификационной работы		Математическое моделирование нестационарных режимов работы линейного кристаллизатора непрерывного типа при переработке ОЯТ	

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: – *вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)* – *опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)* – *негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)* – *чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)*	*1. Характеристика помещения, где был разработан дипломный проект: ширина, составляет b = 3 м, длина комнаты a = 5 м, высота h = 2,8 м. Площадь помещения составляет 15м^2, объем 42 м^3. В помещении одно окно, с параметрами: ширина 1,5 м, высота 1,5 м. Количество рабочих мест n = 1.* *Опасные и вредные факторы:* *- микроклимат;* *-освещенность;* *-шум;* *-электростатические поля;* *-электромагнитные поля;* *-интенсивная напряженность трудового процесса.*
2.Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	*2. Часть социальной ответственности ВКР выполнена на основе законодательно-нормативной базы, которая включает в себя государственные стандарты и санитарные правила и нормы о допустимых значениях вредных и опасных факторов на рабочем месте.*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – *физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;* – *действие фактора на организм человека;* – *приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);* – *предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)*	*1.Анализ опасных и вредных факторов:* *- действие фактора на организм человека;* *- приведение допустимых норм с необходимой размерностью*
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности	*2. Производственная безопасность:*

– *механические опасности (источники, средства защиты;* – *термические опасности (источники, средства защиты);* – *электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);* – *пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)*	*-характеристика помещения, микроклимат.* *-производственный шум* *-освещенность рабочей зоны* *Рабочее место, оценка условий труда на рабочем месте:* *- психофизические факторы* *- анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (техника безопасности)* *- пожарная безопасность*
3. Охрана окружающей среды: – *защита селитебной зоны* – *анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);* – *анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);* – *анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);* – *разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.*	*3.Экологическая безопасность* *-перечень отходов: бумага(черновики), орг. техника* *-методы их обезвреживания и утилизации*
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – *перечень возможных ЧС на объекте;* – *выбор наиболее типичной ЧС;* – *разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;* – *разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;* – *разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий*	*4.Защита в чрезвычайных ситуациях:* *- Электробезопасность* *- Чрезвычайные ситуации природного характера (сильный мороз)* *- Чрезвычайные ситуации связанные с проникновением посторонних на производственную территорию*
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – *специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;* – *организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны*	*5. Законодательная и нормативная база*
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	*1. План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами* *2.План эвакуации людей*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.03.17г

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Профессор, доктор технических наук		10.03.17г

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0ВМ51	Посеницкий Евгений Александрович		10.03.17

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 90 страниц, 18 рисунков, 27 таблиц, 30 источников, 6 приложений.

Ключевые слова: математическое моделирование, кристаллизационное выделение, переработка облученного ядерного топлива, линейный кристаллизатор.

Объектом исследования является динамика процесса кристаллизации из азотнокислого раствора нитрата уранила в линейном кристаллизаторе непрерывного типа.

Цель работы – математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в рабочем объеме аппарата, получение аналитических выражений для оперативных оценок параметров работы аппарата.

Актуальность работы заключается в том, что мировая атомная энергетика развивается в соответствии с двумя различными концепциями, реализующими открытый и замкнутый ядерный топливный цикл. Технология кристаллизационного выделения является одним из наиболее эффективных способов выделения целевых продуктов переработки ОЯТ в кристаллической форме из азотнокислых растворов при использовании водных методов переработки ОЯТ. Привлекательность процесса кристаллизационного выделения, в сравнении с экстракционными методами, главным образом, связана с его безреагентностью и компактностью.

В результате исследования построена математическая модель кристаллизационного выделения урана; проанализированы различные режимы работы линейного кристаллизатора; определен режим максимальной эффективности выделения целевого продукта и получены аналитические выражения для оценки параметров работы аппарата в данном режиме; проведено сравнение результатов модельного эксперимента и расчетных данных.

Для проведения расчетов использована расчетная программа, реализованная на объектно-ориентированном языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio 2013.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

− ГОСТ 12.0.003-74 (1999) ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы классификации;

− ГОСТ 12.1.003-83 (1991) ССБТ. Шум. Общие требования безопасности;

− ГОСТ 12.1.006-84 (1999) ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля;

− ГОСТ 12.1.009-76 (1999) ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения;

− ГОСТ 12.1.019-79 (1996) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;

− ГОСТ 12.1.036-81 (1996) ССБТ. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях;

− СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки;

− СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение;

− СН-3223-85. Санитарные нормы допустимых уровней шума на рабочих местах;

− СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки;

− СНиП 23-03-03 Защита от шума.

Сокращения

В данной работе используются следующие сокращения:

ОЯТ – облученное ядерное топливо;

ГНУ – гексагидрат нитрата уранила $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$;

НУ – нитрат уранила $UO_2(NO_3)_2$;

РАО – радиоактивные отходы;

ФГУП «ГХК» – федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-Химический Комбинат»;

АО «ВНИИНМ» – акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара»;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом.

Определения

В данной работе используются следующие определения:

Экстракция – экстрагирование, процесс разделения смеси жидких или твёрдых веществ с помощью избирательных растворителей (экстрагентов);

Аффинаж – процесс получения высокочистых металлов путём отделения от них загрязняющих примесей;

Маточный поток – поток азотнокислого раствора целевого продукта (урана) из которого происходит кристаллизация;

Материальный баланс – соотношение между количеством исходных материалов, готового продукта, побочных продуктов, отбросов и материальных потерь.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 3
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 4
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА 15
2.1 Построение математической модели 15
2.1.1. Размер включений кристаллической фазы 15
2.1.2. Скорость твердой фазы 16
2.1.3. Условие массового баланса в рабочем объеме кристаллизатора 16
2.1.4. Условие сохранения количества центров кристаллизации 17
2.1.5. Условие теплового баланса в рабочем объеме кристаллизатора 18
2.1.6. Математическая модель линейного кристаллизатора 19
2.2 Постановка задач о запуске аппарата и смене накопительной емкости 21
2.3 Метод решения системы уравнений математической модели 26
2.4 Результаты расчетов 28
2.5 Оценка времени заполнения накопительной емкости 36
2.6 Валидация математической модели 40
3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ 43
3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения 43
3.2 Инициация проекта 46
3.3 Планирование управления научно-техническим проектом 48
3.4 Бюджет научно–технического исследования (НТИ) 52
3.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования 58
4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ 68
4.1 Анализ опасных и вредных факторов 69
4.2 Производственная безопасность 70

4.3 Рабочее место, оценка условий труда на рабочем месте 76
4.4 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (техника безопасности) 78
4.5 Экологическая безопасность 81
4.6 Пожарная безопасность 81
4.7 Чрезвычайные ситуации 83
4.8 Выводы и рекомендации 84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 86
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА 87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 89
ПРИЛОЖЕНИЕ А 93
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 105
ПРИЛОЖЕНИЕ В 106
ПРИЛОЖЕНИЕ Г 108
ПРИЛОЖЕНИЕ Д 109
ПРИЛОЖЕНИЕ Е 110

ВВЕДЕНИЕ

Мировая атомная энергетика развивается в соответствии с двумя различными концепциями, реализующими открытый и замкнутый ядерный топливный цикл. Открытый топливный цикл заключается в отказе от переработки извлекаемого из реактора ОЯТ и использования невыгоревшего урана и плутония для повторного изготовления топлива. Однако, стоит отметить, что в реакторе выгорает 5-10% элементов топливной композиции. Поэтому существует альтернативная концепция (замкнутый топливный цикл), направленная на выделение из ОЯТ невыгоревших целевых продуктов (таких как U и Pu) и их повторное использование для изготовления ядерного топлива. Технология кристаллизационного выделения является одним из наиболее эффективных способов выделения целевых продуктов переработки ОЯТ в кристаллической форме (в виде гексагидрата нитрата уранила или уранила-плутонила) из азотнокислых растворов при использовании водных методов переработки ОЯТ. Привлекательность процесса кристаллизационного аффинажа, в сравнении с экстракционными методами, главным образом, связана с его безреагентностью и компактностью.

Целью данной работы является моделирование процесса кристаллизационного выделения в линейном кристаллизаторе непрерывного типа на примере выделения кристаллов ГНУ.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1. разработать математическую модель рассматриваемого процесса;
2. разработать и реализовать численный алгоритм решения системы уравнений математической модели;
3. провести анализ различных режимов работы линейного кристаллизатора;
4. получить упрощенные оценки для оперативного анализа работы аппарата;
5. провести сравнение результатов расчетов по математической модели с аналитическими оценками и результатами модельных экспериментов.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В Российской Федерации принята концепция замкнутого топливного цикла (рисунок 1.1). На ПО «Маяк» в промышленном масштабе реализована технология переработки ОЯТ, основанная на растворении ОЯТ в азотной кислоте с последующим экстракционным выделением урана и плутония (PUREX-процесс). На ФГУП «ГХК» создаётся опытно-демонстрационный центр по переработке ОЯТ по технологии, минимизирующей образование жидких РАО. Ввод предприятия в эксплуатацию намечен на 2018 год.

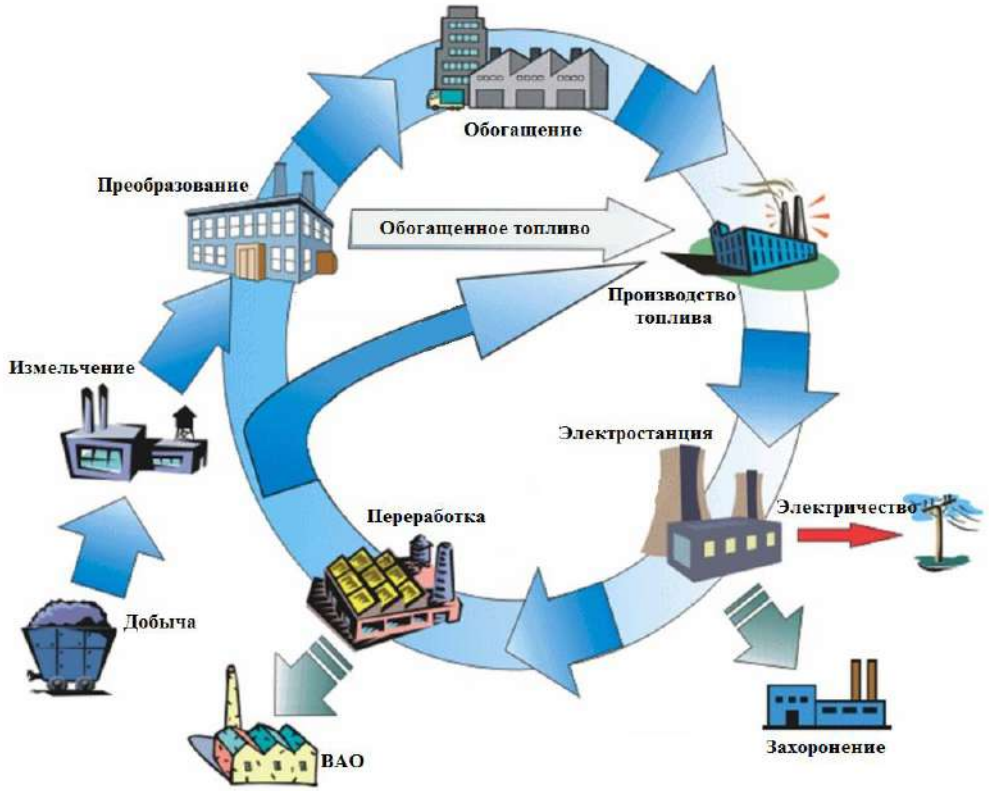


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема замкнутого топливного цикла в атомной энергетике

Впервые использование операции кристаллизационной очистки урана в технологии переработки ОЯТ было предложено немецкими исследователями для замены второго экстракционного цикла на цикл кристаллизации урана в виде $6H_2O \cdot UO_2(NO_3)_2$ [1]. Авторами было проведено подробное исследование системы «уранилнитрат–азотная кислота– нитраты металлов» [2] в широком диапазоне температур и показано, что кристаллический ГНУ обладает

уникальным свойством - отсутствием изоморфных включений примесей других элементов. Этот факт позволяет рассчитывать на достаточно высокую чистоту образующихся кристаллов ГНУ.

На заводе WAK (перерабатывающий завод Карлсруэ) был создан проект установки под названием «Milli», предусматривающий использование высоких насыщений экстрагента ураном в первом экстракционном цикле и последующую кристаллизационную переочистку реэкстракта урана, что позволило получить урановый продукт требуемой чистоты [3,4]. Кристаллизацию предполагалось проводить при температуре минус 30 °С в периодическом режиме (порционная кристаллизация с промывкой кристаллов в охлаждаемом реакторе с мешалкой) с одновременным вымораживанием воды. Однако проект «Milli» не состоялся из-за остановки завода WAK.

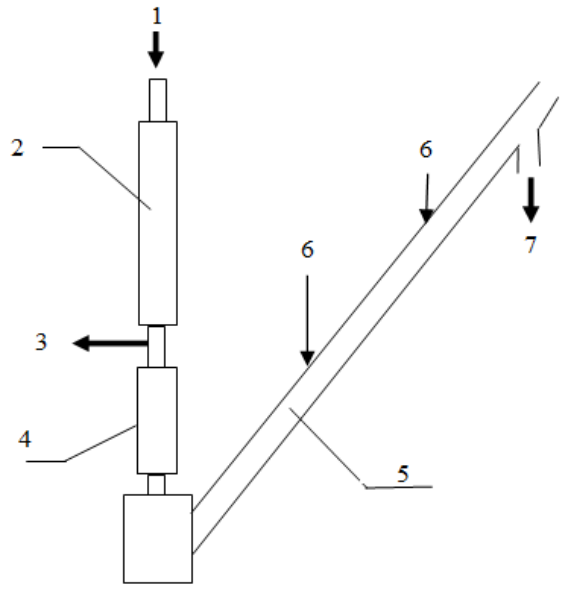
В настоящее время кристаллизационное направление активно развивается в Японии [5-10] для отделения основной массы урана на начальной стадии переработки ОЯТ реактора «JOYO» непрерывной кристаллизацией ГНУ из азотнокислого раствора с концентрацией 550 г/л по урану. По оценке японских специалистов [6] включение в технологию переработки ОЯТ безреагентного процесса кристаллизации урана, составляющего от 70 до 85 мас.% в ОЯТ, в комбинации с экстракционным переделом обеспечивает ряд преимуществ, по сравнению с традиционно используемым PUREX-процессом:

- относительную простоту для дистанционного управления;
- сокращение объёма органического разбавителя при экстракции;
- снижение затрат на оборудование и объёма горячей камеры;
- сокращение объёма жидких радиоактивных отходов;
- соблюдение принципа нераспространения за счет неразделения урана и плутония при переработке ОЯТ.

Японская технология реализуется в шнековом аппарате-кристаллизаторе с подключением дополнительных аппаратов для отделения образующегося маточника, промывки и осушения (дренажа) кристаллов ГНУ.

В России кристаллизационная очистка как технологическая операция, но для условий первого экстракционного цикла переработки торий-уранового топлива, впервые была предложена исследователями АО «ВНИИНМ» [11-13] и включала: отделение кристаллизацией основной массы тория и последующий экстракционный аффинаж урана из маточного раствора. Это решение обеспечивало десятикратное сокращение объёмов перерабатываемых потоков, соответственно, жидких радиоактивных отходов и количества потребных производственных площадей. Позднее работы в АО «ВНИИНМ» по кристаллизационной технологии были переориентированы на переработку уран-плутониевого топлива.

В отличие от японских и немецких исследователей усилия российских исследователей были направлены на создание полностью непрерывной технологии кристаллизационной очистки урана, включающей операции кристаллизации урана в виде ГНУ (выделение из раствора), их противоточной промывки (глубокая очистка от примесей), дренаж кристаллов (отделение от водной фазы для компактизации продукта) и выгрузку осушенных кристаллов в приёмные ёмкости. Перечисленные операции предполагается последовательно выполнять в одном аппарате - кристаллизаторе непрерывного действия. Для минимизации объёма отходообразующего маточного раствора от кристаллизации технология ориентировалась на переработку высококонцентрированного исходного уранового раствора (плава) с концентрацией по урану от 800 до 1000 г/л.



1 - Ввод плава ГНУ
2 - Кристаллизационная колонка
3 - Вывод маточного и промывного раствора
4 - Зона промывки кристаллов ГНУ
5 - Шнековый транспортер
6 - Принудительный ввод промывного раствора
7 - Выход кристаллов ГНУ с промывным раствором

Рисунок 1.2 - Схема кристаллизатора непрерывного типа с шнековым транспортером (ШТ)

Для выгрузки кристаллического продукта в первом макетном варианте кристаллизатора непрерывного действия (рисунок 1.2) [14] был использован ШТ, захватывающий кристаллы в нижней части кристаллизационной колонны и транспортирующий их для выгрузки вверх под углом 60° к горизонту. ШТ служил одновременно и зоной промывки кристаллов ГНУ, осуществляемой встречным потоком промывного раствора. На начальном этапе была показана принципиальная возможность достижения высокой степени очистки (порядка 10^2-10^3) ГНУ от примесей. Но одновременно был выявлен ряд аппаратурно-технологических трудностей в проведении данного процесса:

- «поршневой эффект», суть которого состоит в том, что перемещаемые в ШТ кристаллы ГНУ плотно заполняют межвитковое пространство шнека, приобретая свойства поршня;
- постепенное накопление кристаллов в нижней части кристаллизационной колонны в зауженном месте перед их входом в ШТ;

- низкое время отклика на изменение условий эксперимента (первые кристаллы ГНУ появлялись на выходе из аппарата через 1,5-2 часа от начала подачи расплава ГНУ, выход аппарата на стабильный равновесный режим работы требовал 3-4 часа);
- необходимость оборота больших масс (килограммов) урана, их фильтрования и последующей переочистки.

В связи с перечисленными причинами был разработан новый аппарат линейного типа для кристаллизации ГНУ [15], лишённый перечисленных выше недостатков.

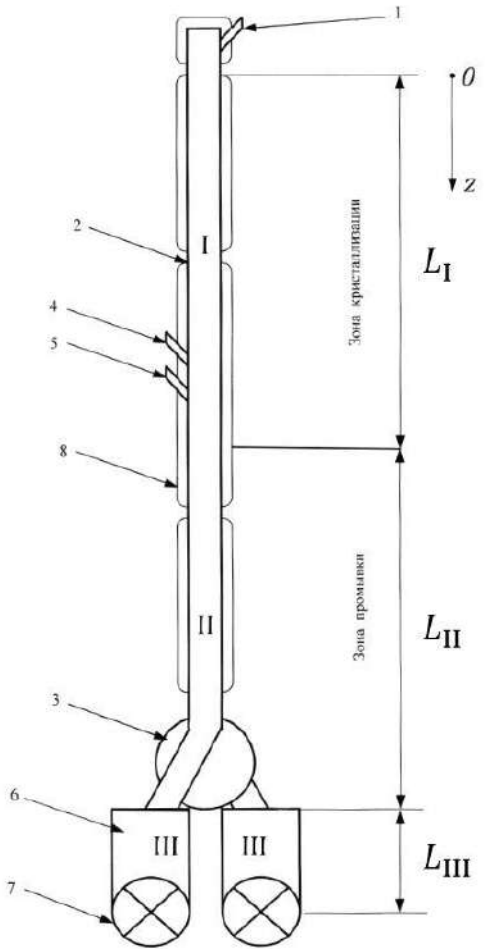


Рисунок 1.3 - Схема линейного кристаллизатора непрерывного типа. 1 – обогреваемый штуцер для подачи высококонцентрированного раствора (плава), 2 – рабочий объем кристаллизатора, 3 – распределительный кран, 4 – штуцер для вывода маточного раствора, 5 – штуцер для вывода отработанного промывного раствора, 6 – накопительная емкость, 7 – полнопроходной кран, 8 – охлаждающая рубашка (три контура), I – зона кристаллизации, II – зона промывки, III – накопительная емкость

В настоящий момент линейный кристаллизатор представляет собой металлическую трубу с внешней охлаждающей рубашкой 8 (рисунок 1.3). Внутренний объём трубы 2 (рабочий объём) разделен на две зоны: зону кристаллизации (I) и зону промывки и сбора кристаллов (II). В рабочем состоянии кристаллизатор располагается вертикально. Сверху в рабочий объем (в зону I) подается нагретый до определенной температуры маточный азотнокислый раствор, содержащий выделяемый (целевой) продукт в растворённом виде. Стенка рабочего объёма охлаждается хладагентом, циркулирующим по охлаждающей рубашке аппарата. При продвижении самотеком вниз по рабочему объёму аппарата маточный раствор охлаждается и становится пересыщенным по содержанию выделяемого продукта. Начинается процесс роста кристаллов выделяемого продукта в маточном растворе. Образующиеся кристаллы движутся в зоне I сонаправленно с маточным раствором, приобретая дополнительную по сравнению с раствором скорость за счёт разницы массовых плотностей.

В нижнюю часть рабочего объёма аппарата (в зону II) подается азотнокислый промывной раствор, который по мере вытеснения осаждающимися кристаллами поднимается вверх по рабочему объёму аппарата. Начальная температура промывного раствора и начальная концентрация содержащегося в нём целевого продукта подбираются таким образом, чтобы по мере прохождения кристаллов по зоне II происходило их частичное растворение в промывном растворе с целью очистки приповерхностных слоев кристаллов от захваченных примесей. В итоге, в зоне II кристаллы целевого продукта движутся во встречных направлениях с промывным раствором, в результате чего линейная скорость движения кристаллов в зоне II снижается по сравнению со скоростью в зоне I. Очищенные от примесей кристаллы ГНУ поступают в накопительную емкость, которая подлежит замене после заполнения целевым продуктом.

На границе раздела зон I и II происходит удаление маточного 4 и промывного 5 растворов из рабочего объема аппарата, и, соответственно,

переключение режима движения кристаллической фазы с сонаправленного с жидкой фазой на встречный. Поскольку размер области переключения режима скорости движения кристаллов является незначительным по сравнению с размерами рабочих зон I и II, то при математическом описании можно считать переходную область предельно малой, а процесс переключения скорости мгновенным.

Конструкция узлов загрузки маточного раствора (в верхней части зоны I) и выгрузки кристаллов (в нижней части зоны II) позволяет организовать непрерывную работу кристаллизатора. Конструкция охлаждающей рубашки аппарата обеспечивает независимое охлаждение нескольких участков рабочих зон I и II.

Одним из наиболее важных параметров определяющих динамику гидродинамических процессов рабочем объеме аппарата является плотность раствора жидкой фазы $\rho_{ж}$.

Информация о плотности жидкого раствора НУ для всего возможного диапазона значений массовых долей нитрата уранила ($C^m_{\text{НУ}}$) и азотной кислоты ($C^m_{\text{HNO}_3}$) при различных температурах раствора отсутствует. Определенные экспериментальные трудности представляет измерение плотности раствора при концентрации НУ, превышающей концентрацию насыщения при данной температуре ($C^m_{\text{НУ}} > C^{m,\text{нас}}_{\text{НУ}}(T)$), из-за распада пересыщенного раствора. Для оценки плотности многокомпонентных растворов часто используют принцип аддитивности, то есть предположение, что молекулы отдельных компонентов занимают в растворе свой определенный объем. Тогда выражение для плотности раствора через плотность отдельных составляющих имеет вид

$$\frac{1}{\rho_{ж}} = \frac{C^m_{\text{НУ}}}{\rho_{\text{НУ}}} + \frac{C^m_{\text{HNO}_3}}{\rho_{\text{HNO}_3}} + \frac{C^m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}, \qquad (1)$$

где $\rho_{НУ}$, ρ_{HNO_3}, ρ_{H_2O} - плотность НУ, азотной кислоты и воды соответственно. Для массовых долей компонент жидкого раствора ($C^m_{НУ}$, $C^m_{HNO_3}$ и $C^m_{НУ}$) справедливо соотношение

$$C^m_{НУ} + C^m_{HNO_3} + C^m_{H_2O} = 1. \quad (2)$$

Поскольку НУ в чистом виде в жидкой фазе не существует, то его плотность оценивается по плотности кристаллической фазы ГНУ ($\rho_{ГНУ} = \rho_{тв} = 2{,}8$ кг/л) с учетом коэффициента уплотнения β при кристаллизации ГНУ из жидкого раствора ($\beta = 1{,}05$) и учета наличия в ГНУ молекул воды. Окончательно, для оценки $\rho_{НУ}$ можно использовать выражение

$$\rho_{НУ} = \frac{\rho_{H_2O}\rho_{тв}}{\beta(1+\alpha)\rho_{H_2O} + \alpha\rho_{тв}} = 4{,}4 \text{ кг/л},$$

где параметр $\alpha = \frac{6M_{H_2O}}{M_{НУ}} = 0{,}274$ определяется отношением масс шести молекул воды и молекулы НУ.

НУ имеет ограниченную растворимость в водных растворах азотной кислоты. Изотермы растворимости НУ представлены на рисунке 1.4 (концентрации компонентов раствора выражены в мас.%). В случае пересыщения раствора по НУ происходит выпадение в кристаллическую фазу избыточного НУ в форме ГНУ - $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. Из присутствующей в жидкой фазе воды можно условно выделить часть, необходимую на превращение всего НУ в ГНУ, и оставшуюся «свободную» часть. Учитывая, что при обращении кристаллов ГНУ на одну молекулу НУ расходуется шесть молекул воды, можно записать $C^m_{H_2O} = C^m_{H_2O/ГНУ} + C^m_{H_2O/своб}$, где $C^m_{H_2O/ГНУ} = \alpha C^m_{НУ}$.

