

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы Математическое моделирование процесса десублимации гексафторида урана в горизонтальную емкость

УДК 661.87.048.3:519.87

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Верлинский Максим Вадимович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	Д.Т.Н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Е.И.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объёме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Видяев Д.Г.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Верлинскому Максиму Вадимовичу

Тема работы:

Математическое моделирование процесса десублимации гексафторида урана в горизонтальную емкость	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 32-51/С от 01.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2022 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Задание. Литературные источники по основам процесса десублимации UF ₆ , по математическому моделированию, по программной реализации математических моделей. Математическая модель процесса десублимации UF ₆ в горизонтальную емкость.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор и анализ литературы 2. Описание математической модели десублимации в горизонтальную емкость и ее программной реализации 3. Результаты расчетов, их анализ 4. Экономический расчет 5. Охрана труда и техника безопасности 6. Выводы. Заключение

<p>Перечень графического материала</p>	<p>Графики:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вертикальная погружная емкость 2. Вертикальная емкость, погруженная в хладагент 3. Горизонтальная транспортная емкость 4. Вид секции установки М-2353 5. Камера захлаживания (десублиматор) 6. Геометрическая интерпретация метода Эйлера 7. Геометрическая интерпретация метода Рунге-Кутты 4-го порядка 8. Интерфейс программы 9. Интерфейс программы после окончания расчета 10. Внешний вид