С учетом последних преобразований уравнение (2) может быть представлено в виде

$$C^m_{НУ}(1+\alpha) + C^m_{HNO_3} + C^m_{H_2O/своб} = 1. \quad (3)$$

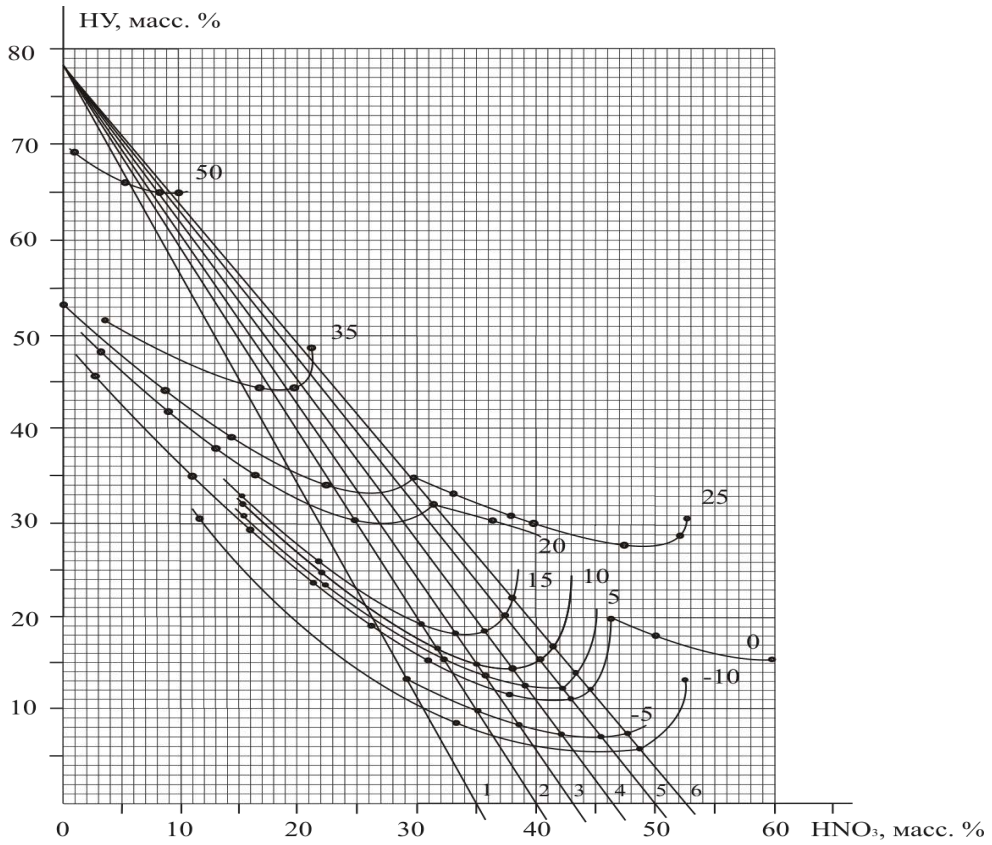


Рисунок 1.4 - Изотермы растворимости системы $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ и расположение рабочих линий процесса кристаллизации ГНУ (прямые наклонные линии на диаграмме)

Принимая во внимание тот факт, что в процессе роста кристаллической фазы ГНУ азотная кислота и «свободная» вода не расходуются и отношение их массовых долей определяется только начальным составом жидкой фазы, поступающей в аппарат, можем записать

$$C^m_{\mathrm{H_2O/своб}} \Big/ C^m_{\mathrm{HNO_3}} = \psi_0 = const,$$

поэтому справедливо соотношение $C^m_{\mathrm{НУ}}(1+\alpha) + C^m_{\mathrm{HNO_3}}(1+\psi_0) = 1$ или

$$C^m_{\mathrm{НУ}} = \frac{1}{1+\alpha} - C^m_{\mathrm{HNO_3}} \frac{1+\psi_0}{1+\alpha} = C_{\mathrm{тв}} - \psi C^m_{\mathrm{HNO_3}}, \qquad (4)$$

где $C_{\mathrm{тв}} = {}^{1}\Big/_{(1+\alpha)} = 0{,}785$;

$\psi = {}^{(1+\psi_0)}\Big/_{(1+\alpha)}$ – параметр рабочей линии процесса кристаллизации.

Соотношение (4) определяет уравнение рабочей линии процесса кристаллизации. Изменение массовых долей НУ и азотной кислоты в жидкой

фазе в процессе кристаллизационного аффинажа подчиняется этому соотношению, а наклон прямой на диаграмме $C^m_{\text{НУ}}$ от $C^m_{\text{HNO}_3}$ задается параметром ψ, определяемым начальным составом питающего раствора и остающимся неизменным на протяжении всего цикла кристаллизации.

Массовая плотность жидкой фазы является функцией состава и температуры. Эксперименты, проведенные в АО «ВНИИНМ», показали, что формула (1) недостаточно точно описывает зависимость плотности жидкого раствора от состава, особенно в области высоких (порядка 800 - 1000 г/л) концентраций. В технической литературе предлагается целый ряд эмпирически полученных соотношений для оценки плотности растворов НУ. Наиболее надежным представляется формула, предложенная для определения плотности азотнокислого раствора НУ при 25 °С Розеном А.М. [16].

В статье [9] представлены результаты определения растворимости ГНУ в водных азотнокислых растворах в диапазоне температур от минус 30 до плюс 35 °С. На основе проведенных измерений авторами предложено уравнение зависимости плотности таких растворов (г/л) от концентраций урана, азотной кислоты и температуры.

$$\rho_{\text{ж}} = 1023 + 23{,}96 \cdot C_{\text{HNO}_3} + 1.313 \cdot C_{\text{U}} - \left(0{,}47 + 0{,}04 \cdot C_{\text{HNO}_3}\right)T, \qquad (5)$$

где C_{HNO_3} – концентрация азотной кислоты в моль/л;

C_{U} – концентрация урана или его суммы с плутонием в растворе;

T - температура в °С.

Пересчет концентрации азотной кислоты и урана (5) в массовые доли в растворе азотной кислоты и НУ соответственно с использованием формул

$$\begin{gathered} C^m_{\text{НУ}}\rho_{\text{ж}} = K_1 C_{\text{U}},\ K_1 = {}^{M_{\text{НУ}}}\!/_{M_{\text{U}}} = 1{,}66; \\ C^m_{\text{HNO}_3}\rho_{\text{ж}} = K_2 C_{\text{HNO}_3}, K_2 = 63\ \text{г/моль} \end{gathered} \qquad (6)$$

приводит к следующему уравнению для определения плотности азотнокислого урансодержащего раствора

$$\rho_{ж} = \frac{1023 - 0{,}4681 \cdot T}{1 - 0{,}79 \cdot C_{НУ}^{m} - 0{,}466 \cdot C_{HNO_3}^{m} + 0{,}00055 \cdot C_{HNO_3}^{m} \cdot T} \quad (7)$$

Для анализа эффективности уравнений в АО «ВНИИНМ» была проведена серия экспериментов по измерению плотностей растворов в широком диапазоне концентраций урана, азотной кислоты и температуры. Результаты экспериментов подтвердили высокую точность определения плотности азотнокислых урановых растворов с использованием формулы (7). Отклонение расчетных и экспериментальных результатов не превысило 2%.

В данной выпускной квалификационной работе представлено описание построения и подробный анализ математической модели [17,18], описывающей динамику кристаллообразования в линейном кристаллизаторе. В отличие от предложенной сотрудниками НИ ТПУ математической модели кристаллизационного аффинажа [19-21], основанной на методе клеточных автоматов, и ранее разработанной в АО «ВНИИНМ» модели стационарного режима работы аппарата [22-24], представленная в настоящей работе модель позволяет оценивать характерные времена стабилизации параметров кристаллизационного процесса при изменении режима работы аппарата.

Очевидно, что существует ряд практически важных вопросов, связанных с эксплуатацией линейного кристаллизатора, которые не могут быть проанализированы в рамках модели стационарной работы кристаллизатора. Например, особый интерес для разработки АСУ ТП представляет расчет времени заполнения накопительной емкости в стартовом режиме работы кристаллизатора и после замены заполненной кристаллическим продуктом накопительной емкости на порожнюю. Получены и проанализированы упрощенные аналитические оценки для времени заполнения накопительной емкости [25] в режимах «максимальной эффективности» [26] работы аппарата (т.е. в режимах максимального извлечения целевого продукта из жидкого раствора при заданных температурных параметрах процесса).

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА

2.1 Построение математической модели

Создаваемая математическая модель линейного кристаллизатора должна описывать динамику движения жидкой и твёрдой фаз в рабочем объёме кристаллизатора и динамику роста/растворения кристаллов ГНУ из пересыщенного по НУ азотнокислого раствора. Ниже представлен подробный вывод системы уравнений, описывающих эти процессы в нестационарном режиме работы аппарата.

Рассмотрим рабочий объем кристаллизатора как одномерное пространство. Введем координатную ось z, направленную сверху вниз. В качестве начала отсчета $(z = 0)$ выберем координату входа питающего урансодержащего раствора (плава НУ) в рабочий объем кристаллизатора. Предположим, что зона кристаллизации аппарата имеет длину L_{I} (для зоны I $0 \leq z \leq L_{\text{I}} - 0$) , а промывная зона аппарата длину L_{II} (для зоны II $L_{\text{I}} + 0 \leq z \leq L_{\text{I}} + L_{\text{II}} - 0$).

2.1.1. Размер включений кристаллической фазы

При движении по рабочему объему аппарата температура раствора за счет теплообмена со стенками аппарата падает, раствор становится пересыщенным по НУ и происходит его распад с выделением кристаллической фазы. В наиболее простой постановке (в предположении, что кристаллическая фаза представляет собой мелкодисперсные образования, имеющие форму близкую к сферической) выражение для изменения характерного размера включений твердой фазы со временем можно записать в следующем виде

$$\frac{dR(z,t)}{dt} = k\left[C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(z,t) - C_{\text{НУ}}^{m}(z,t)\right], \tag{8}$$

где k – константа скорости роста кристаллической фазы. Учитывая, что

$$\frac{dR(z,t)}{dt} = \frac{\partial R(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t}\frac{\partial R(z,t)}{\partial z} = \frac{\partial R(z,t)}{\partial t} + v_{\text{тв}}\frac{\partial R(z,t)}{\partial z} \tag{9}$$

выражение (8) запишется в виде

$$\frac{\partial R(z,t)}{\partial t} + v_{\text{тв}} \frac{\partial R(z,t)}{\partial z} = k[C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(z,t) - C_{\text{НУ}}^{m}(z,t)]. \quad (10)$$

где $R(z,t)$ – радиус кристаллов ГНУ в выделенном сечении аппарата;

$v_{\text{тв}}$ – скорость частиц твердой фазы.

2.1.2. Скорость твердой фазы

Рассмотрим уравнение, описывающее скорость движения (осаждения) сферических частиц твердой фазы в вязкой жидкости. Указанная формула получена из условий равновесия силы Архимеда и силы сопротивления движению сферического тела в вязкой среде (силы Стокса) [27]. Очевидно, в нестационарном режиме в условиях небольших ускорений движущихся твердых частиц, формула применима к описанию скорости частиц твердой фазы

$$v_{\text{тв}}(z,t) = v_{\text{ж}}(z,t) + \frac{2}{9}\frac{g}{\nu} R^2(z,t) \left[\frac{\rho_{\text{тв}}}{\rho_{\text{ж}}(\text{z},\text{t})} - 1\right], \quad (11)$$

где g – ускорение свободного падения,

ν – кинематическая вязкость раствора.

2.1.3. Условие массового баланса в рабочем объеме кристаллизатора

Проанализируем материальный баланс в выделенном элементарном объеме рабочего пространства кристаллизатора. Выделенный объем имеет цилиндрическую форму - площадь основания (площадь сечения рабочего объема кристаллизатора) S и высоту - Δz. Рассмотрим изменение массы вещества в элементарном объеме за время Δt за счет потока вещества через объем. Обозначим плотности входящего и выходящего потоков $J_{\text{вх}}$ и $J_{\text{вых}}$ соответственно, а массу вещества в объеме $M(t)$. Условие сохранения массы вещества запишем следующим образом

$$M(t) + J_{\text{вх}}(t)\Delta t = M(t+\Delta t) + J_{\text{вых}}(t)\Delta t. \quad (12)$$

Запишем выражения для плотности потоков вещества через сечения рабочей зоны кристаллизатора

$$J_{\text{вх}}(t) = \rho_{\text{ж}}(z,t) v_{\text{ж}}(z,t)[1 - W(z,t)] + \rho_{\text{тв}} v_{\text{тв}}(z,t) W(z,t); \quad (13)$$

$$J_{\text{вых}}(t) = \rho_{\text{ж}}(z+\Delta z,t)v_{\text{ж}}(z+\Delta z,t)[1-W(z+\Delta z,t)] + \rho_{\text{тв}}v_{\text{тв}}(z+\Delta z,t)W(z+\Delta z,t).$$

где $v_{\text{ж}}$ обозначает скорость жидкой фазы в выделенном сечении рабочего объема соответственно;

W – объемная доля твердой фазы в растворе. Масса вещества в выделенном объеме равна

$$M(t) = S\Delta z[\rho_{\text{ж}}(z,t)[1-W(z,t)] + \rho_{\text{тв}}W(z,t)]. \quad (14)$$

Подставляя выражения (13,14) в условие сохранения массы (12) получим следующее уравнение

$$\frac{\partial\left[\rho_{\text{ж}}(z,t)v_{\text{ж}}(z,t)[1-W(z,t)]\right]}{\partial z} + \rho_{\text{тв}}\frac{\partial[v_{\text{тв}}(z,t)W(z,t)]}{\partial z} = -\left[\frac{\partial\left[\rho_{\text{ж}}(z,t)[1-W(z,t)]\right]}{\partial t} + \rho_{\text{тв}}\frac{\partial W(z,t)}{\partial t}\right]. \quad (15)$$

Для получения условия сохранения массы НУ в уравнениях (13,14) необходимо массу жидкой фазы домножить на массовую долю НУ, а массу твердой фазы умножить на отношение молярной массы НУ к молярной массе ГНУ. В результате выполнения указанных действий получим уравнение, выражающее условие сохранения количества НУ

$$\frac{\partial\left[C_{\text{НУ}}^{m}(z,t)\rho_{\text{ж}}(z,t)v_{\text{ж}}(z,t)[1-W(z,t)]\right]}{\partial z} + \frac{\rho_{\text{тв}}}{1+\alpha}\frac{\partial[v_{\text{тв}}(z,t)W(z,t)]}{\partial z} = -\left[\frac{\partial\left[C_{\text{НУ}}^{m}(z,t)\rho_{\text{ж}}(z,t)[1-W(z,t)]\right]}{\partial t} + \frac{\rho_{\text{тв}}}{1+\alpha}\frac{\partial W(z,t)}{\partial t}\right]. \quad (16)$$

2.1.4. Условие сохранения количества центров кристаллизации

Аналогичны рассуждения с выделением элементарного объема и анализом входящих и выходящих потоков можно применить для вывода уравнения, отражающего сохранение плотности количества центров кристаллизации $n(z,t)$. Предположим, что центры кристаллизации в выделенном сечении распределены однородно. Вводя величину $N(z,t)$, характеризующую количество центров кристаллизации в элементарном объеме

$$N(z,t) = n(z,t)S\Delta z, \tag{17}$$

а также плотности втекающего внутрь и вытекающего из элементарного объема потоков количества центров кристаллизации

$$\begin{gathered} j_{\text{вх}}(t) = n(z,t)v_{\text{тв}}(z,t); \\ j_{\text{вых}}(t) = n(z+\Delta z,t)v_{\text{тв}}(z+\Delta z,t). \end{gathered} \tag{18}$$

Условие сохранения числа центров кристаллизации запишем в виде

$$N(t) + j_{\text{вх}}(t)\Delta t = N(t+\Delta t) + j_{\text{вых}}(t)\Delta t. \tag{19}$$

Подставляя выражения (17,18) в (19) получи следующее уравнение

$$\frac{\partial[n(z,t)v_{\text{тв}}(z,t)]}{\partial z} = -\frac{\partial n(z,t)}{\partial t}. \tag{20}$$

2.1.5. Условие теплового баланса в рабочем объеме кристаллизатора

Уравнение теплового баланса для стационарного режима работы кристаллизатора было получено из анализа условия теплового баланса (рисунок 2.1) для выделенного элементарного объема [18].

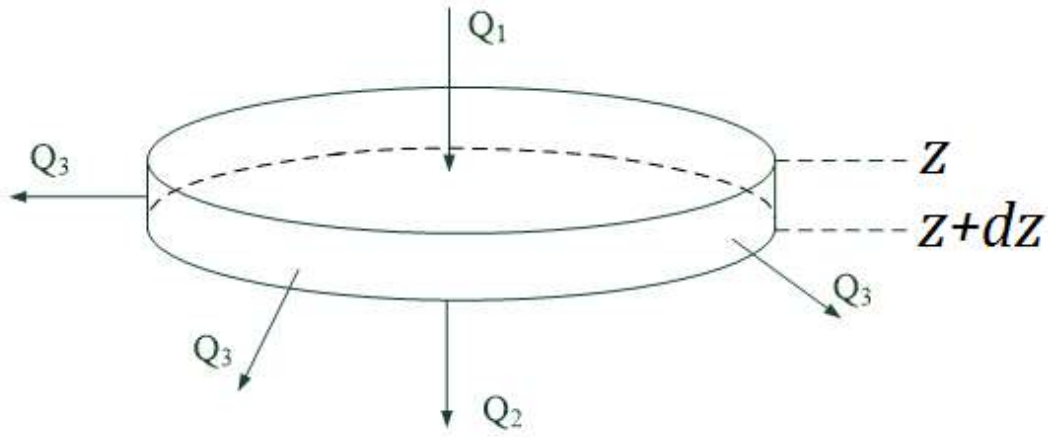


Рисунок 2.1 Схемы тепловых потоков в выделенном элементарном рабочем объеме аппарата

Проведя аналогичный анализ для условий нестационарного процесса, получим следующее уравнение

$$\begin{gathered} \frac{\partial}{\partial z}\left\{T(z,t)\left[v_{\text{тв}}(z,t)W(z,t) + v_{\text{ж}}(z,t)\frac{\rho_{\text{ж}}(z,t)}{\rho_{\text{тв}}}\frac{\mathbb{C}_{\text{ж}}(z,t)}{\mathbb{C}_{\text{тв}}}\left(1 - W(z,t)\right)\right]\right\} + \\ \frac{\partial}{\partial t}\left\{T(z,t)\left[W(z,t) + \frac{\rho_{\text{ж}}(z,t)}{\rho_{\text{тв}}}\frac{\mathbb{C}_{\text{ж}}(z,t)}{\mathbb{C}_{\text{тв}}}\left(1 - W(z,t)\right)\right]\right\} = A\left(T_{\text{ст}}(z) - T(z,t)\right), \end{gathered} \tag{21}$$

где $A = \frac{8\varkappa}{\kappa \mathbb{C}_{тв} \rho_{тв} D^2}$;

$\mathbb{C}_{тв}$ и $\mathbb{C}_{ж}$ – удельные теплоёмкости твердой и жидкой фаз соответственно;

D – диаметр поперечного сечения рабочего объема кристаллизатора;

$\varkappa$ – теплопроводность среды;

к – параметр теплообмена с охлаждающей стенкой ($0 < к < 1$);

$T_{ст}(z)$ - температура охлаждающей стенки рабочего объёма кристаллизатора. В данной модели температура кристаллической фазы полагается равной температуре жидкого раствора.

2.1.6. Математическая модель линейного кристаллизатора

Суммируя все соотношения, полученные в разделах 2.1.1-2.1.5, можно определить систему уравнений для описания работы кристаллизатора

№	Уравнение
1	$\frac{\partial R}{\partial t} + v_{тв} \frac{\partial R}{\partial z} = k\left(C_{НУ}^{m,нас} - C_{НУ}^{m}\right)$
2	$\frac{\partial [n v_{тв}]}{\partial z} = -\frac{\partial n}{\partial t}$
3	$W = \frac{4}{3}\pi R^3 n$
4	$\frac{\partial [C_{НУ}^{m} \rho_{ж} v_{ж}(1-W)]}{\partial z} + \frac{\rho_{тв}}{1+\alpha}\frac{\partial [v_{тв} W]}{\partial z} = -\left[\frac{\partial [C_{НУ}^{m} \rho_{ж}(1-W)]}{\partial t} + \frac{\rho_{тв}}{1+\alpha}\frac{\partial W}{\partial t}\right]$
5	$\frac{\partial}{\partial t}\left\{T\left[W + \frac{\rho_{ж}}{\rho_{тв}}\frac{\mathbb{C}_{ж}}{\mathbb{C}_{тв}}(1-W)\right]\right\} = A(T_{ст} - T) - \frac{\partial}{\partial z}\left\{T\left[v_{тв} W + v_{ж}\frac{\rho_{ж}}{\rho_{тв}}\frac{\mathbb{C}_{ж}}{\mathbb{C}_{тв}}(1-W)\right]\right\}$ (22)
6	$C_{НУ}^{m,нас} = C_{НУ}^{m,нас}(T)$ по диаграмме растворимости
7	$\rho_{ж} = \frac{1023 - 0.4681 \cdot T}{1 - 0.79 \cdot C_{НУ}^{m} - 0.466 \cdot C_{HNO_3}^{m} + 0.00055 \cdot C_{HNO_3}^{m} \cdot T}$

8	$\frac{\partial[\rho_{ж} v_{ж}(1-W)]}{\partial z}+\rho_{тв}\frac{\partial[v_{тв}W]}{\partial z}=-\left[\frac{\partial[\rho_{ж}(1-W)]}{\partial t}+\rho_{тв}\frac{\partial W}{\partial t}\right]$	
9	$v_{тв}=v_{ж}+\frac{2}{9}\frac{g}{\nu}R^{2}\left[\frac{\rho_{тв}}{\rho_{ж}}-1\right]$	

Запишем полученную после некоторых преобразований систему уравнений, описывающую динамику нестационарных процессов в линейном кристаллизаторе.

Уравнение	Параметр
$\frac{\partial R}{\partial t}+v_{тв}\frac{\partial R}{\partial z}=k\left(C_{НУ}^{m,нас}-C_{НУ}^{m}\right)$	$R(z,t)$
$\frac{\partial[nv_{тв}]}{\partial z}=-\frac{\partial n}{\partial t}$	$n(z,t)$
$W=\frac{4}{3}\pi R^{3}n$	$W(z,t)$
$\frac{\partial[C_{НУ}^{m}\rho_{ж}v_{ж}(1-W)]}{\partial z}+\frac{\partial[C_{НУ}^{m}\rho_{ж}(1-W)]}{\partial t}=$ $=-4\pi k C_{тв}\rho_{тв}R^{2}n\left(C_{НУ}^{m,нас}-C_{НУ}^{m}\right)$	$C_{НУ}^{m}(z,t)$
$\frac{\partial}{\partial t}\left\{T\left[W+\frac{\rho_{ж}}{\rho_{тв}}\frac{\mathbb{C}_{ж}}{\mathbb{C}_{тв}}(1-W)\right]\right\}=$ $=A(T_{ст}-T)-\frac{\partial}{\partial z}\left\{T\left[v_{тв}W+v_{ж}\frac{\rho_{ж}}{\rho_{тв}}\frac{\mathbb{C}_{ж}}{\mathbb{C}_{тв}}(1-W)\right]\right\}$	$T(z,t)$
$C_{НУ}^{m,нас}=C_{НУ}^{m,нас}(T)$ по диаграмме растворимости	$C_{НУ}^{m,нас}$
$\rho_{ж}=\frac{1023-0{,}4681\cdot T}{1-0{,}79\cdot C_{НУ}^{m}-0{,}466\cdot C_{HNO_3}^{m}+0{,}00055\cdot C_{HNO_3}^{m}\cdot T}$	$\rho_{ж}(z,t)$
$\frac{\partial[\rho_{ж}v_{ж}(1-W)]}{\partial z}+\frac{\partial[\rho_{ж}(1-W)]}{\partial t}=$ $=-4\pi k\rho_{тв}R^{2}n\left(C_{НУ}^{m,нас}-C_{НУ}^{m}\right)$	$v_{ж}(z,t)$
$v_{тв}=v_{ж}+\frac{2}{9}\frac{g}{\nu}R^{2}\left[\frac{\rho_{тв}}{\rho_{ж}}-1\right]$	$v_{тв}(z,t)$

(23)

Для выражения $\frac{\partial[v_{\text{тв}}W]}{\partial z}+\frac{\partial W}{\partial t}$, стоящего в четвертом и восьмом уравнениях системы (22) может быть доказано соотношение (с использованием первого, второго и третьего уравнений)

$$\frac{\partial[v_{\text{тв}}W]}{\partial z}+\frac{\partial W}{\partial t}=4\pi R^2\left(\frac{\partial R}{\partial t}+v_{\text{тв}}\frac{\partial R}{\partial z}\right)=4\pi R^2 k\left(C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}-C_{\text{НУ}}^{m}\right),$$

которое было использовано для записи математической модели (23).

Система уравнений (23) описывает поведение параметров процесса кристаллизации в нестационарном режиме. Ее можно использовать для описания стартового режима работы кристаллизатора – режима подачи питающего раствора в аппарат, заполненный азотной кислотой; а также для режима, который возникает после замены накопительной емкости, то есть когда заполненную кристаллами ГНУ емкость заменяют на емкость, заполненную водным азотнокислым раствором. В указанных задачах, в отличие от стационарного режима работы аппарата, необходимо рассматривать процесс в третьей зоне – в накопительной емкости.

2.2 Постановка задач о запуске аппарата и смене накопительной емкости

Для проведения расчетов требуется дополнить систему уравнений (23) граничными и начальными условиями в каждой зоне аппарата. В качестве начальных условий задачи о стартовом режиме можно рассматривать аппарат, заполненный водным раствором азотной кислоты. Температура раствора в аппарате совпадает с температурой стенки аппарата. Состав раствора, как правило, подбирается из соображений соответствия составов раствора и подаваемого на вход аппарата потока питания одной и той же рабочей линии, если специально не ставится задача исследовать режимы с несовпадающими рабочими линиями.

Для описания режима работы аппарата после смены накопительной емкости в качестве начальных условий рассматривается стационарное решение для значений всех параметров в первой и второй зонах аппарата, а третья зона

(накопительная емкость) предполагается заполненной водным азотнокислым раствором с температурой нижней части промывной зоны (то есть скачок температуры при переходе из промывной зоны в накопительную емкость отсутствует). Состав начального азотнокислого раствора в накопительной емкости и состав жидкой фазы в промывной зоне аппарата соответствуют одной рабочей линии. А вот состав жидкой фазы в зоне кристаллизации, в принципе, может соответствовать другой рабочей линии.

Обозначим: $z_{\text{I}} = L_{\text{I}}$, $z_{\text{II}} = L_{\text{I}} + L_{\text{II}}$, $z_{\text{III}} = L_{\text{I}} + L_{\text{II}} + L_{\text{III}} - H(t)$; где $H(t) -$ уровень (высота) заполнения накопительной емкости кристаллами ГНУ к моменту времени t $(0 \le H(t) \le L_{\text{III}})$.

Граничными условиями на верхней границе зоны кристаллизации являются характеристики подаваемого в аппарат потока питания Q_1:

$$\begin{cases} R(0,t) = 0 \\ n(0,t) = n_0 \\ W(0,t) = 0 \\ C^m_{\text{НУ}}(0,t) = C^{\text{вх}}_{\text{НУ}} \\ T(0,t) = T_0 \\ \rho_{\text{ж}}(0,t) = \rho_{\text{ж}}(C^{\text{вх}}_{\text{НУ}}, T_0) \\ v_{\text{ж}}(0,t) = v_0 \\ v_{\text{тв}}(0,t) = v_0 \end{cases}, \qquad (24)$$

где $C^{\text{вх}}_{\text{НУ}}, T_0, v_0, n_0 -$ задаваемые параметры (массовая доля НУ, температура, скорость, количество центров соответственно) раствора, поступающего в аппарат.

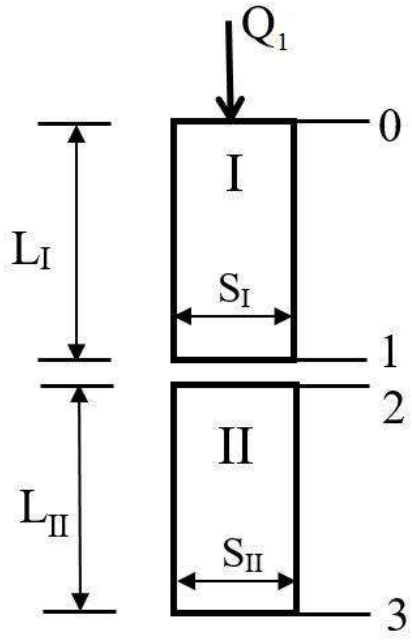


Рисунок 2.2 - Схематическое изображение границы раздела зоны кристаллизации (I) и зоны промывки (II)

Рассмотрим условия на границе зон кристаллизации и промывки (рисунок 2.2). На границе I и II зон происходит отсечка жидкой фазы первой зоны. Она выводится из аппарата отдельным жидким потоком. Твердая дисперсная фаза (мелкие частицы ГНУ) поступает сверху во вторую зону (в зону промывки). Во второй зоне меняется характер движения твердой фазы – она движется во встречном потоке жидкого раствора. Встречный поток обусловлен вытеснением жидкой фазы из объема при движении кристаллических частиц (в настоящей работе не рассматривается восходящий поток раствора кислоты, который может подаваться в нижнюю часть промывной зоны для стабилизации процесса частичного растворения кристаллической фазы; учет этого потока не представляет вычислительных проблем, но существенно усложняет вид уравнений математической модели и соотношений на границе промывная зона – накопительная емкость). Поскольку движение жидкой фазы в зоне промывки обусловлено вытеснением жидкой фазы за счет осаждения кристаллов ГНУ, для второй зоны аппарата и накопительной емкости справедливо следующее соотношение

$$v_{\text{тв}}W + v_{\text{ж}}(1 - W) = 0. \quad (25)$$

Условия на границах зоны II получены при учете того, что площади поперечного сечения рабочего объема зоны кристаллизации и промывной зоны равны $S_{\text{I}} = S_{\text{II}} = S$:

$$\begin{cases} R(z_{\text{I}} + 0, t) = R(z_{\text{I}} - 0, t) \\ v_{\text{тв}}(z_{\text{I}} + 0, t)n(z_{\text{I}} + 0, t) = v_{\text{тв}}(z_{\text{I}} - 0, t)n(z_{\text{I}} - 0, t) \\ W(z_{\text{I}} + 0, t) = \frac{4}{3}\pi R^3(z_{\text{I}} + 0, t)n(z_{\text{I}} + 0, t) \\ v_{\text{ж}}(z_{\text{I}} + 0, t) = F(z_{\text{I}} + 0, t)W(z_{\text{I}} + 0, t) \\ v_{\text{тв}}(z_{\text{I}} + 0, t) = v_{\text{ж}}(z_{\text{I}} + 0, t) + F(z_{\text{I}} + 0, t) \\ C^m_{\text{НУ}}(z_{\text{II}} - 0, t) = C^m_{\text{НУ}}(z_{\text{II}} + 0, t) \\ \rho_{\text{ж}}(z_{\text{II}} - 0, t) = \rho_{\text{ж}}(z_{\text{II}} + 0, t) \\ T(z_{\text{II}} - 0, t) = T_{\text{ст}}(z_{\text{II}}) \end{cases}, \quad (26)$$

где введено обозначение $F(z, t) = \frac{2}{9}\frac{g}{\nu}R^2(z, t)\left[\frac{\rho_{\text{тв}}}{\rho_{\text{ж}}(z,t)} - 1\right]$.

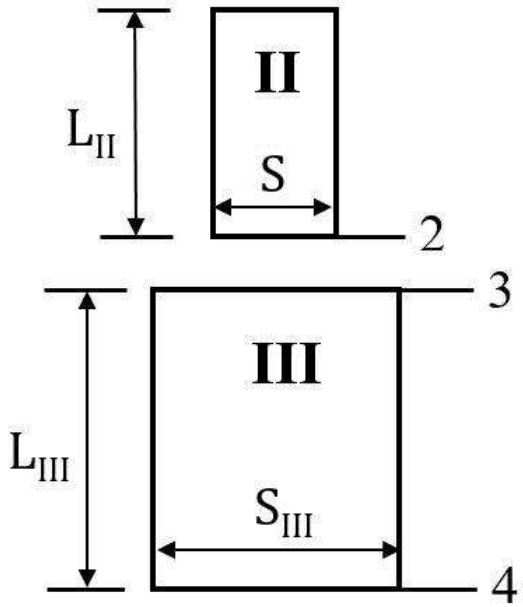


Рисунок 2.3 Схематическое изображение границы раздела зоны промывки (II) и накопительной емкости (III)

На границе зоны промывки (зона II) с накопительной емкостью (зона III) характер течения жидкой фазы не изменяется – восходящий поток жидкой фазы обеспечивается ее вытеснением за счет осаждения твердой фазы. Важным отличием при переходе из зоны II в зону III (рисунок 2.3) является существенное

различие в площадях сечения рабочего объема зон. Площадь поперечного сечения рабочего объема зоны III S_{III} на порядок больше площади сечения S зоны II, то есть справедливо соотношение $S_{\text{III}} \gg S$.

Несмотря на значительное изменение площади рабочего сечения при переходе через границу зон при анализе движения твердой и жидкой фаз в накопительной емкости в рамках рассматриваемой математической модели будем рассматривать только вертикальные составляющие скоростей. Кроме того, для простоты описания процесса будем предполагать, что кристаллические включения распределены равномерно по сечению зоны накопления. Эти допущения позволят, как и ранее для зон I и II описывать процесс седиментации твердой фазы в зоне накопления в условиях, когда в каждом сечении присутствуют включения твердой фазы одного размера, что существенно упрощает анализ процесса.

Условия на границах зоны III запишутся в виде

$$\begin{cases} R(z_{\text{II}}+0,t) = R(z_{\text{II}}-0,t) \\ v_{\text{тв}}(z_{\text{II}}+0,t)n(z_{\text{II}}+0,t)S_{\text{III}} = v_{\text{тв}}(z_{\text{II}}-0,t)n(z_{\text{II}}-0,t)S \\ W(z_{\text{II}}+0,t) = \dfrac{4}{3}\pi R^3(z_{\text{II}}+0,t)n(z_{\text{II}}+0,t) \\ v_{\text{ж}}(z_{\text{II}}+0,t) = F(z_{\text{II}}+0,t)W(z_{\text{II}}+0,t) \\ v_{\text{тв}}(z_{\text{II}}+0,t) = v_{\text{ж}}(z_{\text{II}}+0,t) + F(z_{\text{II}}+0,t) \\ \left.\dfrac{\partial C^m_{\text{НУ}}(z,t)}{\partial z}\right|_{(z=z_{\text{III}}-0)} = 0 \\ T(z_{\text{III}}-0,t) = T_{\text{ст}}(z_{\text{III}}) \\ \rho_{\text{ж}}(z_{\text{III}}-0,t) = \rho_{\text{ж}}\left(C^m_{\text{НУ}}(z_{\text{III}}-0,t), T_{\text{ст}}(z_{\text{III}})\right) \\ v_{\text{ж}}(z_{\text{III}}-0,t) = 0 \end{cases} \tag{27}$$

В качестве начальных условий задачи о стартовом режиме можно рассматривать заполнение аппарата раствором азотной кислоты (без НУ) с заданной концентрацией. Тогда начальные условия в зоне I $(0 \le z \le z_{\text{I}} - 0)$, II $(z_{\text{I}} + 0 \le z \le z_{\text{II}} - 0)$ и III $(z_{\text{II}} + 0 \le z \le z_{\text{III}} - 0)$ можно записать следующим образом

$$\begin{cases} R(z,0)=0 \\ n(z,0)=0 \\ W(z,0)=0 \\ C_{\text{НУ}}^{m}(z,0)=0 \\ T(z,0)=T_{\text{нач}}(z) \\ \rho_{\text{ж}}(z,0)=\rho_{\text{ж}}(0,T_{\text{нач}}(z)) \\ v_{\text{ж}}(z,0)=0 \\ v_{\text{тв}}(z,0)=0 \\ H(0)=0 \end{cases}, \tag{28}$$

где $T_{\text{нач}}(z)$ – заданное температурное распределение азотнокислого раствора, которым заполнен рабочий объем аппарата при $t=0$.

Для описания режима работы аппарата после смены накопительной емкости в качестве начальных условий рассматривается стационарное решение [24] для значений всех параметров в первой и второй зонах аппарата, а третья зона (накопительная емкость) предполагается заполненной азотнокислым раствором с температурой нижней части промывной зоны.

2.3 Метод решения системы уравнений математической модели

Для проведения расчетов по математической модели нестационарных режимов работы линейного кристаллизатора (23) требуется провести процедуру обезразмеривания полученной системы уравнений. Выполним замену переменных:

$$\begin{cases} z=\bar{z}\cdot L \\ t=\bar{t}\cdot t_{\text{хар}} \\ R(z,\mathrm{t})=\bar{R}(z,\mathrm{t})\cdot R_{\text{макс}} \\ n(z,\mathrm{t})=\bar{n}(z,\mathrm{t})\cdot n_0 \\ T(z,\mathrm{t})=\bar{T}(z,\mathrm{t})\cdot T_0 \\ \rho_{\text{ж}}(z,\mathrm{t})=\overline{\rho_{\text{ж}}}(z,\mathrm{t})\cdot \rho_{\text{тв}} \\ v_{\text{ж}}(z,\mathrm{t})=\overline{v_{\text{ж}}}(z,\mathrm{t})\cdot v_0 \\ v_{\text{тв}}(z,\mathrm{t})=\overline{v_{\text{тв}}}(z,\mathrm{t})\cdot v_0 \end{cases}, \tag{29}$$

где $t_{\text{хар}}=1$ с – характерное время процесса кристаллизации;

$R_{\text{макс}}=0{,}2$ мм – максимальный радиус кристаллических включений;

n_0, T_0 и v_0 – число центров кристаллизации, температура и скорость поступающего в аппарат плава соответственно. Параметры $W(z,\mathrm{t})$ и $C_{\text{НУ}}^m(z,\mathrm{t})$ в обезразмеривании не нуждаются. В дальнейших рассуждениях опустим горизонтальную черту, обозначающую безразмерные величины.

При проведении численного моделирования в зоне I пространственные и временные производные аппроксимируются конечной разностью вида

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{\Delta h};$$
$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t}, \quad (30)$$

где P заменяет любой параметр системы $(R, n, W, v_{\text{тв}}, v_{\text{ж}}, \rho_{\text{ж}}, T, C_{\text{НУ}}^m)$;

Δh - безразмерный пространственный шаг;

Δt - безразмерный временной шаг.

При проведении численного моделирования в зонах II и III производные аппроксимируются конечной разностью вида

$$\frac{\partial P_{\text{тв}}}{\partial z} = \frac{{P_{\text{тв}}}_{i+1}^{\ n} - {P_{\text{тв}}}_i^{\ n}}{\Delta h}; \quad \frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial z} = \frac{{P_{\text{ж}}}_{i+2}^{\ n} - {P_{\text{ж}}}_{i+1}^{\ n}}{\Delta h};$$
$$\frac{\partial P_{\text{тв}}}{\partial t} = \frac{{P_{\text{тв}}}_i^{\ n+1} - {P_{\text{тв}}}_i^{\ n}}{\Delta t}; \quad \frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial t} = \frac{{P_{\text{ж}}}_i^{\ n+1} - {P_{\text{ж}}}_i^{\ n}}{\Delta t}, \quad (31)$$

где $P_{\text{тв}}$ заменяет параметры системы, соответствующие твердой фазе $(R, n, W, v_{\text{тв}})$;

$P_{\text{ж}}$ заменяет параметры системы, соответствующие жидкой фазе $(v_{\text{ж}}, \rho_{\text{ж}}, T, C_{\text{НУ}}^m)$.

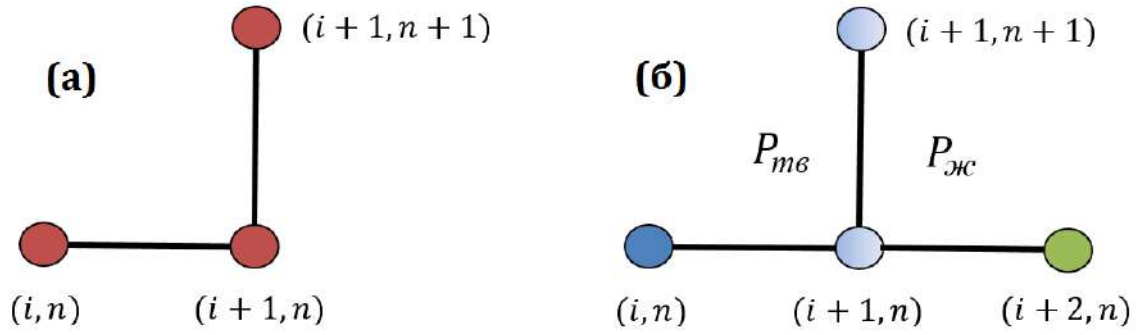


Рисунок 2.4 Шаблон разностной схемы используемой для решения системы уравнений в зоне I (а) и в зонах II и III (б)

При проведении численного моделирования нестационарных режимов работы аппарата применяется метод простых итераций [28] с постоянным шагом по времени Δt. Условие устойчивости численного решения имеет вид

$$\Delta t \leq \frac{\Delta h}{\max\{v_{\text{тв}}\}}. \tag{32}$$

Порядок определения параметров на следующей итерации:

1) $R(z, t_{i+1})$;
2) $n(z, t_{i+1})$;
3) $W(z, t_{i+1})$;
4) $C_{\text{НУ}}^{m}(z, t_{i+1})$;
5) $\rho_{\text{ж}}(z, t_{i+1})$;
6) $T(z, t_{i+1})$;
7) $C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(z, t_{i+1})$;
8) $v_{\text{ж}}(z, t_{i+1})$;
9) $v_{\text{тв}}(z, t_{i+1})$.

2.4 Результаты расчетов

Ниже приведены результаты численных расчетов, характеризующие процесс заполнения аппарата азотнокислым раствором НУ, в стартовом режиме: на вход аппарата, заполненного азотнокислым раствором, в момент времени $t = 0$ начинается подача раствора, содержащего НУ. Представлены зависимости размера кристаллов ГНУ, объемной доли твердой фазы, концентрации НУ в жидкой фазе и скорости движения кристаллов ГНУ в рабочих зонах аппарата в зависимости от координаты в различные моменты времени для заданного набора значений параметров процесса (таблица 2.1). Расход подаваемого в аппарат азотнокислого раствора НУ принимался равным 1 л/час. При расчетах использованы следующие значения параметров: $L_{\text{I}} = L_{\text{II}} = 1{,}5$ м, $L_{\text{III}} = 0{,}24$ м, $D = 3$ см, $D_{\text{III}} = 10$ см (диаметр поперечного сечения накопительной емкости),

$k = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ м/с, $\nu = 10^{-5}$ м^2/с, $\varkappa = 0{,}56$ Вт/(м·К), $\mathbb{C}_{тв} = 4000$ Дж/(кг·К), $\mathbb{C}_{ж} = 2000$ Дж/(кг·К), $\kappa = 0{,}5$, $g = 9{,}81$ м/с^2, $v_0 = 4 \cdot 10^{-4}$ м/с (соответствует заданному расходу подаваемого на вход аппарата раствора), $n_0 = 0{,}92 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$.

Таблица 2.1 - Перечень соответствия рисунков значениям параметров процесса (T_1 – температура стенки аппарата в зоне I и в верхней половине зоны II; T_2 – температура стенки аппарата в нижней половине зоны II)

Номер режима/ рисунка	**Зона аппарата**	**Концентрация HNO_3 в исходном растворе, масс.% (моль/л)**	**Состав подаваемого маточного раствора, масс%**		**T_1, °C**	**T_2, °C**
			НУ	**HNO_3**		
№1/2.6	I	46,2 (9,4)	70	5,0	5	0
№1/2.7	II					
№2/2.8	I	46,2 (9,4)	68	6,2	10	5
№2/2.9	II					
№3/2.10	I	46,2 (9,4)	66	7,4	15	10
№3/2.11	II					

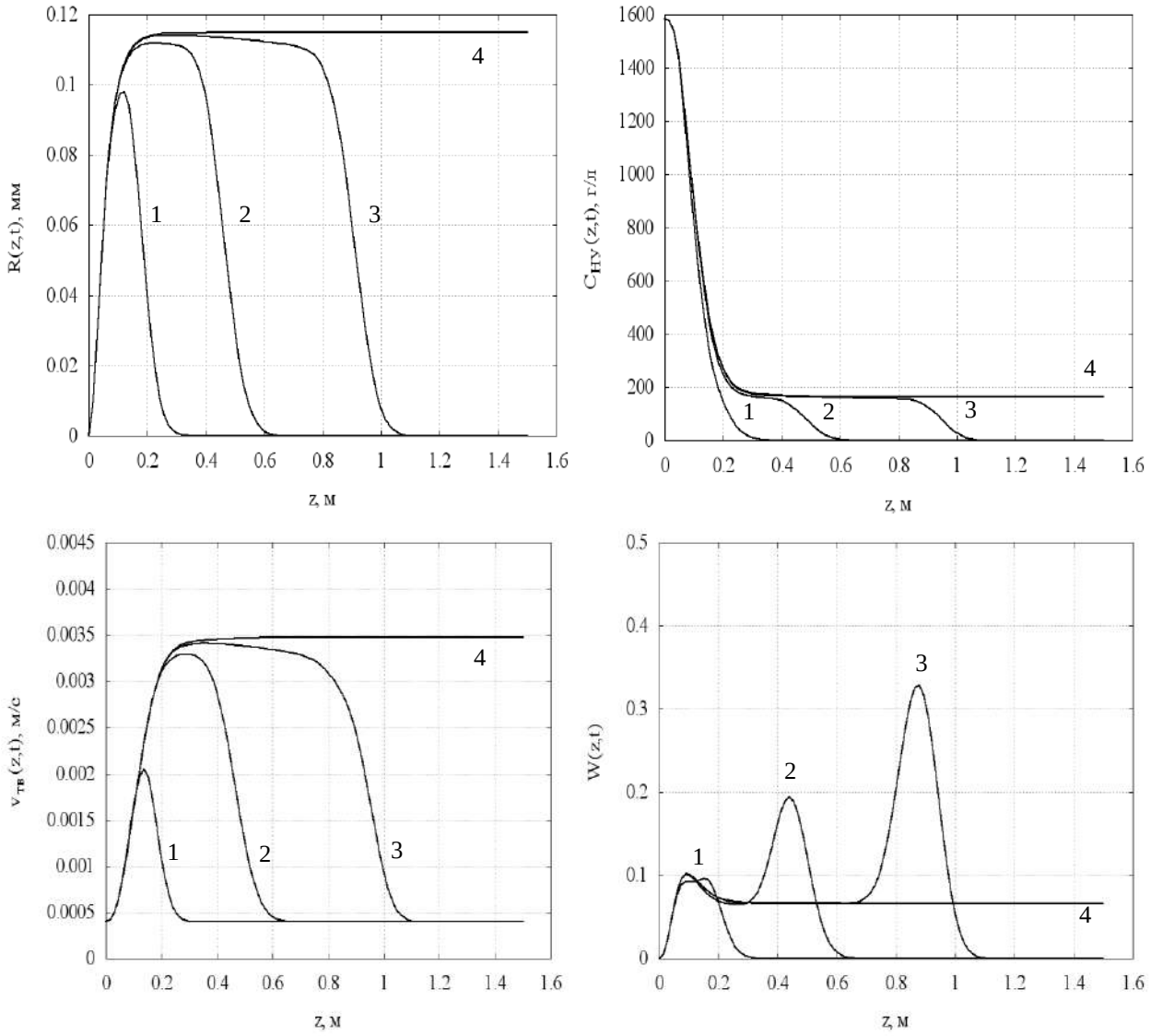


Рисунок 2.5 Графики зависимости радиуса кристаллов ГНУ, концентрации НУ в растворе, скорости и объёмной доли твёрдой фазы от координаты *z* в зоне I аппарата в режиме №1 в различные моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 15 мин, 3 – 20 мин, 4 – 60 мин

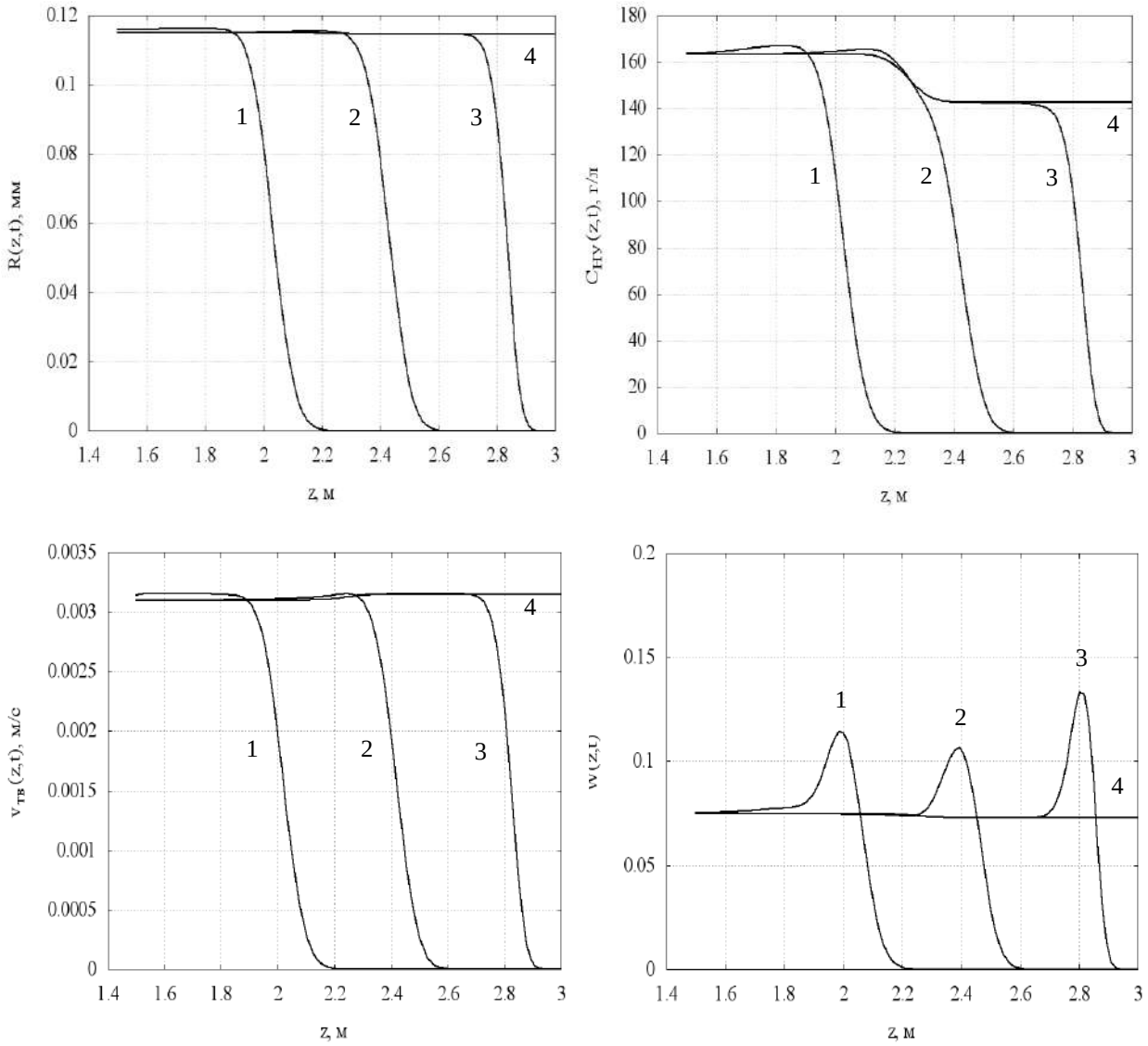


Рисунок 2.6 Графики зависимости радиуса кристаллов ГНУ, концентрации НУ в растворе, скорости и объёмной доли твёрдой фазы от координаты *z* в зоне II аппарата в режиме №1 в различные моменты времени: 1 – 40 мин, 2 – 50 мин, 3 – 60 мин, 4 – 150 мин

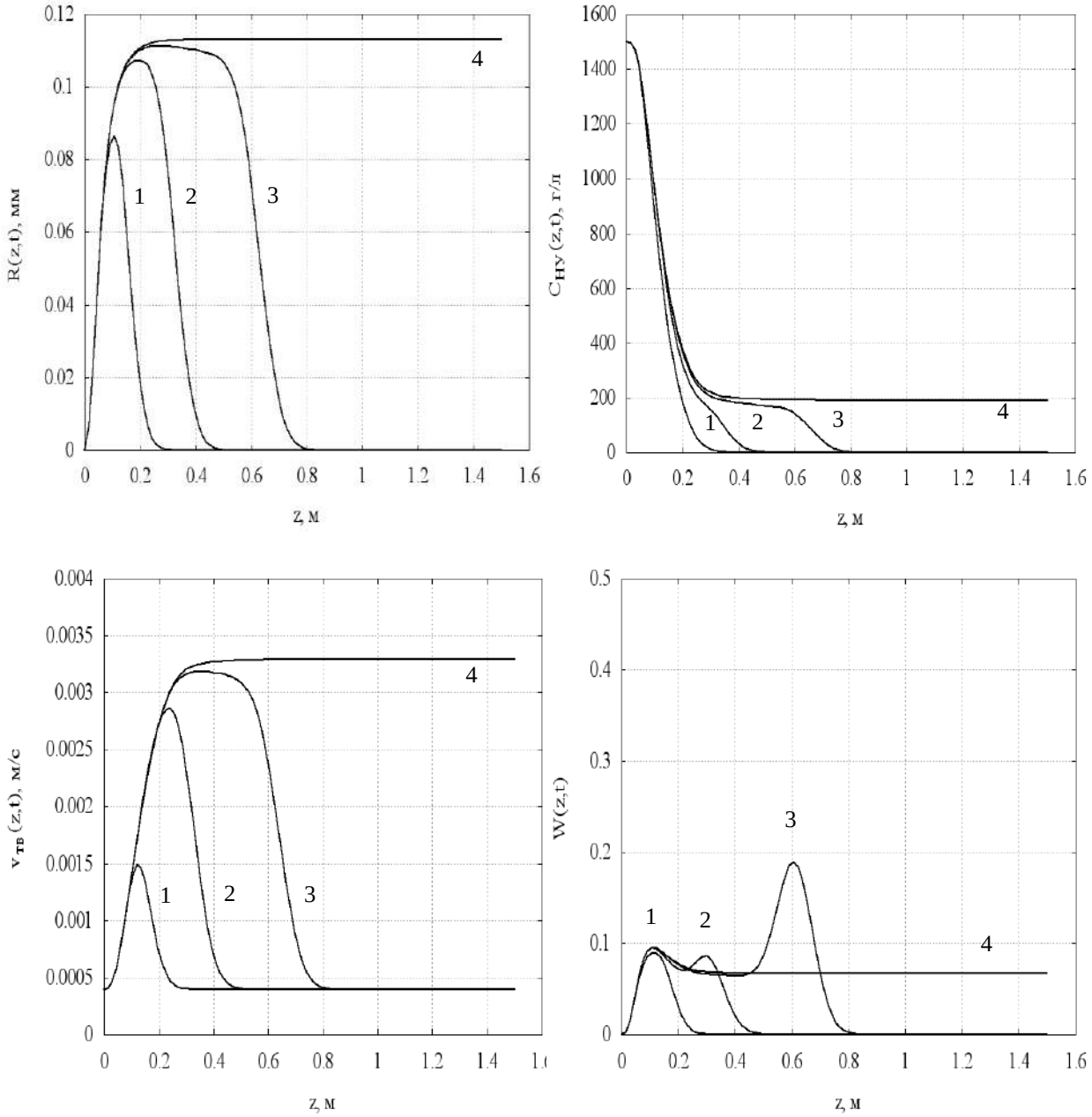


Рисунок 2.7 Графики зависимости радиуса кристаллов ГНУ, концентрации НУ в растворе, скорости и объёмной доли твёрдой фазы от координаты z в зоне I аппарата в режиме №2 в различные моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 15 мин, 3 – 20 мин, 4 – 60 мин

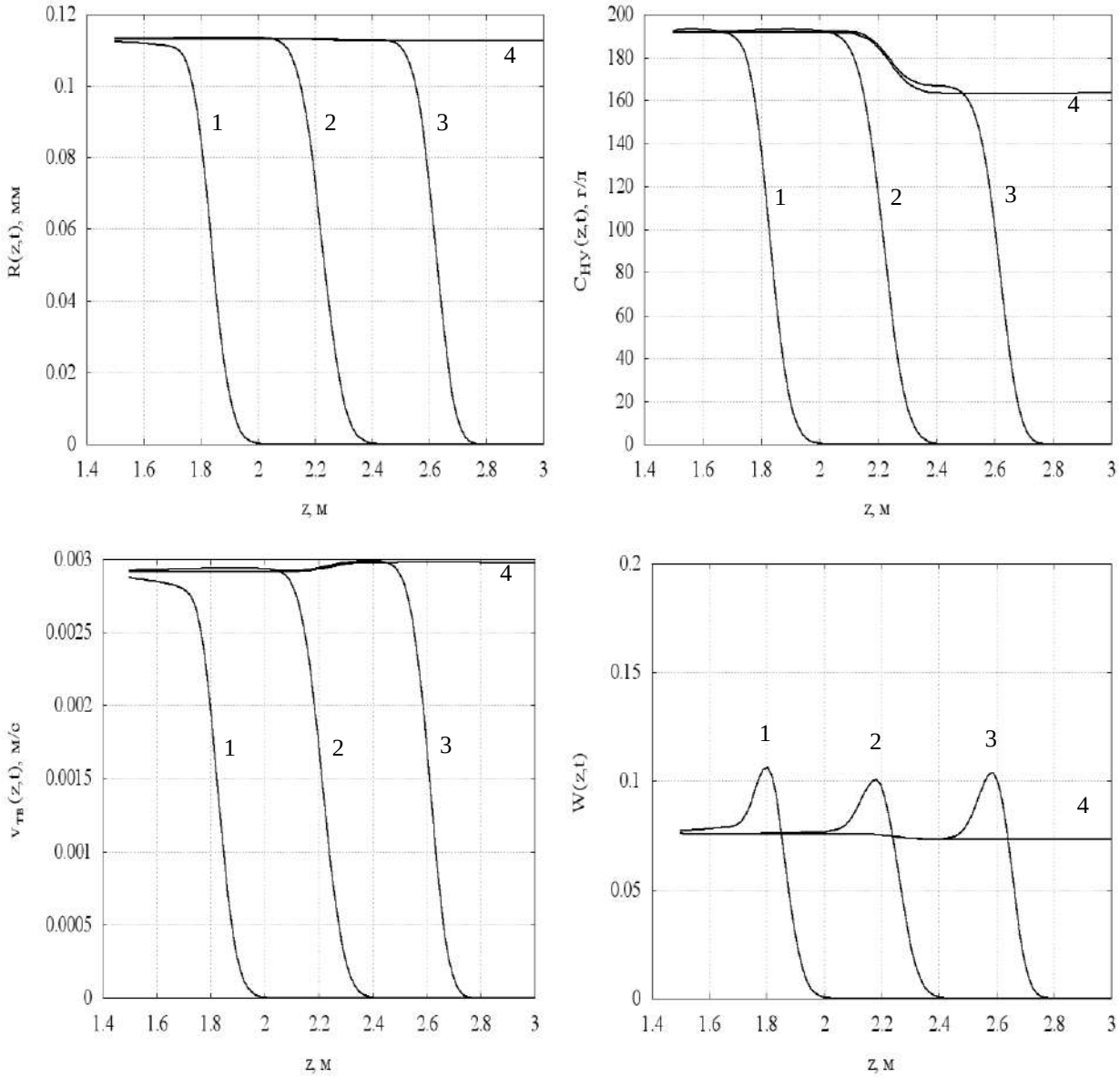


Рисунок 2.8 Графики зависимости радиуса кристаллов ГНУ, концентрации НУ в растворе, скорости и объёмной доли твёрдой фазы от координаты z в зоне II аппарата в режиме №2 в различные моменты времени: 1 – 40 мин, 2 – 50 мин, 3 – 60 мин, 4 – 150 мин

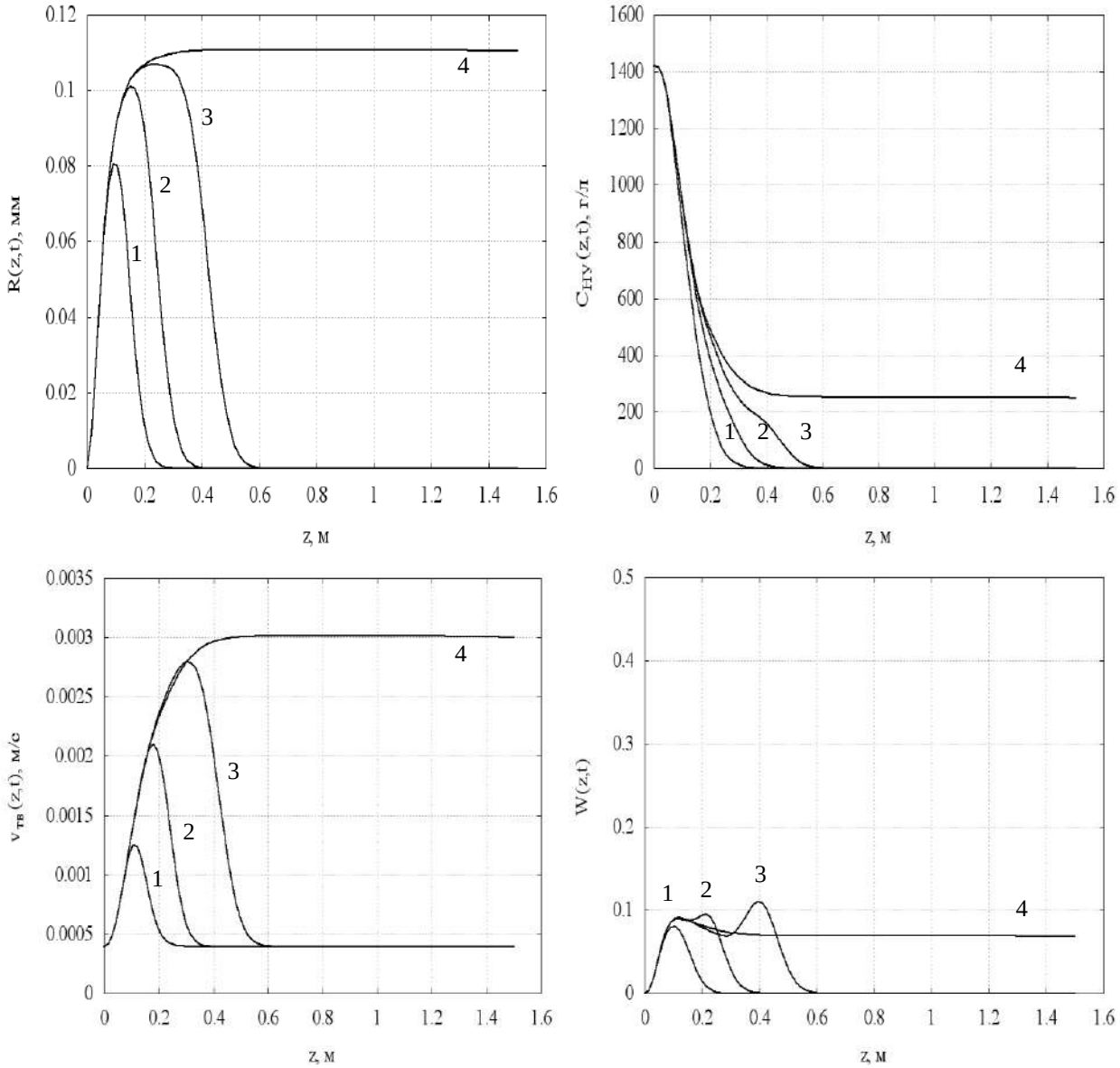


Рисунок 2.9 Графики зависимости радиуса кристаллов ГНУ, концентрации НУ в растворе, скорости и объёмной доли твёрдой фазы от координаты z в зоне I аппарата в режиме №3 в различные моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 15 мин, 3 – 20 мин, 4 – 60 мин

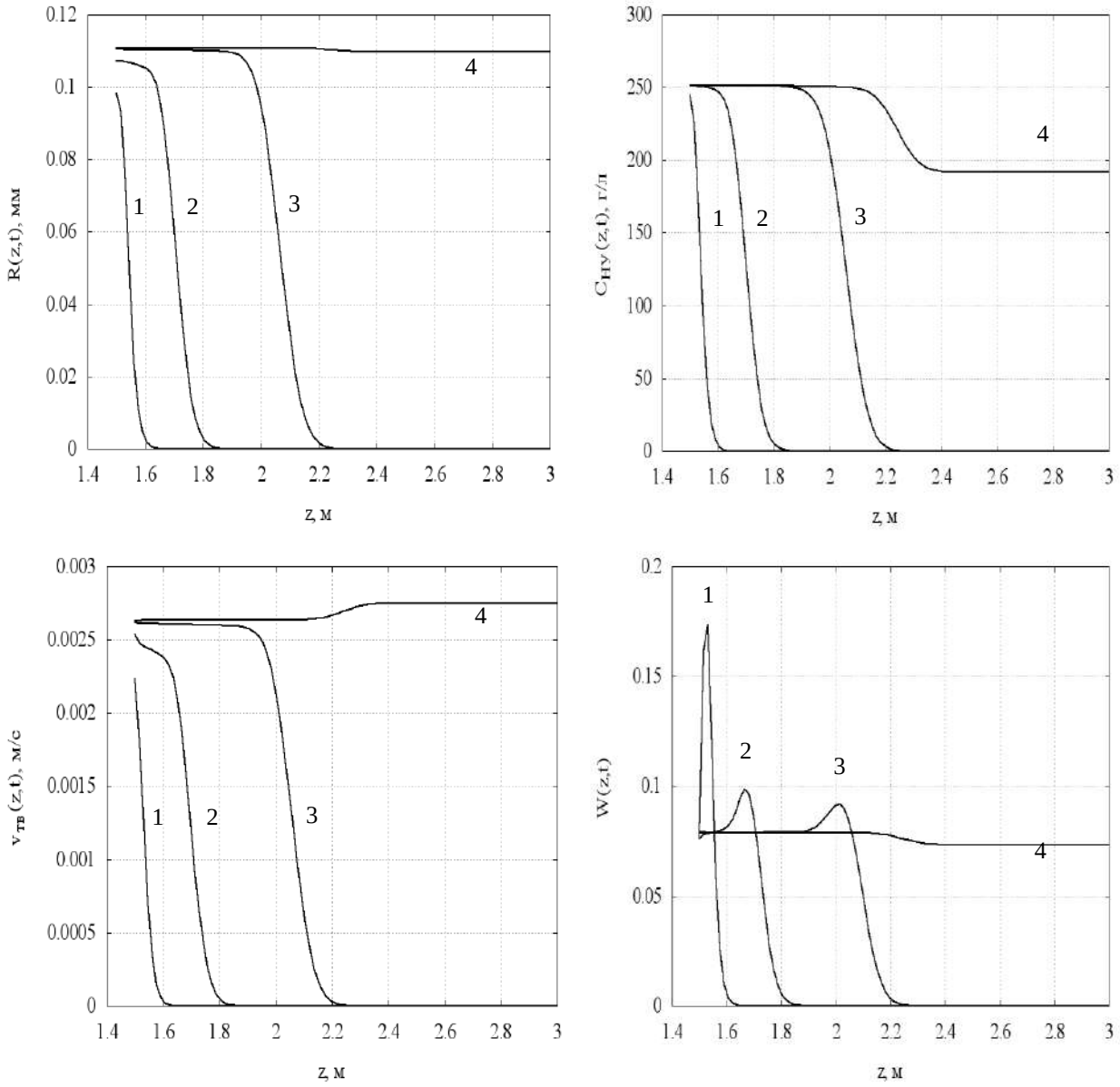


Рисунок 2.10 Графики зависимости радиуса кристаллов ГНУ, концентрации НУ в растворе, скорости и объёмной доли твёрдой фазы от координаты z в зоне II аппарата в режиме №3 в различные моменты времени: 1 – 40 мин, 2 – 50 мин, 3 – 60 мин, 4 – 150 мин

Анализ результатов, представленных на рисунках 2.5-2.10, позволяет сделать вывод о том, что стационарное распределение параметров устанавливается в рабочем объеме аппарата довольно быстро после прохождения фронта распространения твердой фазы.

2.5 Оценка времени заполнения накопительной емкости

Режимом максимальной эффективности работы кристаллизатора [23] является режим, при котором на границах зон кристаллизатора достигается равновесие между твердой и жидкой фазой и прекращается массобмен (то есть прекращается рост/растворение кристаллической фазы). Данный режим соответствует максимально возможному выделению целевого продукта в кристаллическую фазу. Для этих режимов можно аналитически вычислить массовые потоки на границах зон кристаллизатора.

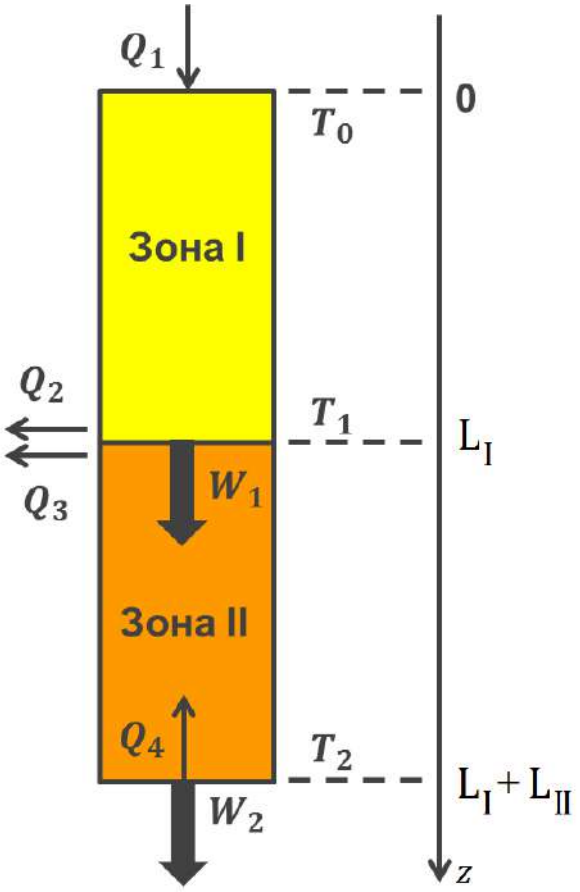


Рисунок 2.11 Схема потоков жидкой ($Q_i;\ i = 1, \dots, 4$) и твердой ($W_j;\ j = 1,2$) фаз в линейном кристаллизаторе непрерывного типа

Рассмотрим материальные потки, обеспечивающие поступление/унос НУ в рабочий объем (рисунок 2.11):

- потоки жидкой фазы:

Q_1 – поток питания (жидкая фаза), обеспечивающий подачу НУ в верхнюю часть первой зоны кристаллизатора;

Q_2 – поток НУ, связанный с удалением жидкой фазы из нижней части первой зоны кристаллизатора;

Q_3 – поток НУ, связанный с удалением жидкой фазы из верхней части второй зоны кристаллизатора;

Q_4 – поток НУ, связанный с поступлением промывного раствора из накопительной емкости в нижнюю часть второй зоны кристаллизатора.

- потоки кристаллической фазы:

W_1 – поток НУ, связанный с массопереносом кристаллов ГНУ через границу первой и второй зон кристаллизатора;

W_2 – поток НУ, связанный с массопереносом кристаллов ГНУ через нижнюю границу второй зоны кристаллизатора в накопительную емкость.

Для потоков НУ справедливы следующие выражения:

$$Q_1 = Sv_0\rho_0 C_{\text{НУ}}^{\text{вх}};$$

$$Q_2 = Sv_0\rho_0 C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)\frac{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)};$$

$$Q_3 = Sv_0\rho_0 C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)\frac{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}\frac{\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)}{\rho_{\text{тв}}+\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)\frac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)}};$$

$$Q_4 = Sv_0\rho_0 C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)\frac{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}\frac{\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)}{\rho_{\text{тв}}+\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)\frac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}}; \quad (33)$$

$$W_1 = Sv_0\rho_0 C_{\text{тв}}\frac{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)};$$

$$W_2 = Sv_0\rho_0 C_{\text{тв}}\frac{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}\frac{1}{1+\delta\frac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)}{C_{\text{тв}}-C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}},$$

где $\rho_0 = \rho_{\text{ж}}(C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}, T_0)$;

$\delta = \frac{\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)}{\rho_{\text{тв}}}$;

$T_1 = T_{\text{ст}}(z_{\text{I}})$ и $T_2 = T_{\text{ст}}(z_{\text{II}})$ – значения температуры жидкой фазы в точках, соответствующих нижним границам зон I и II.

В связи с тем, что стационарное распределение параметров устанавливается в рабочем объеме аппарата достаточно быстро (см. примеры

вычислений для стартового режима), для оценки времени заполнения накопительной емкости можно использовать аналитические выражения потоков НУ через границу зон II и III для случая стационарной работы аппаратов. Суммарный поток НУ в этом случае $Y = W_2 - Q_4$ (см. рисунок 2.11)

$$Y = Sv_0\rho_0\left[C_{\text{тв}} - \delta C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)\right] \cdot \cdot \frac{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)} \frac{1}{1+\delta\,\dfrac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi) - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)}{C_{\text{тв}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}}. \quad (34)$$

Выражение (34) характеризует скорость поступления НУ в накопительную емкость. Заполненная накопительная емкость содержит ГНУ в количестве $V == L_{\text{III}}S_{\text{III}}\Theta$, где $\Theta = 0{,}55$ - коэффициент объемного заполнения емкости кристаллами ГНУ. Для определения массы НУ в заполненной накопительной емкости нужно объем ГНУ в заполненной емкости V умножить на плотность твердой фазы $\rho_{\text{тв}}$ и на отношение масс молекул НУ и ГНУ $C_{\text{тв}}$. В результате получим следующее выражение для массы НУ в заполненной накопительной емкости

$$M = L_{\text{III}}S_{\text{III}}\Theta\rho_{\text{тв}}C_{\text{тв}}. \quad (35)$$

Время заполнения накопительной емкости t_{III} определится из выражения $Yt_{\text{III}} = M$ или, принимая во внимание формулы (34,35),

$$t_{\text{III}} = \frac{L_{\text{III}}S_{\text{III}}\Theta\rho_{\text{тв}}C_{\text{тв}}}{Sv_0\rho_0\left[C_{\text{тв}} - \delta C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)\right]\dfrac{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}\dfrac{1}{1+\delta\dfrac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi) - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)}{C_{\text{тв}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}}}. \quad (36)$$

Перепишем выражение (36) в более компактном виде

$$t_{\text{III}} = \Theta\frac{L_{\text{III}}S_{\text{III}}\rho_{\text{тв}}}{v_0S\rho_0}\frac{C_{\text{тв}}}{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}\left(1 - \frac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)\left[1 - \dfrac{\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)}{\rho_{\text{тв}}}\right]}{C_{\text{тв}} - C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_2,\psi)\dfrac{\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)}{\rho_{\text{тв}}}}\right). \quad (37)$$

Для приближенной оценки времени заполнения накопительной емкости можно воспользоваться выражением

$$t_{\text{III}} = \Theta\frac{L_{\text{III}}S_{\text{III}}\rho_{\text{тв}}}{v_0S\rho_0}\frac{C_{\text{тв}}}{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}}\left[1 + \frac{C_{\text{НУ}}^{m,\text{нас}}(T_1,\psi)}{C_{\text{тв}}}\left(\frac{C_{\text{тв}}}{C_{\text{НУ}}^{\text{вх}}} - 1 + \frac{\rho_{\text{ж}}(T_2,\psi)}{\rho_{\text{тв}}}\right)\right]. \quad (38)$$

В таблице 2.2 для сравнения представлены результаты расчетов времени заполнения накопительной емкости по расчетной программе для нестационарного режима работы кристаллизатора и результаты вычисления t_{III} по формулам (37,38)

Таблица 2.2 - Время заполнения накопительной емкости аппарата кристаллической фазой. а) стартовый режим аппарата (время отсчитывается от момента появления включений кристаллической фазы на границе зоны промывки с накопительной емкостью); б) режим замены емкости в аппарате; в) расчет по формуле (37); г) расчет по упрощенной формуле (38)

Состав плава, подаваемого в аппарат при 60°С	**Температурные режимы**		
	№1 $T_1 = 5°C$; $T_2 = 0°C$	№2 $T_1 = 10°C$; $T_2 = 5°C$	№3 $T_1 = 15°C$; $T_2 = 10°C$
Концентрация HNO_3 – 5,0 мас.%	а) 95 мин	а) 95 мин	а) 97 мин
Концентрация НУ – 70 мас.%	б) 95 мин	б) 95 мин	б) 96 мин
(в том числе U – 42,3 мас.%)	в) 91 мин	в) 93 мин	в) 96 мин
Поток U в аппарат – 0,95 кг/ч	г) 90 мин	г) 91 мин	г) 94 мин
Концентрация HNO_3 – 6,2 мас.%	а) 101 мин	а) 100 мин	а) 103 мин
Концентрация НУ – 68 мас.%	б) 101 мин	б) 99 мин	б) 103 мин
(в том числе U – 41,1 мас.%)	в) 97 мин	в) 100 мин	в) 103 мин
Поток U в аппарат – 0,90 кг/ч	г) 95 мин	г) 97 мин	г) 100 мин
Концентрация HNO_3 – 7,4 мас.%	а) 108 мин	а) 108 мин	а) 110 мин
Концентрация НУ – 66 мас.%	б) 107 мин	б) 107 мин	б) 109 мин
(в том числе U – 39,9 мас.%)	в) 103 мин	в) 105 мин	в) 110 мин
Поток U в аппарат – 0,86 кг/ч	г) 101 мин	г) 103 мин	г) 106 мин

Анализируя результаты расчетов по времени заполнения накопительной емкости (таблица 2.2) можно сделать следующие выводы:

- времена заполнения накопительной емкости кристаллами ГНУ в стартовом режиме и в режиме работы после замены заполненной емкости мало (менее 1%) различаются между собой. Это объясняется тем, что при заполнении аппарата маточным раствором за фронтом движения раствора по промывной зоне практически сразу формируется насыщенный раствор, поэтому ощутимые различия в динамике заполнения накопительной емкости в режимах 1) и 2) отсутствуют;
- расчетные формулы (37,38) дают заниженное значение времени заполнения накопительной емкости, однако отклонение от точного расчета по математической модели не превышает 5%, поэтому для проведения оперативных оценок можно использовать упрощенную формулу (38).

2.6 Валидация математической модели

Летом 2015г. были проведены эксперименты по кристаллизационному выделению ГНУ на линейном кристаллизаторе, расположенном на площадке ФГУП «ГХК». Условия указанных экспериментов были следующие:

- длины рабочих зон аппарата составляли $L_1 = 1463$ мм, $L_2 = 1537$ мм для зоны кристаллизации и промывной зоны соответственно;
- размеры накопительной емкости для сбора кристаллов: форма цилиндрическая, высота $h = 24$ см, объем $V = 1{,}8$ л;
- условием замены ёмкости являлось заполнение предыдущей ёмкости на 95%, учитывая присутствие в осаждающихся кристаллах ГНУ насыщенной по НУ жидкой фазы в количестве 45% объема, считаем, что замена емкости производилась при накоплении (100%-45%)·0,95=52,25% ГНУ;
- расход плава, подаваемого при температуре 60°С на вход аппарата, составлял 1,0 л/ч;

- состав промывного раствора, заполняющего аппарат перед началом подачи плава и состав промывного раствора, заполняющего накопительную емкость после замены следующий: концентрация U – 0%, концентрация HNO_3 – 47,5 мас.% (9,76 моль/л).

В таблице 2.3 приведены рассчитанные (на основе представленной в настоящей работе математической модели) параметры работы кристаллизатора в режимах, соответствующих экспериментальным.

Таблица 2.3 - Расчетные параметры режимов работы аппарата при условиях, соответствующих модельным экспериментам

Параметры моделируемых режимов аппарата	**Характеристики выводимых из аппарата потоков**	**Рассчитанные по мат. модели параметры работа аппарата**
T_1=15°C; T_2=19°C Концентрация HNO_3 – 6,3 мас.% Концентрация НУ – 62,42 мас.% Поток U в аппарат - 0,758 кг/ч	$Q_{МП}$ = 0,991 л/ч $Q_{U\ МП}$ = 0,195 кг/ч $Q_{М}$ = 0,528 л/ч $Q_{U\ М}$ = 0,122 кг/ч $Q_{П}$ = 0,463 л/ч $Q_{U\ П}$ = 0,073 кг/ч	τ_1 = 232 мин τ_2 = 135 мин τ_3 = 134 мин m_U = 220 г Ω = 74%
T_1=12°C; T_2=17°C Концентрация HNO_3 – 5,9 мас.% Концентрация НУ – 64,07 мас.% Поток U в аппарат - 0,796 кг/ч	$Q_{МП}$ = 0,985 л/ч $Q_{U\ МП}$ = 0,167 кг/ч $Q_{М}$ = 0,484 л/ч $Q_{U\ М}$ = 0,099 кг/ч $Q_{П}$ = 0,501 л/ч $Q_{U\ П}$ = 0,068 кг/ч	τ_1 = 209 мин τ_2 = 125 мин τ_3 = 124 мин m_U = 176 г Ω = 76%

В таблице 2.3 использованы обозначения: τ_1 - время заполнения аппарата плавом (от начала подачи до заполнения кристаллической фазой накопительной

емкости); τ_2 – время заполнения накопительной емкости в стартовом режиме (начало отсчета с момента появления кристаллитческой фазы на верхней границе емкости); $\tau_3 -$ время заполнения емкости в режиме смены емкостей после заполнения; $Q_{\text{МП}}$ - выводимый из аппарата поток маточно-промывного раствора, аналогично $Q_{\text{М}}$ и $Q_{\text{П}}$ - отдельно для потоков маточного и промывного растворов; $Q_{\text{U МП}}$ – поток урана, выводимый с маточно-промывным раствором, аналогично $Q_{\text{U М}}$ и $Q_{\text{U П}}$ – отдельно потоки урана, выводимые с маточным и промывным растворами; m_{U} – масса урана в накопительной емкости в жидкой фазе; Ω – эффективность выделения урана в кристаллическую фазу (отношение массы урана в кристаллической фазе накопительной емкости к массе урана, поступившего в аппарат).

Анализ данных таблицы 2.3 показывает:

1) выбранные для эксперимента режимы работы кристаллизатора не являются эффективными с точки зрения выделения целевого продукта (эффективность в среднем на 10% ниже, чем для режимов, описанных в таблице 2.2);
2) выбранный температурный режим с возрастанием температуры в нижней части промывной зоны неэффективен, т.к. а) не обеспечивается частичное растворение твердых включений в зоне промывки и, следовательно, не обеспечивается очистка выделяемых кристаллов от примесных продуктов деления; б) значительная часть урана остается в жидкой фазе;
3) выбранные параметры промывного раствора и состав подаваемого плава соответствуют разным рабочим линиям процесса кристаллизации, что приводит к скачку плотности жидкой фазы при переходе границы зон I и II аппарата и может явиться причиной дестабилизации границы раздела зон.

3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

3.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование [29].

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Организации, использующие результаты моделирования для составления научно-технических отчетов и рекомендаций к проведению экспериментов:

- предприятия атомной отрасли;
- НИИ в сфере ядерной энергетики;
- госкорпорация РОСАТОМ.

	Виды использования результатов моделирования		
Вид потребителя		Составление научно-технических отчетов	Оформление рекомендаций к проведению стендовых экспериментов и разработке АСУ ТП
	Госкорпорация РОСАТОМ		

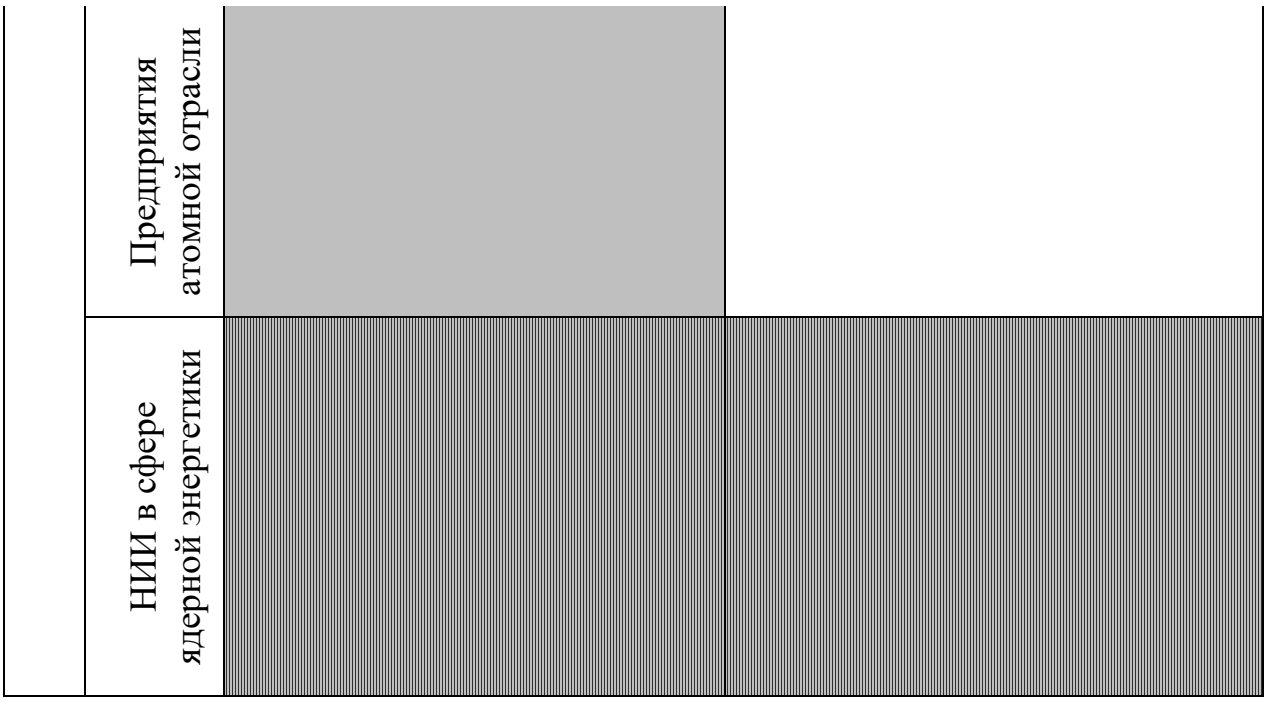


Рисунок 1 - Карта сегментирования рынка услуг по разработке комплексной математической модели.

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Основным конкурентом созданной модели кристаллизационного выделения целевых продуктов переработки ОЯТ в линейном кристаллизаторе непрерывного типа является модель кристаллизационного выделения, разработанная сотрудниками кафедры ЭАФУ НИ ТПУ, в основе которой лежит метод клеточных автоматов. Метод клеточных автоматов позволяет с высокой степенью точности анализировать процесс образования кристаллов ГНУ из пересыщенного по НУ раствора. Однако, данная модель непригодна для оценки эффективности работы аппарата в различных режимах и для анализа динамики движения жидкой и твердой фаз в рабочем объеме аппарата. Модели кристаллизационного выделения в кристаллизаторах другого типа в данной работе не рассматриваются, поскольку соответствуют процессам очистки целевых продуктов нефтегазовой и химической промышленности и для очистки ОЯТ неприменимы.

Представлена оценочная карта для сравнения конкурентных программных разработок (Приложение Б). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$К = \sum B_i \cdot Б_i$$

где $К$ – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i– вес показателя (в долях единицы);

$Б_i$– балл i-го показателя.

$Б_ф$ – построенная модель кристаллизационного выделения в линейном кристаллизаторе;

$Б_{к1}$- модель на основе теории клеточных автоматов;

$Б_{к2}$- модель на основе теории клеточных автоматов, учитывающая зависимость некоторых параметров процесса от времени.

На основании представленного анализа можно сделать вывод, что использованная в данной магистерской диссертации математическая модель процесса кристаллизационной очистки ОЯТ является наиболее оптимальным для использования в практических целях. Конкурентные методы моделирования являются практически невыгодными и не могут учитывать всех факторов, таких как динамика жидкой и твердой фаз в рабочем объеме аппарата.

3.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [30]. Разработанная для данного исследования матрица SWOT представлена в приложении В.

Вывод по SWOT-анализу:

В ходе проведения SWOT-анализа были выявлены сильные, слабые стороны научно-исследовательского проекта, а также его угрозы и возможности. Проект имеет пять сильных сторон, которые в комплексе дают высококачественную модель описываемого процесса. Эта модель может быть применена для моделирования любого температурного и концентрационного режима работы линейного кристаллизатора. Основной угрозой для данного проекта является требование изменения покомпонентного состава поступающего в аппарат раствора, поскольку модель построена в предположении, что кристаллизация происходит в системе нитрат уранила-азотная кислота-вода.

3.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта. В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в табл. 1.

Таблица 1 - Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	**Ожидания заинтересованных сторон**
АО «ВНИИНМ»	Оптимизация работы аппарата и разработка АСУ ТП

Таблица 2 - Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Математическое моделирование процесса кристаллизационного выделения урана при переработке ОЯТ в линейном кристаллизаторе непрерывного типа на примере выделения кристаллов ГНУ
Ожидаемые результаты проекта:	Разработанная модель поможет улучшить понимание процессов, происходящих в рабочем объеме аппарата. Анализ динамики поможет подобрать наиболее эффективные параметры выделения целевого продукта. Аналитические оценки параметры работы аппарата необходимы для разработки АСУ ТП и оптимизации процесса переработки ОЯТ.
Критерии приема результатов проекта:	Адекватность результатов
Требования к результату проекта:	Разработка замкнутой системы уравнений, описывающая рассматриваемый процесс в предложенном аппарате при заданном наборе геометрических, температурных и концентрационных параметров. Реализация численного алгоритмы для проведения расчетов и моделирования динамики процесса.

2. Организационная структура проекта. На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также

прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 3).

Таблица 3 - Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Трифонов А.Ю.д.ф.-м.н., профессор ТПУ	Руководитель	Координирует деятельность участников	6
2	Посеницкий Е.А.магистр	Исполнитель	Выполнение НИР	6
3	Рыжакина Т.Г к.э.н., доцент ТПУ	Эксперт проекта	Консультирование	2
4	Зяблова Н.Н. к.филологич.н, ст. преподаватель ТПУ	Эксперт проекта	Консультирование	2
5	Федорчук Ю.М. д.т.н., профессор ТПУ	Эксперт проекта	Консультирование	2
ИТОГО:				18

3. Организационная структура проекта. Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 4 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Источник финансирования	НИ ТПУ ВММФ
Сроки проекта:	1.03.2017-30.05.2017
Дата утверждения плана управления проектом	1.03.2017
Дата завершения проекта	30.05.2017

3.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Иерархическая структура работ проекта.

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рис. 2 представлен шаблон иерархической структуры.

Рисунок 2 – Иерархическая структура работ проекта

Контрольные события проекта.

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эта информация представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (*подтверждающий документ*)
1	Разработка задания на ВКР	1.03.2017	Приказ о ВКР
1.1	Составление и утверждение задания на ВКР	3.03.2017	Задание на ВКР
2	Выбор направления исследования и способов решения задач	5.03.2017-14.03.2017	Методы решения задач
2.1	Сбор и изучение научно-технической литературы	15.03.2017-31.03.2017	Список литературы
3	Разработка математической модели процесса	1.04.2017-14.04.2017	Отчет
3.1	Разработка алгоритма численного моделирования	15.04.2017-10.05.2017	Отчет
3.2	Анализ и обработка полученных результатов	11.05.2017-20.05.2017	Графики
4	Обобщение и оценка результатов	21.05.2017	Расчеты и графики
4.2	Оформление пояснительной записки	22.05.2017-01.06.2017	Пояснительная записка
4.3	Подготовка к защите ВКР	02.06.2017-14.06.2017	Презентация

План проекта.

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представляется в виде таблицы (Таблица 6).

График строится в виде таблицы из приложения В с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Таблица 6 – Календарный план проекта

№ п/п	Название	Длите-льность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка задания на ВКР	2	1.03.2017	2.03.2017	Трифонов А.Ю.
1.1	Утверждение задания	2	3.03.2017	4.03.2017	Трифонов А.Ю.
2	Выбор направления и способов решения задач	10	5.03.2017	14.03.2017	Трифонов А.Ю., Посеницкий Е.А.
2.1	Сбор и изучение научно-технической литературы	16	15.03.2017	31.03.2017	Посеницкий Е.А.
3	Разработка математической модели процесса	15	1.04.2017	14.04.2017	Трифонов А.Ю., Посеницкий Е.А.
3.1	Разработка алгоритма численного моделирования	25	15.04.2017	10.05.2017	Посеницкий Е.А.
3.2	Анализ и обработка полученных результатов	10	11.05.2017	20.05.2017	Посеницкий Е.А.
4	Обобщение и оценка результатов	2	21.05.2017	22.05.2017	Трифонов А.Ю., Посеницкий Е.А.
4.2	Оформление пояснительной записки	8	23.05.2017	1.06.2017	Посеницкий Е.А.
4.3	Подготовка к защите ВКР	13	02.06.2017	14.06.2017	Посеницкий Е.А.
Итого:		103			

3.4 Бюджет научно–технического исследования (НТИ)

Расчет материальных затрат НТИ.

Данная статья отражает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости доставку. Транспортные расходы (если таковые имеются) принимаются в пределах 3-5% от стоимости материалов. Расчет затрат на материалы приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Затраты на материалы

Наименование материалов и покупных изделий	**Единица измерения**	**Кол-во**	**Цена за ед., руб.**	**Сумма, руб.**
Бумага, формат А4	Пачка	1	200	200
Flashcard, 2 Гб	Штук	1	500	500
Ручка	Штук	1	30	30
Блокнот	Штук	1	50	50
			ИТОГО	**780**

Основная заработная плата.

В этой статье расходов планируется основная заработная плата исполнителей, непосредственно участвующих в проектировании разработки:

$$З_{осн} = \sum t_i \cdot З_{дн,i}, \quad (1)$$

где t_i – затраты труда, необходимые для выполнения *i*-го вида работ, в рабочих днях;

$З_{дн,i}$ – среднедневная заработная плата работника, выполняющего *i*-ый вид работ, (руб./день).

Среднедневная заработная плата определяется по формуле:

$$З_{дн} = \frac{D \cdot K \cdot M_P}{F_O}, \qquad (2)$$

где D – месячный должностной оклад работника; для руководителя D=34596 руб., для исполнителя D=4500 руб.;

K – коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям (40%) и районный коэффициент (для Томска – 30%); для руководителя K=1,7, для исполнителя K=1,3;

M_p – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске 48 дней Mp =10,4; при отпуске 24 дней Mp =11,2);

F_0 – действительный годовой фонд рабочего времени работника, в днях.

Расчет годового фонда рабочего времени приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет годового фонда рабочего времени

Показатели рабочего времени	**Количество дней**	
	Руководитель на кафедре	**Магистр**
Календарное число дней в году	365	365
Количество нерабочих дней Выходные Праздники	118	118
Планируемые потери отпуска	24	60
Действительный годовой фонд	**223**	**187**

Месячный должностной оклад работника:

$$З_м = З_{тс} * k_p, \qquad (3)$$

где $З_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_р$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_{тс}$, руб	$k_р$	$З_м$,руб	$З_{дн}$,руб	$Т_р$,дни	$З_{осн}$,руб
Руководитель (зав. Кафедрой)	34596	1,3	44975	2743	21	57603
Магистр	4500	-	4500	325	99	32175
					ИТОГО $З_{осн}$	89778

Дополнительная заработная плата исполнителей темы.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = k_{доп} * З_{осн} \qquad (4)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 10 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполнители	**Основная ЗП, руб**	**Дополнительная ЗП, руб**
Руководитель (зав. кафедрой)	57603	8640
Магистр	32175	4826
	ИТОГО	13466

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} * (З_{осн} + З_{доп}) \qquad (5)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и прочее).

Таблица 11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	**Основная ЗП,руб**	**Дополнительная ЗП,руб**
Руководитель (зав. Кафедрой)	57603	8640
Магистр	32175	4826
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	-
	ИТОГО	30973

Расчет затрат на научные и производственные командировки.

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов. В данном дипломном проекте таких затрат нет.

Контрагентные расходы.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работа и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками. Контрагентные расходы составляют 10% от основной и дополнительной заработной платы. В данном дипломном проекте таких затрат нет.

Накладные расходы.

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (З_{осн} + З_{доп}) \cdot k_{нр},$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$З_{накл} = 103244 \cdot 0{,}5 = 51622.$$

Формирование бюджета затрат НТИ.

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма,руб	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	780	Пункт 4.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	89778	Пункт 4.2
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	13466	Пункт 4.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	30973	Пункт 4.4
5. Расчет затрат на научные и производственные командировки	0	Пункт 4.5
6. Контрагентные расходы	0	Пункт 4.6
7. Накладные расходы	51622	Пункт 4.7
Бюджет затрат НТИ	186619	Сумма ст.1-7
Аналог 1	206619	Доп. оборудование на 20000 рублей
Аналог 2	201619	Доп. оборудование на 15000 рублей

Матрица ответственности.

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 13.

Таблица 13– Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соц. ответственность»	Консультант по языковому разделу	Магистр
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Вывод системы уравнений математической модели					И
Разработка и реализация численного алгоритма решения мат. модели					И
Получение аналитических оценок для упрощенного расчета основных параметров работы аппарата					И
Анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);
- согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

3.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Кроме выше перечисленных видов эффективности можно выделить ресурсный эффект (характеризуется показателями, отражающими влияние

инновации на объем производства и потребления того или иного вида ресурса), научно-технический (оценивается показателями новизны и полезности) и др.

Динамические методы экономической оценки инвестиций.

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**DPP**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{ЧДП_{оп_t}}{(1+i)^t} - I_0,$$

где $ЧДП_{оп_t}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета (t=0, 1, 2… n); n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: **NPV** >0.

Чем больше **NPV**, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если **NPV** является положительной.

Таблица 14 - Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб	0	223,9	223,9	223,9	223,9
2.	Итого приток	0	223,9	223,9	223,9	223,9
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-186,6	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, тыс. руб С+Ам+ФОТ	0	53,4	53,4	53,4	53,4
4.1	Налогооб прибыль=1-4		170,5	170,5	170,5	170,5
5.	Налоги Выр-опер=донал.приб*20%	0	34,1	34,1	34,1	34,1
6.	Итого отток Опер.затр+налоги	-186,6	87,5	87,5	87,5	87,5
7.	Чистый денежный поток ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог (4.1-5)	-186,6	136,4	136,4	136,4	136,4
8.	Коэффициент дисконтирования (приведения при **i** =0,20)	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482
9.	Дисконтированный чистый денежный поток (с7*с8)	-186,6	113,62	94,67	78,84	65,74
10.	То же нарастающим итогом (**NPV** =166,27)	-186,6	-72,98	21,69	100,53	166,27

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 166,27д. ед., что позволяет судить о его эффективности.

Дисконтированный срок окупаемости.

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. таблицу 14).

Таблица 15 - Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток (**i** =0,20)	-186,6	113,62	94,67	78,84	65,74
2.	То же нарастающим итогом	-186,6	-72,98	21,69	100,53	166,27
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$\mathbf{PP_{дск}}$ =1+72,98/94,67=1,77месяцев				

Внутренняя ставка доходности (IRR).

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на

практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (**i**) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 16 и графика, представленного на рисунке 3.

Таблица 16 - Зависимость **NPV** от ставки дисконтирования

№ п/п	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV
1	Чистые денежные потоки	-186,6	136,4	136,4	136,4	136,4	
2	коэффициент дисконтирования						
	i=0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	i=0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	i=0,3	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	i=0,4	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	i=0,5	1	0,625	0,390	0,244	0,095	
	i=0,6	1	0,588	0,335	0,203	0,070	
3	Дисконтированный денежный поток						
	i=0,1	-186,6	103,281	112,666	102,436	93,161	224,945
	i=0,2	-186,6	94,646	94,662	78,839	65,745	147,291
	i=0,3	-186,6	81,125	69,564	49,650	35,464	49,202
	i=0,4	-186,6	75,784	60,562	40,238	27,007	16,991
	i=0,5	-186,6	71,012	53,196	33,282	12,958	-16,152
	i=0,6	-186,6	66,809	45,694	27,689	9,548	-36,860

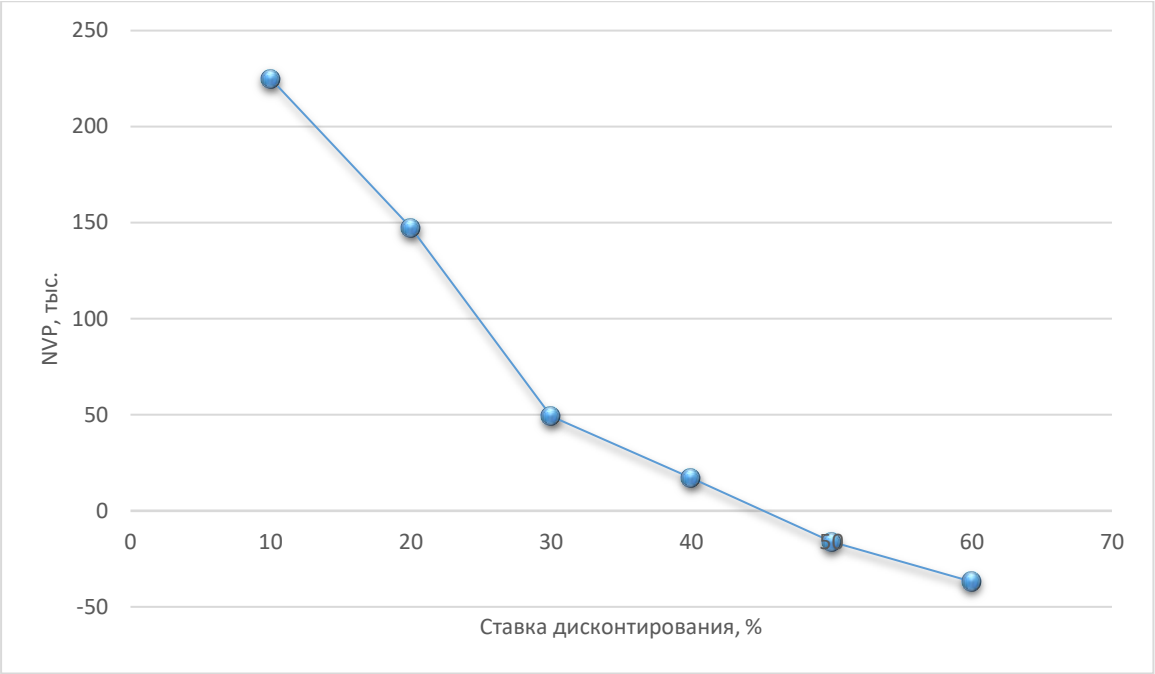


Рисунок 3 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой **NPV** обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что **IRR** составляет 0,45.

Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI).

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$PI = \sum_{t=1}^{n} \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0,$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$\text{PI} = \frac{352{,}87}{186{,}6} = 1{,}89$$

PI =1,89>1, следовательно, проект эффективен при i=0,2; NPV=166,27 тыс.

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 и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{Ф_{pi}}{Ф_{\max}},$$

где $I_{финр}^{испi}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

$Ф_{pi}$– стоимость i-го варианта исполнения;

$Ф_{\max}$– максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{финр}^{р} = \frac{Ф_{р}}{Ф_{\max}} = \frac{186619}{186619} = 1;$$

Для аналогов (с использованием дополнительного оборудования, которое стоит 15000 руб и 20000 руб) соответственно:

$$I_{фина1}^{a1} = \frac{Ф_{a1}}{Ф_{\max}} = \frac{206619}{186619} = 1,11; \quad I_{фина1}^{a2} = \frac{Ф_{a2}}{Ф_{\max}} = \frac{201619}{186619} = 1,08;$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i , \qquad (6)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент *i*-го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка *i*-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчёт показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 17.

Таблица 17 - Оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО / Критерии	Весовой коэффициент параметра	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1.Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	3	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	3	3
4. Энергосбережение	0,2	5	4	4
5. Надежность	0,25	5	4	3
6. Материалоемкость	0,1	4	4	4
ИТОГО	1	4,75	3,70	3,45

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{финр}^{p}$) и аналога ($I_{финаi}^{ai}$) определяется на основании интегрального

показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I^{p}_{финр} = \frac{I^{p}_{m}}{I^{p}_{финр}}; \qquad I^{ai}_{финаi} = \frac{I^{ai}_{m}}{I^{ai}_{финаi}};$$

В результате:

$$I^{p}_{финр} = \frac{I^{p}_{m}}{I^{p}_{финр}} = \frac{4,75}{1} = 4,75; I^{a1}_{фина1} = \frac{I^{a1}_{m}}{I^{a1}_{фина1}} = \frac{3,7}{1,11} = 3,33;$$

$$I^{a2}_{фина2} = \frac{I^{a2}_{m}}{I^{a2}_{фина2}} = \frac{3,45}{1,08} = 3,19.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности разработки и аналогов 2 и 3 позволит определить сравнительную эффективность проекта:

$$Э_{ср1} = \frac{I_{р}}{I_{а1}} = \frac{4,75}{3,33} = 1,43; \qquad Э_{ср2} = \frac{I_{р}}{I_{а2}} = \frac{4,75}{3,19} = 1,49$$

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта и сравнительная эффективность анализа представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,11	1,08	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,70	3,45	4,75
3	Интегральный показатель эффективности	3,33	3,19	4,75
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,43	1,49	1

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

ВЫВОД

В процессе выполнения части работы по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению был проведен тщательный анализ разрабатываемого исследования. Во-первых, оценен коммерческий потенциал и перспективность проведения исследования. Полученные результаты говорят о потенциале и перспективности на уровне выше среднего. Во-вторых, проведено планирование НИР, а именно: определена структура и календарный план работы, трудоемкость и бюджет НТИ по трем исполнениям для сравнения. Результаты соответствуют требованиям к ВКР по срокам и иным параметрам. В-третьих, определена эффективность исследования в разрезах ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности. Полученные результаты и общая сравнительная эффективность позволяют сделать вывод, что исполнение является оптимальным с точки зрения использования ресурсов, затрат, бюджета и экономики.

4. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Целью данного раздела является: выявление и изучение вредных и опасных производственных факторов при работе с ПЭВМ и определение способов их устранения; оценка условия труда; рассмотрение вопросов техники безопасности, безопасности в чрезвычайных ситуациях и охраны окружающей среды.

Объектом исследования является рабочее место и помещение, в котором оно находится.

Характеристика помещения, где был разработан дипломный проект: ширина, составляет b = 3 м, длина комнаты a = 5 м, высота h = 2,8 м. Площадь помещения составляет $S = ab = 15$ м^2, объем $V = abh$= 42 м^3. В помещении одно окно, с параметрами: ширина 1,5 м, высота 1,5 м. Количество рабочих мест n = *1*. Помещение содержит только естественную вентиляцию, т.е. воздух поступает и удаляется через дверь и окно. В зимнее время помещение отапливается, что обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещении используется комбинированное освещение — искусственное и естественное. Искусственное освещение создается люминесцентными лампами типа ЛБ-40. Рабочая поверхность имеет высоту 0,75м. Конструкция стола соответствует нормам СН 245-78, который оборудуется специальными ящиками для необходимых для работы предметов. Электроснабжение сети переменного напряжения 220В. Помещение без повышенной опасности в отношении поражения человека электрическим током по ГОСТ 12.1.013-78.

На столе стоит компьютер, который обладает следующими характеристиками: Intel Core i7-4710HQ, оперативная память 6144 МБ, система Microsoft Windows 10, частота процессора – 2.5 ГГц, 15.6-и дюймовый монитор с разрешением 1920 на 1080 точек и дискретной видеокартой Nvidia Geforce 840m.

4.1 Анализ опасных и вредных факторов

При работе с ПЭВМ пользователь (оператор, программист) подвергается воздействию следующих вредных и опасных производственных факторов:

- шуму;
- электростатических полей;
- электромагнитных полей;
- интенсивной напряженности трудового процесса.

Последствия действия этих факторов могут привести к ухудшению здоровья пользователя, а также к профессиональным заболеваниям. Помимо этого, неудобная рабочая поза, длительное сосредоточенное наблюдение, вызывают повышенное напряжение мышц зрительного аппарата. Совместное влияние неблагоприятных производственных факторов способствуют развитию общего утомления и снижению работоспособности.

Комбинации вредных и опасных производственных факторов, наблюдаемых при работе с ПЭВМ:

1. Монитор компьютера является источником: электромагнитного поля (ЭМП); электростатического поля; рентгеновского излучения; вредного действия светового потока и отраженного света.
2. В результате несовершенства создания изображения на экране зрительный аппарат подвергается значительной нагрузке.
3. Работа компьютера сопровождается акустическими шумами.
4. Несоблюдение эргономических параметров, обеспечивающих безопасность приёмов работы пользователя ПЭВМ: гигиенических и психофизиологических; антропометрических; эстетических может повлечь снижение эффективности действий человека.

Анализ санитарно-технических условий помещения (площадь и объём производственных помещений, освещённости, микроклимата, вентиляции, шумов, излучения), оценка вредных факторов и приведение их к требованиям нормативных документов могут обеспечить безопасные условия труда.

4.2 Производственная безопасность

Согласно санитарным нормам СанПин 2.2.2.542-96, на каждого работника должно быть выделено не менее 6м^2 площади и не менее 20м^3 объема, при высоте помещения – 2,8 м, расстояние от глаз до клавиатуры, экрана и документов было 500 – 600мм, клавиатура находилась на высоте 740 – 790мм от уровня пола, верхний край дисплея находился на уровне прямого взгляда, а нижний – не ниже 40º от прямого взгляда.

Площадь помещения $S = 15$ м^2.

Количество рабочих мест *n = 1*. Тогда на одного работающего приходится

$$\frac{S}{n} = \frac{15}{1} = 15 \text{ м}^2.$$

Объем помещения на одного человека составит:

$$V_1 = \frac{abh}{n} = \frac{3*5*2{,}8}{1} = 42 \text{ м}^3.$$

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что по занимаемой площади и по занимаемому объему помещение полностью удовлетворяет нормативным требованиям.

Характеристика помещения, микроклимат.

В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, которые создают комфортные условия. Эти нормы зависят от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения.

Допустимые условия микроклимата согласно СанПиН 2.2.2.542–96 «Оптимальные нормы микроклимата для помещений с ВТД и ПЭВМ» представлены в **таблице 1**. Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютер, приведены в **таблице 2**.

Таблица 1 - Оптимальные параметры микроклимата для помещений, где установлены компьютеры

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	средняя	22–24	40–60	0.1
Теплый	средняя	23–25	40–60	0.2

Таблица 2 - Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объемный расход воздуха подаваемого в помещение
Объем до 20м^3 на человека	Не менее 30 м^3
20…40м^3 на человека	Не менее 20 м^3
Более 40м^3 на человека	Естественная вентиляция

Анализ микроклимата в помещении, где был разработан проект выпускной квалификационной работы, показал, что помещение соответствует допустимым условиям. В данном помещении присутствует только естественная вентиляция, т.е. воздух поступает и удаляется через дверь и окно. Согласно расчетам естественная вентиляция на одного работающего в данном помещении составляет 42 м^3, что полностью соответствует установленным нормам (**табл. 2)**. В зимнее время помещение отапливается, что обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха.

Производственный шум.

Шумы на рабочих местах нормируются по ГОСТ 12.1.003-99. Уровень шума на рабочем месте математиков-программистов и операторов видеоматериалов не должен превышать 50дБА, а в залах обработки информации

на вычислительных машинах - 65дБА. Защита от шумов – заключение вентиляторов в защитный кожух и установление их внутри корпуса ЭВМ. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63 - 8000 Гц.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производственных зданий и сооружений, а также при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые. Защита от шума должна обеспечиваться разработкой шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты, в том числе строительно-акустических, применением средств индивидуальной защиты. В первую очередь следует использовать средства коллективной защиты. По отношению к источнику возбуждения шума коллективные средства защиты подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения, и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удается. Принцип действия СИЗ – защитить наиболее чувствительный канал воздействия шума на организм человека – ухо. Применение СИЗ позволяет предупредить расстройство не только органов слуха, но и нервной системы от действия чрезмерного раздражителя.

Наиболее эффективны СИЗ, как правило, в области высоких частот. СИЗ включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

Освещенность рабочей зоны.

В данном помещении используется комбинированное освещение — искусственное и естественное. Естественное освещение проникает в помещение через окно, но коэффициент естественного освещения не соответствует норме, поэтому применяется искусственное освещение. Искусственное освещение устанавливается во всех основных и вспомогательных помещениях производственных зданий в соответствии со СНиП 23-05-95 **(табл.3).**

Таблица 3 - Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении, согласно СНиП 23-05-95

Характеристика зрительной работы	Наименьший Размер объекта, мм	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различения с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк	
					Комбинированное освещение	Общее освещение
средняя точность (4 разряд зрительной работы)	0,5-1,0	а	Малый	Темный	750	300
		б	Малый	Средний	500	200
			Средний	Темный	500	200
		в	Малый	Светлый	400	200
			Средний	Светлый	400	200
			Большой	Темный	400	200
		г	Средний	Светлый	300	150
			Большой	Светлый	300	150
			Большой	Средний	300	150

Для того, чтобы естественное освещение удовлетворяло СанПиН 2.2.2. 542 – 96, достаточно, чтобы площадь световых проемов помещения соответствовало 1/6 – 1/8 от площади пола.

Помещение имеет следующие размеры: длина комнаты a = 5м, ширина b = 3м, высота h = 2,8м, количество окон – 1. Размеры светопроема в данном помещении: ширина b_o = 1,5м, высота h_o = *1*,5м.

Площадь пола $S_n = ab = 15$ м^2.

Площадь светопроемов $S_{ok} = 0{,}9 b_o h_o = 2{,}025$ м^2.

Соотношение площади светопроемов к площади пола

$$\frac{S_{ok}}{S_n} = \frac{2{,}025}{15} = 0{,}135,$$

что соответствует санитарным нормам.

Искусственное освещение создается люминесцентными лампами типа **ЛБ-40 (белый свет)**, длина лампы – 1200 мм, диаметр лампы – 38 мм в количестве n=10 штук, мощность Р=40 Вт, стандартный световой поток Ф=2800 Лм.

В помещении установлены светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР–02-40 (Приложение Д). Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1228 мм, ширина – 286 мм.

Проверочный расчет существующей искусственной освещенности проведем методом коэффициента использования. Сначала определяется индекс помещения (i).

$$i = \frac{S}{(a+b)h_1},$$

где S – площадь помещения;

h_1 – расчетная высота подвеса светильника, м;

a и b – длина и ширина помещения, м.

Высота подвеса светильника h_1 определяется как расстояние от светильника до рабочей поверхности. Рабочая поверхность имеет высоту 0,75м. Соответственно $h_1 = h - 0{,}75 = 2{,}05$м.

Следовательно $i = \frac{15}{8 * 2{,}05} = 0{,}91$.

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_н \cdot S \cdot K_з \cdot Z}{N \cdot \eta},$$

где $E_н$ – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м^2;

$K_з$ – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли;

Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{ср}/E_{min}$. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

N – число ламп в помещении; η – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i, типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен $\rho_с$ и потолка $\rho_п$.

Данное помещение со средним выделением пыли, поэтому $K_з$ =1,8; состояние потолка – свежепобеленный, поэтому $\rho_п$=70; состояние стен – побеленные бетонные стены, поэтому $\rho_с$ =50. Коэффициент использования светового потока, учитывая индекс помещения η=33. Нормируемая минимальная освещенность, согласно табл.3 при использовании ЭВМ и одновременной работе с документами должна быть равна 300лк.

$$\Phi = \frac{300 * 15 * 1{,}8 * 1{,}1}{0{,}33 * 10} = 2700 \text{ Лм}$$

Для люминесцентных ламп с мощностью 40ВТ и напряжением сети 220В, со стандартным световым потоком ЛБ-40 равен 2800 Лм.

$$-10\% \le \frac{\Phi_{л.станд} - \Phi_{л.расч}}{\Phi_{л.станд}} 100\% \le +20\%$$

$$\frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} = \frac{2800 - 2700}{2800} 100\% = 3{,}57\%$$

$$-10\% < 3{,}57\% < 20\%$$

Согласно полученным результатам анализа освещенности помещения, данная система освещения удовлетворяет нормативным требованиям.

4.3 Рабочее место, оценка условий труда на рабочем месте

Рабочее место должно удовлетворять следующим требованиям:

- Рабочий стол должен регулироваться по высоте в пределах 680–760 мм, при отсутствии регулировки, его высота должна быть 720 мм. Под столешницей стола должно быть свободное пространство для ног, с размером по высоте не менее 600 мм. Рабочий стул должен быть снабжен подъемным поворотным устройством, обеспечивающим регулировку высоты, сидения и спинки. Поверхность сидения и спинки должна быть полумягкой, с нескользящим, не электризующимся и воздухопроницаемым покрытием.
- Яркость свечения экрана монитора должна быть не менее 100кд/м^2, контрастность изображения знака “-” не менее 0,8, частота регенерации не менее 72Гц, низкочастотное дрожание изображения в диапазоне 0,05 - 1,0Гц должно находиться в пределах 0,1мм. Экран должен иметь антибликовое покрытие, а расстояние от глаза оператора до экрана должно быть в пределах 40 - 80см. Клавиатура не должна быть жестко связана с монитором, ее наклон должен находиться в пределах 10 - 15градусов. Видеомонитор должен быть оборудован поворотной площадкой.

- При работе с текстовой информацией для комфортного состояния глаз наиболее применимым является предъявление черных знаков на светлом фоне (черных на белом).

При работе с ПЭВМ виды трудовой деятельности разделяются на три группы, согласно СанПиН 2.2.2.542-96:

А – работа по считыванию информации с экрана ПЭВМ с предварительным запросом;

В – работа по вводу информации;

С – творческая работа в режиме диалога с ПЭВМ.

Для видов трудовой деятельности устанавливается три категории тяжести и напряженности работы с ПЭВМ, которые приведены в **таблице 4.**

Таблица 4 - Категории тяжести и напряженности работ с ПЭВМ

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену		
	Группа А, количество знаков	Группа В, количество знаков	Группа С,час
1	До 20 000	До 15 000	До 2
2	До 40 000	До 30 000	До 4
3	До 60 000	До 40 000	До 6

Характеристики рабочего места: высота рабочего стола - 750мм; рабочий стул снабжен поворотным и подъемным устройствами; монитор полностью удовлетворяет требованиям.

Характеристики рабочей смены: работа выполнялась каждый день, категория работы с ПЭВМ - 1. Таким образом, рабочее место и условия труда полностью удовлетворяют установленным требованиям.

Психофизиологические факторы.

Установленный режим труда и отдыха, основанный на соблюдении регламентируемых перерывов, позволяет снизить психофизиологическую напряженность, и организовать динамику функционального состояния систем организма.

Режим труда и отдыха работника: при вводе данных, редактировании программ, чтении информации с экрана непрерывная продолжительность работы не должна превышать четырех часов при восьмичасовом рабочем дне. Через каждый час работы необходимо делать перерыв на 5-10 минут, а через два часа на 15 минут.

Также, для снижения и устранения нервно-психологического, зрительного и мышечного напряжения, необходимо проводить комплекс физических упражнений и сеансы психофизической разгрузки и снятия усталости во время перерывов, и после окончания рабочего дня (занятие спортом или смена деятельности).

4.4 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (техника безопасности)

Основные опасные факторы, которые могут возникнуть при работе с компьютером представлены в **таблице 5**.

Таблица 5. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесс	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ)	Нормативные документы
Оператор ПК	Электрический ток	ГОСТ 12.1.002–84

Электробезопасность.

Наиболее опасным для человека является переменный ток с частотой 20 – 100 Гц. Опасной величиной тока является ток, равный 0,001 А, а смертельной 0,1 А. Также исход электропоражения зависит от состояния внешней среды.

Помещение, в котором выполнялась выпускная квалификационная работа, относится к категории помещений без повышенной опасности, поскольку помещение является сухим и хорошо отапливаемым, полы токонепроводящие, средняя температура от 18 до 20°, влажность от 40 до 50% с номинальным напряжением электроустановок до 1000 В. Также в помещении отсутствует возможность одновременного прикосновения человека к металлическим корпусам электрооборудования и металлическим конструкциям здания и механизмам, соединенным с землей. Однако, возможность поражения электрическим током все-таки существует, т.к. ЭВМ работает от источника тока. Для исключения опасности поражения электрическим током важно соблюдать правила электрической безопасности:

- Перед включением компьютера в сеть необходимо визуально проверить электропроводку на отсутствие видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей на корпус компьютера;
- При появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети ЭВМ и устранить неисправность;
- Запрещается при включенной ЭВМ одновременно прикасаться к приборам, имеющим естественное заземление.

Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении:

- защитное заземление;
- автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- выравнивание потенциалов;

- двойная или усиленная изоляция;
- сверхнизкое (малое) напряжение;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

Требования к устройству защитного заземления и зануления определены Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), в соответствии с которыми защитному заземлению или занулению подлежат все металлические и другие токопроводящие части электроустановок и оборудования, которые случайно в аварийном режиме могут оказаться под напряжением (ССБТ ГОСТ 12.1.030-81):

- при номинальном напряжении 380 В и выше переменного тока, 440 В и выше постоянного тока – во всех электроустановках;
- при номинальном напряжении выше 42 В, но ниже 380 В переменного тока и выше 110 В, но ниже 440 В постоянного тока – только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных помещениях и в наружных электроустановках;
- во взрывоопасных помещениях необходимо заземлять всеоборудование независимо от напряжения.

Наибольшие допустимые значения сопротивления заземления растеканию тока, установленные правилами устройства электроустановок, составляют для установок до 1000В 4 Ом – при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВт.

Поэтому к работе на ПК допускаются лица, прошедшие обучение безопасным методам труда, вводный инструктаж, первичный инструктаж на рабочем месте. Каждый работник должен знать правила первой медицинской помощи при поражении электрическим током, для того, чтобы быть готовым оказать помощь другим работникам.

4.5 Экологическая безопасность

При написании данной выпускной квалификационной работы были использованы следующие ресурсы: бумага; канцелярские принадлежности, а именно ручки, сделанные из пластмассы; компьютер.

При написании ВКР негативного воздействия на окружающую среду не оказывалось, т.к. работа проводилась за ПЭВМ. Никаких выбросов и отходов в окружающую среду, чрезвычайных ситуаций при работе с компьютером не было.

Переработка ресурсов, использованных при выполнении ВКР, включает в себя несколько этапов:

1. Удаление всех опасных компонентов.

2. Удаление всех крупных пластиковых частей. В большинстве случаев операция 2 также осуществляется вручную. Пластик сортируется в зависимости от типа и измельчается для того, чтобы в дальнейшем его можно было использовать повторно. Оставшиеся после разборки части отправляют в большой измельчитель, и все дальнейшие операции автоматизированы.

3. Измельченные в гранулы остатки компьютеров подвергаются сортировке. Сначала с помощью магнитов извлекаются все железные части. Затем приступают к выделению цветных металлов, которых в ПК значительно больше. В сухом остатке получается смесь пластика и меди. Медь выделяют способом флотации – гранулы помещают в специальную жидкость, пластик всплывает, а медь остается на дне.

4.6 Пожарная безопасность

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам электрического и неэлектрического характера.

Существуют четыре класса пожароопасности помещений. Данное помещение относится к классу В - помещения, в которых находятся (обращаются) горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и

трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, т.к. в помещении находились деревянные столы, стулья и бумага.

Меры пожарной профилактики:

- **Строительно-планировочные**. Строительно-планировочные меры определяются огнестойкостью зданий и сооружений (выбор материалов конструкций по степени огнестойкости). В зависимости от степени огнестойкости определяются наибольшие дополнительные расстояния от выходов для эвакуации при пожарах.
- **Технические.** Использование разнообразных защитных систем; соблюдение параметров технологических процессов и режимов работы оборудования;
- **Организационные.** Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности: правильная эксплуатация оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации (Приложение Е), соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, освещения, правильное размещение оборудования, своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Помещение, где была сделана выпускная квалификационная работа, снабжено противопожарной защитой (огнетушители порошковые ОП-3,), направленной на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара и ограничения материального ущерба от него.

Порошковый огнетушитель предназначен для применения в бытовых условиях в качестве первичного средства тушения пожаров класса А (твердых

веществ), С (горючих газов), В (горючих жидкостей или плавящихся твердых тел) и электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В (в зависимости от марки применяемого огнетушащего порошка) и имеет следующие характеристики:

Длина выброса - 3,8 м.

Огнетушащая способность - 2А;89В, (2.80).

Габариты - 450*320*300 мм.

Масса с зарядом - 5 кг

4.7 Чрезвычайные ситуации

Для Томской области характерны **сильные штормы**, поэтому с поступлением штормового предупреждения, которое подает подразделение Гидрометеослужбы за несколько часов до наступления опасного метеоявления, проводятся оперативные защитные мероприятия:

1) широкое оповещение населения о пути следования и времени подхода к различным районам опасного метеорологического явления, о возможном характере его воздействия, мерах безопасности и правилах поведения людей, оптимальных для складывающейся ситуации;

2) переход к безопасным режимам работы производств, прекращение строительно-монтажных работ с применением подъемных механизмов (башенных кранов), прекращение погрузоразгрузочных работ с применением подъемных механизмов (автокранов, портальных кранов, козловых и башенных);

3) перевод и перемещение в прочные или защищенные помещения уникального и особо ценного оборудования, в сельской местности – подвоз запаса кормов к фермам, создание запаса воды и т.д.

При работе во время такой природной чрезвычайной ситуации, как **сильные морозы**, предприятие должно проводить специальные мероприятие,

что работники работали в комфортных для себя условиях. Для этого необходимо проводить следующие мероприятия:

1) оборудовать все рабочие помещения на предприятии специальными обогревателями;
2) предоставить перевозку сотрудников от дома до места работы и обратно;
3) хранить в аптечке специальные медицинские препараты, если в случае данной природной ЧС состояние сотрудников ухудшится;
4) проведение семинаров, на которых сотрудники будут ознакомлены с тем, как вести себя в случае возникновения сильных морозов;
5) установка бензоэлектростанции на предприятии;
6) сделать утепление стен с помощью теплоизолирующих материалов.

Для предотвращения **несанкционированного проникновения посторонних лиц на предприятие** необходимо осуществление следующих мероприятий:

1) организация пропускной системы попадания на предприятие;
2) организация системы видеонаблюдения на предприятии;
3) соблюдение тайны о работниках предприятия;
4) издание (тиражирование) инструкций по охране труда;
5) наем охранной организации для контроля порядка на предприятии;
6) проведение семинаров, на которых сотрудники будут ознакомлены с тем, как вести себя в случае проникновения несанкционированных лиц на предприятие;
7) составление правил поведения на рабочем месте.

4.8 Выводы и рекомендации

Проанализировав условия труда на рабочем месте, где был разработана выпускная квалификационная работа, можно сделать вывод, что помещение удовлетворяет необходимым нормам и в случае соблюдения техники

безопасности и правил пользования компьютером работа в данном помещении не приведет к ухудшению здоровья работника.

Также, действие вредных и опасных факторов сведено к минимуму, т.е. микроклимат, шум, электробезопасность и пожаробезопасность соответствуют требованиям, предъявленным в соответствующих нормативных документах. При этом, система освещения в помещении соответствует норме и создает нормальные условия для работы.

Анализ экологической безопасности показал, что деятельность помещения не приносит вред окружающей среде.

Важно добавить, что монитор компьютера служит источником ЭПМ – вредного фактора, который отрицательно влияет на здоровье работника при продолжительной непрерывной работе и приводит к снижению работоспособности. Поэтому во избежание негативного влияния на здоровье необходимо делать перерывы при работе с ЭВМ и проводить специализированные комплексы упражнений для глаз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты моделирования процесса кристаллизационного аффинажа в линейном кристаллизаторе непрерывного типа на примере выделения кристаллов ГНУ.

В ходе данного исследования получены следующие результаты:

1. Получена система нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающая рассматриваемый процесс. Разработан алгоритм численного решения полученной системы уравнений;
2. Проанализированы два наиболее важных режима работы аппарата: стартовый режим и режим, возникающий после замены накопительной ёмкости. Для каждого режима определены характерные параметры. Анализ полученных значений времени заполнения накопительной емкости показал, что эти времена для обоих режимов различаются незначительно (менее 1%). Это объясняется достаточно быстрым формированием насыщенного раствора НУ после момента прохождения концентрационного фронта НУ при заполнении аппарата маточным раствором;
3. Получены приближенные аналитические выражения для оценки времени заполнения накопительной емкости. Разница между расчетными (по математической модели) и аналитическими оценками не превышает 5%;
4. Моделирование режимов, при которых проводился эксперимент по кристаллизации ГНУ, позволило сделать заключение, что выбранные для экспериментов режимы имеют низкую (менее 80%) эффективность с точки зрения выделения кристаллов целевого продукта.

Данная модель позволяет оценивать периодичность замены накопительной емкости; определять характерные времена переходных режимов работы кристаллизатора, возникающих при изменении внешних условий; оценивать время отклика параметров процесса на изменение управляющих характеристик и может быть использована при разработке АСУ линейного кристаллизатора непрерывного типа.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

Статьи в рецензируемых научных журналах:

1) **Veselov S., Volk V., Kasheev V., Podimova T., Posenitskiy E.** Mathematic Simulation of Crystallization Refining Process of Spent Nuclear Fuel Reprocessing Desired Products in Linear Crystallizer. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1086. P. 666-672;
2) **Veselov S.N., Volk V.I., Kashcheev V.A., Podymova T.V., Posenitskii E.A.** Crystallization Refining Process of Target Products During Reprocessing of Spent Nuclear Fuel: Mathematical Model of a Linear Crystallizer. *Atomic Energy*. 2016. Vol. 119, № 5. P. 344-350;
3) **Веселов С.Н., Волк В.И., Кащеев В.А., Подымова Т.В., Посеницкий Е.А.** Математическое моделирование процесса кристаллизации в линейном кристаллизаторе непрерывного типа. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т. 90, № 1. С. 148-158;
4) **Веселов С.Н., Волк В.И., Кащеев В.А., Посеницкий Е.А.** Анализ режимов работы линейного кристаллизатора непрерывного типа. *Химическая технология*. 2017. Т. 60, № 3. С. 136-144.

Доклады на российских и международных конференциях:

1) **Веселов С.Н., Волк В.И., Кащеев В.А., Подымова Т.В., Посеницкий Е.А.** Математическое моделирование процесса кристаллизационного аффинажа переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) в линейном кристаллизаторе. *Сборник тезисов докладов VI международной научно-практической конференции "Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности"*, 5-7 июня 2014, Томск, С. 24;
2) **Кащеев В.А., Подымова Т.В., Посеницкий Е.А.** Оптимизация кристаллизационного выделения целевого продукта переработки ОЯТ на основе анализа математической модели линейного кристаллизатора. *Сборник тезисов докладов XVI школы молодых ученых ИБРАЭ РАН*, 23-24 апреля 2015, Москва, С. 124-127;
3) **Кащеев В.А., Подымова Т.В., Посеницкий Е.А.** Математическое моделирование процесса кристаллизационного аффинажа переработки облученного ядерного топлива в линейном кристаллизаторе. *Сборник тезисов докладов конференции "МАЯТ-2015"*, 12 ноября 2015, Москва, С. 22-24;
4) **Кащеев В.А., Подымова Т.В., Посеницкий Е.А.** Математическая модель кристаллизационного выделения урана при переработке облученного ядерного топлива (ОЯТ). *Сборник тезисов докладов конференции "Математика. Компьютер. Образование"*. 25-30 января 2016, Дубна. С. 206;
5) **Кащеев В.А., Посеницкий Е.А.** Математическое моделирование работы линейного кристаллизатора непрерывного типа на примере выделения кристаллов гексагидрата нитрата уранила. *Сборник тезисов XIII международной конференции "Перспективы развития фундаментальных наук"*, 26-29 апреля 2016, Томск. С. 90-92.
6) **E. A. Posenitskiy, R. O. Rezaev, V. M. Fomin** Reduction of dissipation in rolled-up superconductor microstructures. *DPG Spring Meeting*, 19-24 March 2017, Dresden.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. E. Henrich, U. Baunder, R. Huefner, W. Roesch, K. Ebert. 1985. 4759878 США, 1985 г.
2. H.T. Christensen, K.E. Holmberg. Nucleonic, 1968, V. 11, №4, P.165
3. E. Henrich, H. Schmieder, K. Ebert. Proc. Intern. Conf. EXTRACTION'87, Donreay, Scotland, 1987, P. 191-195
4. G. Petrich, H.J. Bleyl, U. Galla, H. Goldaker, J. Romer, H. Schmieder, J. Schon. Proc. Intern. Conf. ISEC'90, Kyoto, Part A, 1992, P. 555-560.
5. T. Koyama, Yu. Koma, Yu. Sano, Yu. Tanaka. Proc. Intern. Conf. GLOBAL'97, 1997, v. 2, p. 1495-1499.
6. Funasaka H., Koma Y., Sato K. et al. Waste Management Implication of Advanced Fuel Cycle System Using Fast Reactor (FR) // Proc. Intern. Conf. Waste Management'06, Feb. 26-March 2, 2006, Tucson, Arizona
7. Koyama T., Sano Yu., Kaniya M. et al. Present Status of Advanced Aqueous Separation Process Technology Development // JAERJ-Conf 2005-007, p. 191-196
8. Koichi Ohyama, Kazunori Nomura, Tadahiro Washiya, Toshimitu Tayama, Kimihiko Yano, Atsuhiro Shibata, Jun Komaki, Takahiro Chikazawa, Toshiaki Kikuchi. Development of Uranium Crystallization System in 'NEXT' Reprocessing Process // Global 2007, Boise, Idaho, September 9-13, 2007
9. Shunji Homma, Jun-ichi Ishii, Toshiaki Kikuchi, Takahiro Chikazawa, Atsuhiro Shibata, Tomozo Koyama, Jiro Koga and Shiro Matsumoto. Flowsheet Study of U-Pu Co-Crystallization Reprocessing System // Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, No. 6, p. 510–517, 2008
10. M. Nakahara and K. Nomura. Effect of crystal size on purity of uranyl nitrate hexahydrate crystalline particles grown in nitric acid medium // Radiochim. Acta 100, 821-826, 2012

11. V.I. Volk, A.Yu. Vakhrushin, B.S. Zakharkin, S.L. Mamaev, V.S. Vlasov. Proc. Intern. Conf. RECOD'98, 1998, v. 1, S. 134-140
12. В.И. Волк. Сб. тезисов III Российской конференции по радиохимии, Санкт-Петербург, 2000, с. 100
13. V.I. Volk, L.V. Arseenkov, S.A. Nikonov, S.N. Veselov. The study of co-crystallization of uranium and plutonium nitrate hexahydrate in the process of mixture undivided refining crystallization // The first Russian-Nordic Symposium on Radio-chemistry «RNSR-2013», Moscow, Russia, 21-24 October 2013
14. Волк В.И., Арсеенков Л.В., Вахрушин А.Ю., Савенко В. П., Малышева Т.А. и др. Патент РФ на полезную модель «Устройство для непрерывной кристаллизации и выгрузки кристаллов» №40905, 2004
15. Волк В.И., Арсеенков Л.В., Данилин Е.М. и др. Патент РФ на изобретение «Способ очистки нитрата уранила от продуктов деления и устройство для его осуществления» № 2268510, 2006
16. Воронецкая Е.В., Розен А.М. Плотность, вязкость, поверхностное натяжение и коэффициенты диффузии веществ в системе H2O-UO2(NO3)2-HNO3-ТБФ // Сборник «Экстракция. Теория, применение, аппаратура.» Вып. 2, Москва: Госатомиздат, 1962, с. 199-208.
17. V. Kasheev, E. Posenitskiy. Mathematic Simulation of Continuous Type Linear Crystallizer Operating Modes Based on Uranyl Nitrate Hexahydrate Crystals Sorting // Proceedings of 13-th International Conference "Prospects of Fundamental Sciences Development", Tomsk, Russia, April 2016, p. 90 – 92
18. S. Veselov, V. Volk, V. Kashcheev, T. Podymova, E. Posenitskiy. Mathematical Simulation of the Crystallization Process in a Continuous Linear Crystallizer // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 90(1): 140–150, 2017
19. A. O. Bique, A. G. Goryunov. Simulation of the Uranium Crystallization Process Using Cellular Automata // Advanced Materials Research, Vol. 1084, pp. 72-76, 2015

20. A. O. Bique, A. G. Goryunov, F. Manenti. A comparison of simulation techniques for uranium crystallization process // Chemical Engineering Transactions. Vol. 43, pp. 793-798, 2015
21. A. O. Bique, A. Gozhimov, Y. Chursin, F. Manenti, O. Schmidt. Modeling of Uranyl Nitrate Hexahydrate Crystal Growth in Linear Crystallizer for Nano Cleaning Using SimSar Software // Key Engineering Materials, Vol. 683, pp. 563-568, 2016
22. С.Н. Веселов, В.И. Волк, В.А. Кащеев, Т.В. Подымова, Е.А. Посеницкий. Математическое моделирование процесса кристаллизационного аффинажа целевых продуктов переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) в линейном кристаллизаторе // Сборник тезисов докладов VI международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности», Томск, 2014, с. 24
23. Veselov Sergey, Volk Vladimir, Kasheev Vladimir, Podimova Tatiana, Posenitskiy Evgeny. Mathematic Simulation of Crystallization Refining Process of Spent Nuclear Fuel Reprocessing Desired Products in Linear Crystallizer // Advanced Materials Research Vol. 1084 pp. 666--672. Jan. 2015
24. S. Veselov, V. Volk, V. Kashcheev, T. Podymova, E. Posenitskii. Crystallization Refining of Target Products During Reprocessing of Spent Nuclear Fuel: Mathematical Model of a Linear Crystallizer // Atomic Energy, 119(5): 344–350, 2016
25. Веселов С.Н., Волк В.И., Кащеев В.А., Посеницкий Е.А., Анализ режимов работы линейного кристаллизатора непрерывного действия // Химическая технология, 60(3): С. 136-144, 2017
26. Подымова Т.В., Посеницкий Е.А., Кащеев В.А. Оптимизация кристаллизационного выделения целевого продукта переработки ОЯТ на основе анализа математической модели линейного кристаллизатора // Сборник трудов XVI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, Москва, 2015, с. 124-127

27. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – Москва: Дрофа, 2003. – 840 с.
28. Калиткин Н.Н. Численные методы: Учеб. для вузов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
29. Крейнина М.Н. Финансовый менеджмент: Учеб. пособие. - М.: "Дело и Сервис", 2001. - 400 с.
30. Черняк, В.З. Бизнес планирование: Учеб. для вузов. - М. ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 470 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Раздел 1

Математическое моделирование нестационарных режимов работы линейного кристаллизатора непрерывного типа при переработке ОЯТ

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0ВМ51	Посеницкий Евгений Александрович		

Консультант – лингвист кафедры ИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ТПУ	Зяблова Наталия Николаевна	Кандидат филологических наук		

LITERATURE REVIEW

The concept of the closed nuclear fuel cycle (see Fig.1) is currently accepted in Russian Federation.

The technology of spent nuclear fuel (SNF) reprocessing has been realized at Production Association «Mayak». The industrial technology of SNF reprocessing (PUREX-process) is based on the dissolution of the SNF in a nitric acid with subsequent separation of the desired products (uranium and plutonium) from the extractant. «Mining and Chemical Combine» has the training-demonstrating factory, which is realizing the reprocessing of SNF with the lowest possible rate of the liquid nuclear waste. Enterprise launching is scheduled for 2018.

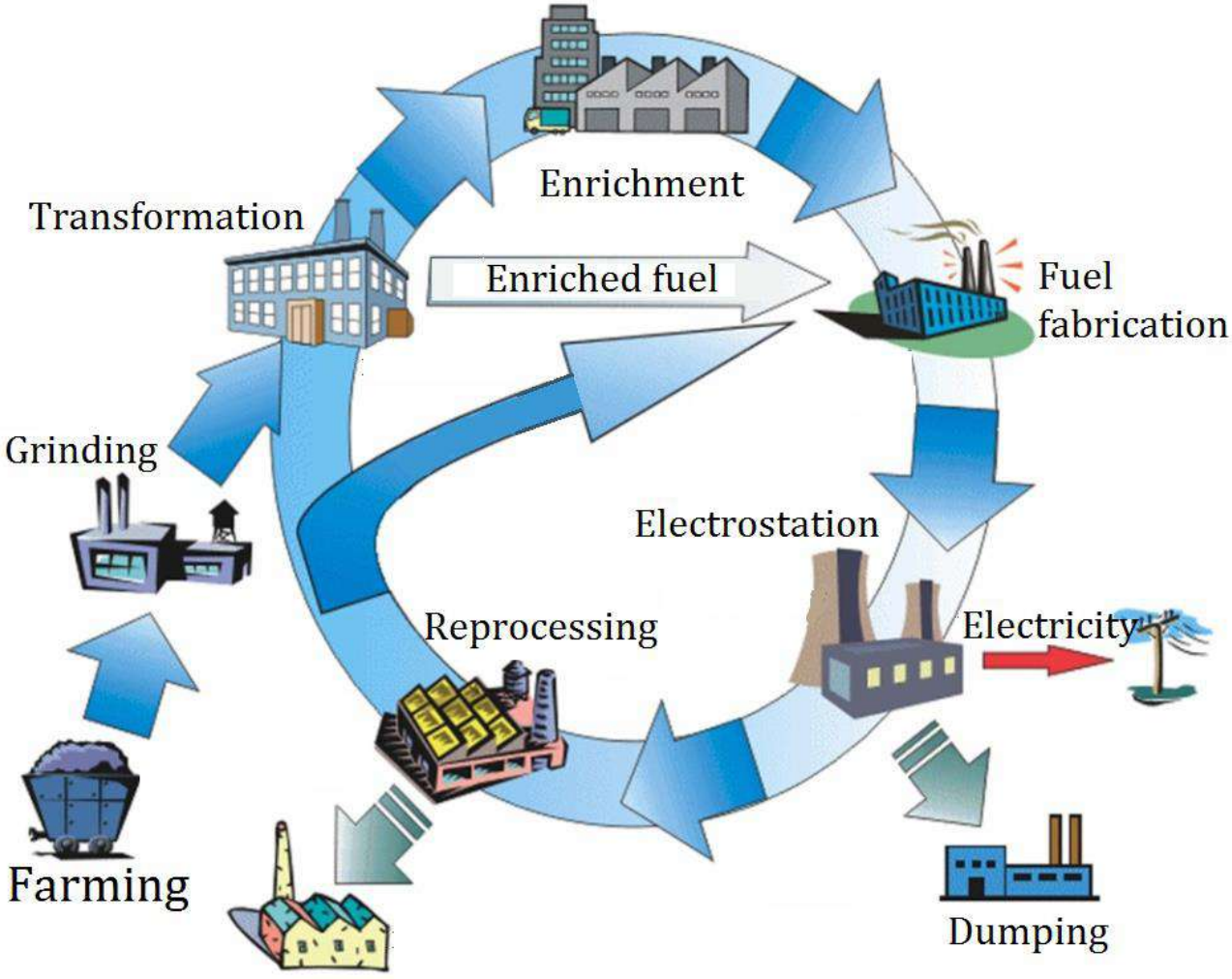


Figure 1 – Principal scheme of the closed nuclear fuel cycle in atomic energy

German researchers [1] were first to suggest the crystallization refining process of uranium as a possible substitution of the second extraction cycle for the crystallization process of uranium in the form of uranyl nitrate hexahydrate $6H_2O \cdot UO_2(NO_3)_2$ crystals. Detailed observation of the system «uranyl nitrate-nitric acid-metals nitrates» in a wide range of temperatures [2] demonstrate that uranyl nitrate hexahydrate (UNH) in the crystal form possesses a unique property, which is an absence of isomorphic inclusions of other elements impurities. This fact allows predicting high purity of the formed UNH crystals.

The project of the «Milli» device was created at the reprocessing factory WAK in Karlsruhe. This device operates with the uranium, which is highly saturated with the extragent during the first extraction cycle and allows to further refine the uranium re-extract for obtaining the product with expected purity [3,4]. The crystallization process supposed to be periodical with the temperature equal to minus 30 °C and simultaneous freezing-out of water. Stoppage of the WAK factory led to the fact that the «Milli» project was not launched.

Japanese researchers [5-10] actively develop crystallization refining procedure for separation of the basic uranium mass at the initial stage of the SNF reprocessing process in «JOYO» reactor. The continuous crystallization of UNH from the nitric acid solution in «JOYO» carries out for the uranium concentration equals to 550 g/l.

Estimations of the Japanese specialists [6] demonstrate that integration of the reagentless uranium (which compile from 70 to 85% of SNF mass) crystallization process, coupled with the extracting purification, in the SNF reprocessing procedure, provides the following advantages as compared to the traditional PUREX-process:

- relative simplification for the remote control;
- reduction of the organic diluent volume during extraction procedure;
- reduction of the equipment and hot cell costs;
- reduction of the liquid nuclear waste;
- compliance with the principle of non-proliferation through the non-separation of uranium and plutonium during the SNF reprocessing.

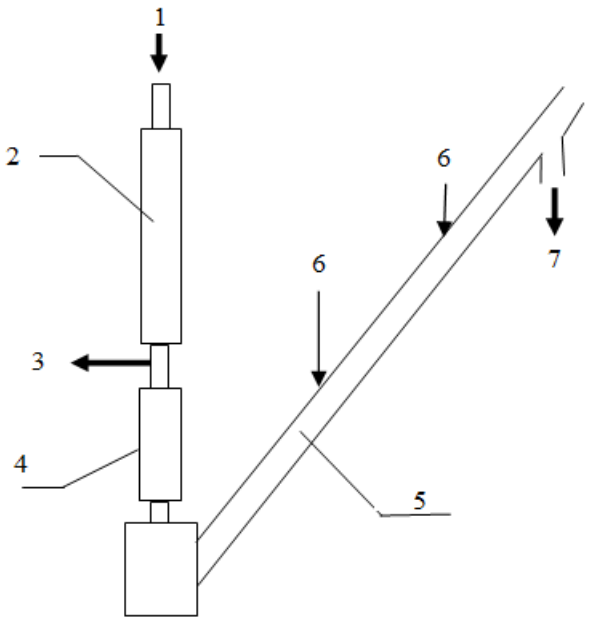
Auger device-crystallizer combined with additional devices for separating mother/washing solutions and drainage of the UNH crystals totally satisfy the basic principles of the Japanese technology.

Crystallization refining as a technological operation has been first time suggested and implemented by Russian researchers from the joint-stock company «VNIINM» [11-13] for conditions of thorium-uranium fuel reprocessing during first extraction cycle. This operation consists of separation through crystallization of basic thorium mass and subsequent uranium crystallization refining from the mother solution. Volume of the reprocessing solutions and liquid nuclear waste respectively, as well as a number of production space required for this technological procedure, has been reduced more than ten times. Further research of the crystallization technology at the joint-stock company «VNIINM» focused on the reprocessing uranium-plutonium fuel.

Russian researchers have been trying to create fully continuous technology of crystallization refining of uranium as compared to Japanese and German scientists. The technology consists of the following operations:

- uranium crystallization from the solution in the form of UNM;
- countercurrent washing (deep purification from impurities);
- drainage of the UNH crystals (liquid phase separation to make desired product more compactable);
- accumulation of the dried UNH crystals in the storage tank.

The steps presented above are supposed to be consistently performed in a single device, which is called a continuous crystallizer. Crystallization technology performs from the highly concentrated solution of uranium where uranium concentration varies from 800 to 1000 g/l. Such set of operational conditions allows to minimize the volume of the mother solution, which subsequently becomes a liquid nuclear waste.



1 - UNH solution input
2 - Crystallization pillar
3 - Mother and washing solutions output
4 - Zone for UNH crystals washing
5 - Auger transporter
6 - Compulsory washing solution input
7 - UNH crystals output

Figure 2 - Diagram of a continuous crystallizer with the auger transporter

Auger transporter (AT) was integrated in the first model type (see Fig. 2) of continuous crystallizer [14] for unloading the desired product in the crystal form. AT keep crystals at the bottom of crystallization pillar to transport them up at an 60° angle to the horizon where they will be unloaded. Simultaneously AT is a washing zone for UNH crystals due to countercurrent dynamics of the washing solution.

Initial stage demonstrates the possibility to reach high degree (approximately 10^2-10^3) of UNH purification from the impurities. Simultaneously, a list of technological and engineering difficulties has been observed during experiments at the continuous crystallizer with AT:

- «piston effect», when UNH crystals tightly fulfill the interturn space of the AT and acquire the piston properties;
- gradual accumulation of the UNH crystals at the bottom of crystallization pillar in the narrowed space before entering AT;

- low time of response to any changes in experimental conditions – first UNH crystals appear at the device output in 1,5-2 hours from the launching, stationary equilibrium process establish in 3-4 hours;
- large mass of uranium (approximately kilograms) has to be reprocessed, filtered and refined.

The project of the new linear type device for UNH crystallization [15] was developed in order to fix the listed above difficulties.

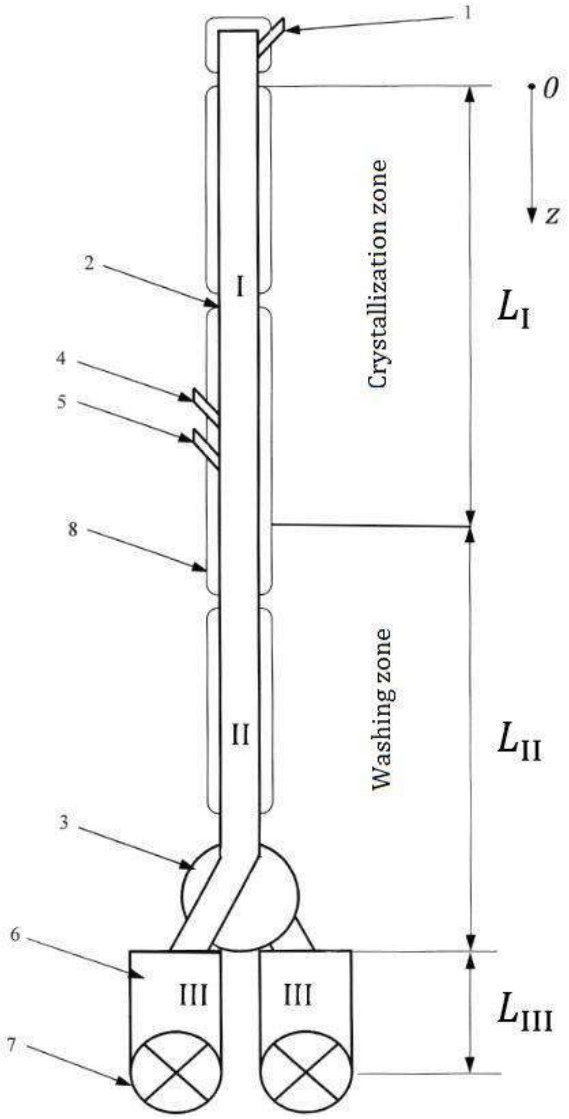


Figure 3 – Diagram of a linear continuous crystallizer. 1 – heated pipe connection for supply of a highly concentrated solution (fusion cake), 2 – working space of the crystallizer, 3 – distribution cock, 4 – pipe connection for removal of the mother solution, 5 – pipe connection for removal of exhausted washing solution, 6 – storage tank, 7 – full-swing crane, 8 – cooling jacket of three loops, I – crystallization zone, II – washing zone, III – storage tank

The current linear crystallizer is a metal tube with the external cooling jacket 8 (see Fig.3). The internal volume of pipe 2 (working volume) is divided into two zones: crystallization zone (I) and zone for washing and accumulating the UNH crystals (II). Crystallizer must be located vertically for proper operating mode. Mother nitric acid solution enters the working volume (zone I) from the above part of the device. This solution consists of the separated (desired) dissolved form product and must be heated up to a certain temperature. Boundary of the working volume is cooled down with the coolant, which is circulating in the cooling jacket. Mother solution cools down and becomes oversaturated with the desired product while moving down in a stream of liquid phase. It launches the process of crystals growth from the oversaturated mother solution. The resulting crystals move in the zone I co-directionally with the mother solution and acquire an additional velocity in comparison with the solution due to the difference in mass densities.

Nitric acid washing solution enters the bottom part of the device's working volume (zone II). This solution rises up through the working volume while been displaced by the precipitating crystals. The initial temperature of the washing solution and the initial concentration of the desired product are selected in such a way that, as the crystals pass through zone II, they partially dissolve in the washing solution to purify the near-surface layers of the crystals from trapped impurities. As a result, the crystals of the target product move in opposite directions with the washing solution in zone II, thus providing decrease of the linear velocity of the crystals in zone II as compared with the velocity in zone I. The purified from impurities UNH crystals enter the storage tank, which must be replaced after filling with the desired product.

At the interface between zones I and II, the mother solution 4 and washing solution 5 must be removed from the working volume of the device. Accordingly, the switching of the crystals' motion type from the co-directed to the countercurrent with liquid solution. The size of the switching space is insignificant in comparison with the sizes of the working zones II and I. According to this, it is possible to consider the

transition space as extremely small and the speed switching process as instantaneous during the mathematical description of the crystallization process.

The design of the mother solution loading units (in the upper part of zone I) and the discharge units of crystals (in the bottom part of zone II) allows the crystallizer to operate continuously. The design of the device's cooling jacket provides independent cooling of several sections in the working zones II and I.

Description of development and a detailed analysis of the mathematical model [16,17] describing the dynamics of crystal formation in a linear crystallizer presented in this final qualifying thesis. This model allows simulating the crystallization dynamics in linear crystallizer. The model presented in this work allows us to estimate the characteristic stabilization times of the crystallization process when the operating mode of the crystallizer changes. The proposed mathematical model of crystallization refining [18-20], based on the method of cellular automata, and the model of the device's stationary operating mode previously developed by the joint-stock company «VNIINM» [21-24] do not possess this advantage.

It is clear that a number of practically important issues related to the operation of the linear crystallizer exist. They cannot be analyzed within the framework of the stationary mathematical model of the crystallizer. For instance, both the calculation of the filling time of storage tank in the launching operating mode of the crystallizer and after replacing the filled with a crystalline product storage tank with empty storage tank required for the development of the automated process control system. Simplified analytical estimates for the filling time of the storage tank [25] were obtained and analyzed in the "maximum efficiency" [26] device operating modes (i.e., the modes which corresponds to maximal possible extraction of the desired product from the liquid solution for the given temperature parameters of the process).

The density ρ_l of the liquid phase solution is one of the most important parameters, which determines the dynamics of hydrodynamic processes in the working volume of the crystallizer.

There is no information regarding the density of the uranyl nitrate liquid solution for the entire possible range of both the uranyl nitrate (C_{UN}^{m}) and nitric acid ($C_{\mathrm{HNO_3}}^{m}$) mass concentrations. Certain experimental difficulties related to the calculation of solution density for UN concentrations larger then saturation concentration with the fixed temperature ($C_{UN}^{m} > C_{UN}^{m,sat}(T)$) due to the decay of supersaturated solution. Additive principle is a common choice for estimates of the multicomponent solution density. This principle based on the suggestion that molecules of the separate components occupy their own space in the solution. Thus, the equation for calculating the solution density through the density of the separate components written as follows

$$\frac{1}{\rho_{\mathrm{l}}} = \frac{C_{\mathrm{UN}}^{m}}{\rho_{\mathrm{UN}}} + \frac{C_{\mathrm{HNO_3}}^{m}}{\rho_{\mathrm{HNO_3}}} + \frac{C_{\mathrm{H_2O}}^{m}}{\rho_{\mathrm{H_2O}}}, \qquad (1)$$

where ρ_{UN}, $\rho_{\mathrm{HNO_3}}$, $\rho_{\mathrm{H_2O}}$ – density of UN, nitric acid and water respectively. The following equation can be written for mass concentrations of the liquid solution's components (C_{UN}^{m}, $C_{\mathrm{HNO_3}}^{m}$ and $\mathrm{C_{Hy}^{m}}$)

$$C_{\mathrm{UN}}^{m} + C_{\mathrm{HNO_3}}^{m} + C_{\mathrm{H_2O}}^{m} = 1. \qquad (2)$$

The UN density estimated through the density of the UNH crystals ($\rho_{\mathrm{UNH}} = \rho_{\mathrm{s}} = 2{,}8$ kg/l), since there is no UN exists in liquid phase. Taking into account the sealing though the UNH crystallization from the liquid solution coefficient $\beta = 1{,}05$ and including the fact the UNH consists of the water molecules the following equation used to estimate the UN density

$$\rho_{\mathrm{UN}} = \frac{\rho_{\mathrm{H_2O}}\rho_{\mathrm{s}}}{\beta(1+\alpha)\rho_{\mathrm{H_2O}} + \alpha\rho_{\mathrm{s}}} = 4{,}4 \text{ kg/l},$$

where parameter $\alpha = \frac{6M_{\mathrm{H_2O}}}{M_{\mathrm{UN}}} = 0{,}274$ calculated as mass of six water molecules divided by mass of the UN molecule.

UN has limited solubility in aqueous solutions of nitric acid. The UN solubility isotherms presented in Figure 4, where concentrations of the solution components expressed in mass percentage. In case of solution supersaturation the UN precipitate in

the crystalline phase of UN excess in the form of UNH - $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$. The water existing in the liquid phase virtually separated into two parts: first part is required for transforming entire UN into UNH and second part, which is the so-called «free» part. Considering the fact, that one UN molecule requires six water molecules to create the UNH crystal one can write $C^m_{H_2O} = C^m_{H_2O/UNH} + C^m_{H_2O/free}$, where $C^m_{H_2O/UNH} = \alpha C^m_{UN}$.

Equation (2) can be now rewritten in the following form

$$C^m_{UN}(1+\alpha) + C^m_{HNO_3} + C^m_{H_2O/free} = 1. \quad (3)$$

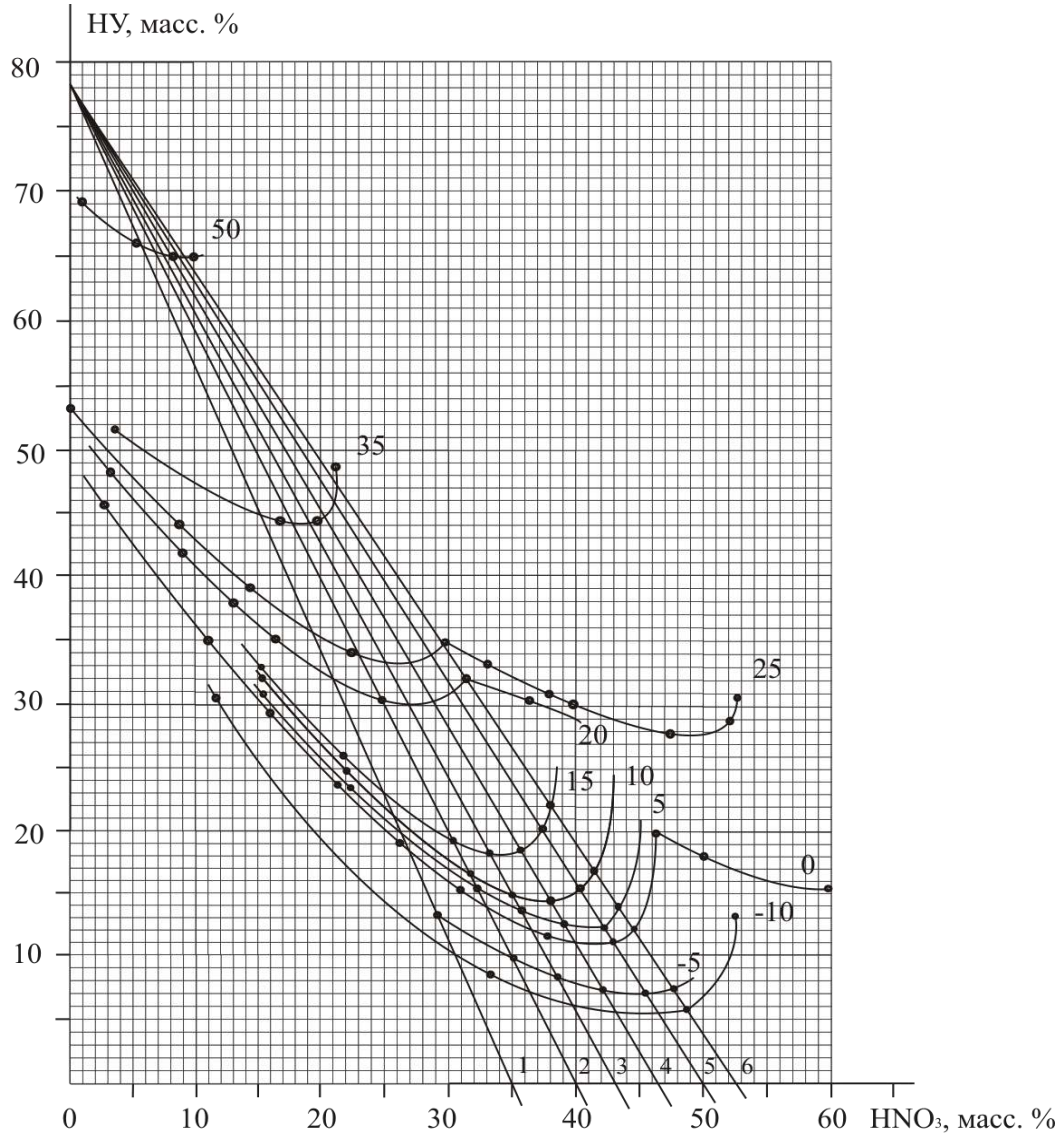


Figure 4 - Diagram of the dissolubility of uranyl nitrate in a nitric acid solution at different temperatures with the positioning of working lines of the UNH crystallization process (straight inclined lines at the diagram)

No nitric acid and «free» water required during the growth of the UNH crystalline phase and only the initial composition of the liquid phase entering the device determines the ratio of their mass fractions. Taking this into account

$$C^m_{\mathrm{H_2O/free}} \Big/ C^m_{\mathrm{HNO_3}} = \psi_0 = const,$$

thus $C^m_{\mathrm{UN}}(1+\alpha) + C^m_{\mathrm{HNO_3}}(1+\psi_0) = 1$ or

$$C^m_{\mathrm{UN}} = \frac{1}{1+\alpha} - C^m_{\mathrm{HNO_3}} \frac{1+\psi_0}{1+\alpha} = C_s - \psi C^m_{\mathrm{HNO_3}}, \quad (4)$$

where $C_s = {}^{1}\Big/_{(1+\alpha)} = 0{,}785$;

$\psi = {}^{(1+\psi_0)}\Big/_{(1+\alpha)}$ – the parameter of the working line of the crystallization process.

Equation (4) is the working line equation for the crystallization process. This law determines any changes in mass fractions of the UN and nitric acid in liquid phase during the crystallization refining. Inclination coefficient ψ in Fig. 4 calculated through the initial composition of the mother solution. It stay constant during the entire crystallization cycle.

The mass density of the liquid phase is a function of composition and temperature. The experiments carried out in joint-stock company «VNIINM» demonstrated that the formula (1) does not precisely describe the dependence of the liquid phase density on the composition, especially in the range of high concentrations (of the order 800-1000 g/l). A number of empirically derived relationships are proposed for estimating the density of UN solutions in the technical literature. The most reliable is the formula proposed by A.M.Rozen [16] for calculating the density of a nitric acid solution at a temperature of 25 °C.

The results of the UNH solubility determination in aqueous nitric acid solutions in the temperature range from minus 30 to plus 35 °C presented in [9]. The authors proposed the following equation for the dependence of the density of such solutions

(g/l) on the concentrations of uranium, nitric acid and temperature based on the measurements they performed.

$$\rho_l = 1023 + 23{,}96 \cdot C_{HNO_3} + 1.313 \cdot C_U - \left(0{,}47 + 0{,}04 \cdot C_{HNO_3}\right)T, \qquad (5)$$

where C_{HNO_3} – nitric acid concentration in moll/l;

C_U – uranium or it's sum with plutonium concentration in the solution;

T – temperature in °C.

Using the following formulas one can realize a conversion of nitric acid and uranium concentrations in (5) into mass fractions of nitric acid and UN, respectively

$$\begin{gathered} C^m_{UN}\rho_l = K_1 C_U,\ K_1 = {}^{M_{UN}}\!/_{M_U} = 1{,}66; \\ C^m_{HNO_3}\rho_l = K_2 C_{HNO_3}, K_2 = 63\ \text{g/mol}, \end{gathered} \qquad (6)$$

which leads to the following equation for calculating the density nitric acid solution of UN

$$\rho_l = \frac{1023 - 0{,}4681 \cdot T}{1 - 0{,}79 \cdot C^m_{UN} - 0{,}466 \cdot C^m_{HNO_3} + 0{,}00055 \cdot C^m_{HNO_3} \cdot T}. \qquad (7)$$

A number of experiments was conducted in joint-stock company «VNIINM» to measure the densities of solutions in a wide range of uranium/nitric acid concentrations and temperature to estimate the efficiency of the presented equations. The results of the experiments confirmed the high accuracy of the density determination for nitric acid solutions of UN using formula (7). The deviation of the calculated and experimental results did not exceed 2%.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Таблица для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес крите-рия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Бф	$Б_{к1}$	$Б_{к2}$	Кф	$К_{к1}$	$К_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресуросоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,09	5	4	4	0,45	0,4	0,4
3. Помехоустойчивость	-						
4. Энергоэкономичность	-						
5. Надежность	0,09	5	5	4	0,45	0,45	0,36
6. Уровень шума	-						
7. Безопасность	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
8. Потребность в ресурсах памяти	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
9. Простота эксплуатации	0,08	5	4	5	0,4	0,32	0,4
10. Качество интеллектуального интерфейса	0,08	5	4	5	0,4	0,32	0,4
11. Возможность подключения всеть ЭВМ	-						
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,08	5	4	5	0,4	0,32	0,4
2. Уровень проникновения на рынок	0,09	4	4	4	0,36	0,36	0,36
3. Цена	0,08	4	4	4	0,4	0,4	0,4
4. Срок эксплуатации	-						
5. Послепродажное обслуживание	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
6. Финансирование научной разработки	0,09	5	4	4	0,45	0,36	0,36
7. Срок выхода на рынок	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
8. Наличие сертификации	-						
ИТОГО	**1**				**4,83**	**4,33**	**4,48**

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Итоговая матрица SWOT

Внешняя среда / Внутренняя среда	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Приложение к реальному физическому процессу С2. Экономичность разработанной модели С3. Быстрая оценка характеристик для работы аппарата С4. Использование методов численной математики С5. Ускорение расчетов за счет реализации модели на языке С++	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. В модели допущен ряд допущений и приближений; Сл2.Модель учитывает только одно пространственное измерение; Сл3. Отсутствие экспериментальных данных о значениях некоторых физических констант.
Возможности: В1.Использование модели для разработки АСУ ТП; В2. Использование модели для визуализации работы аппарата; В3. Интеграция модели в разрабатываемые программные комплексы для моделирования переработки ОЯТ.	Математическая модель полностью соответствует требованиям, необходимым для разработки АСУ ТП аппарата. Реализация расчетной программы на С++ позволяет производить визуализацию работы аппарата в реальном времени, а также упрощает ее интеграцию в другие разрабатываемые программные продукты, используемые для моделирования переработки ОЯТ.	Наличие ряда допущений при построении математической модели накладывает определенные ограничения на область ее применения и на возможность визуализации комплексных физико-химических процессов в аппарате.
Угрозы: У1. Изменение компонентного состава	Данная модель учитывает одновременно несколько физических процессов происходящих в аппарате,	Модель не учитывает возможности ввода дополнительных реагентов в рабочий

моделируемого раствора; У2. Разработка трехмерной математической модели на базе суперкомпьютера; У3. Отсутствие спроса на разрабатываемую модель.	что сильно повышает ее конкурентоспособность и практическую значимость. Основная часть физических результатов может быть получена в короткие сроки, без проведения затратных по времени компьютерных вычислений, из-за чего модель идеально подходит для разработки АСУ ТП.	объем аппарата, что ограничивает спектр моделируемых растворов. Изменение политики гос. корпорации РОСАТОМ в отношении переработки ОЯТ может привести к спаду спроса на разрабатываемую модель

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Календарный план-график проведения НИР по теме

	Содержание работ	Исполни-тели	$T_{к}$, кал. Дней	Продолжительность выполнения работ																							
				Март				Апрель				Май				Июнь											
				1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2										
1	Разработка задания на ВКР	Тр	2																								
2	Составление и утверждение задания	Тр	2																								
3	Выбор направления исследования и способов решения задач	Тр, По	10																								
4	Изучение литературы	По	16																								
5	Разработка математической модели	Тр, По	15																								
6	Разработка алгоритма численного моделирования	По	25																								
7	Анализ и обработка полученных результатов	По	10																								
8	Обобщение и оценка результатов	Тр, По	2																								
9	Оформление пояснительной записки	По	8																								
10	Подготовка к защите ВКР	По	13																								

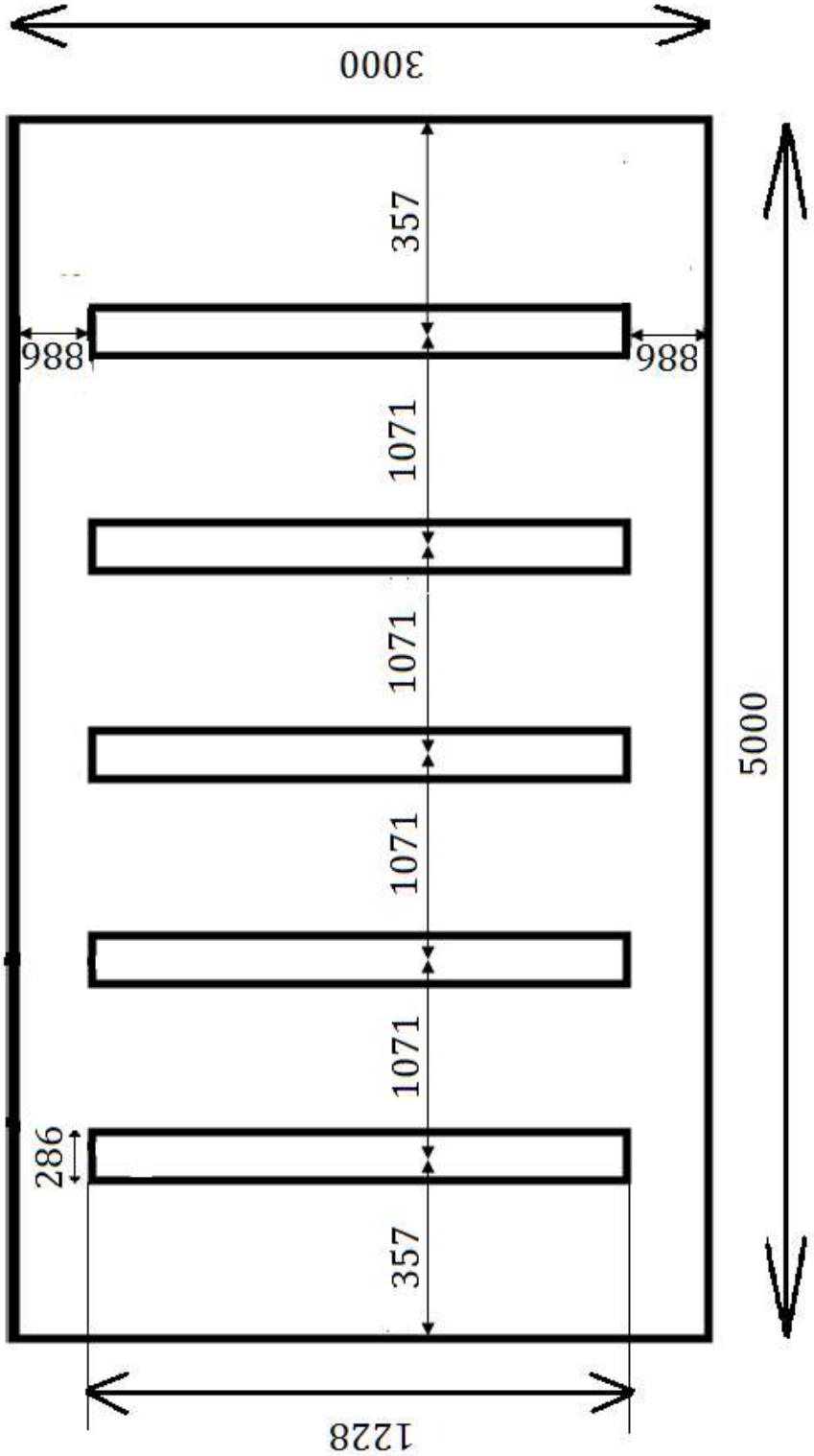
Календарный план-график проведения НИР по теме

Трифонов А.Ю. Посеницкий Е.А.

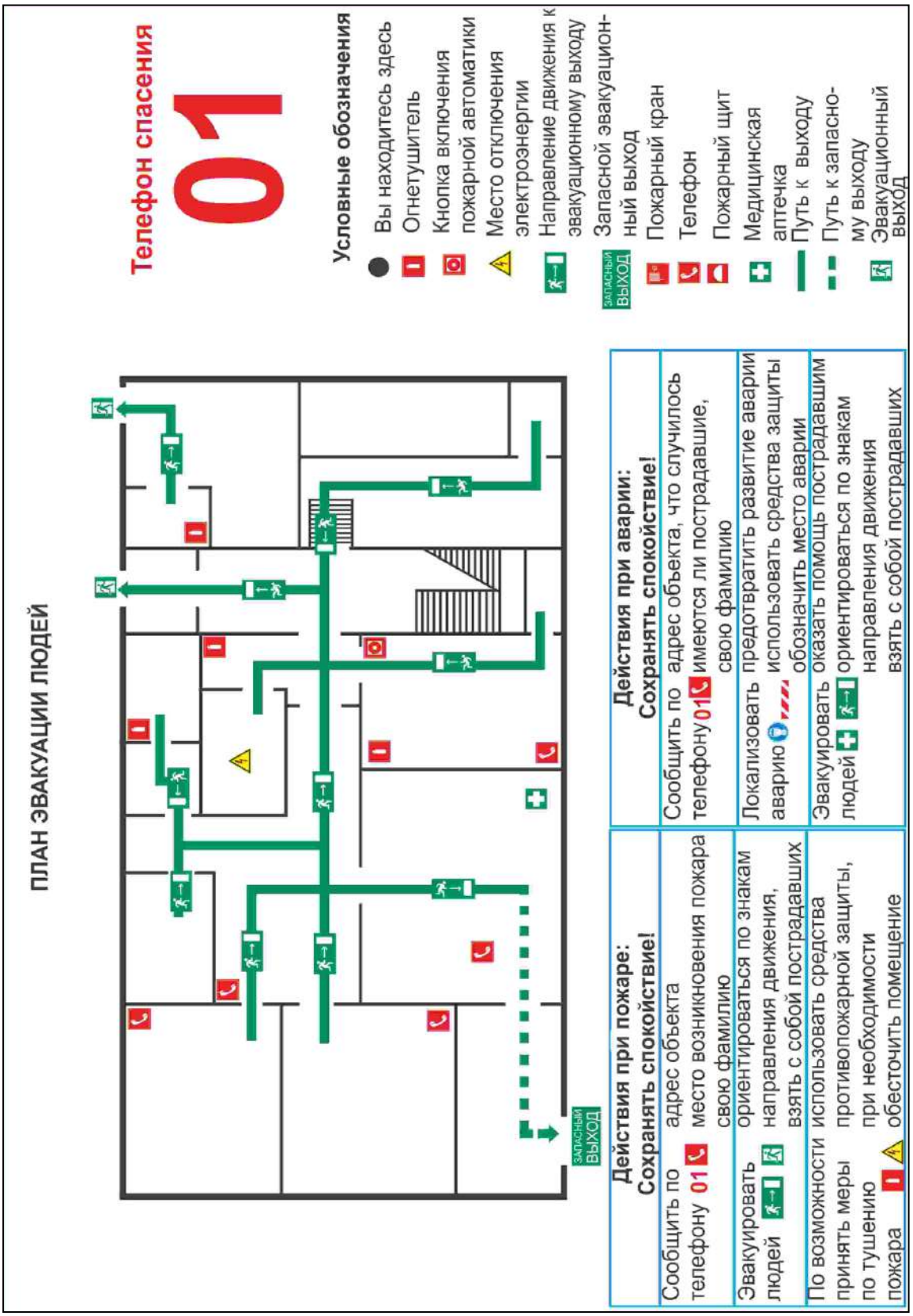
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(справочное)

План помещения и размещения светильников с лампами типа ЛБ-40



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(справочное)

План эвакуации людей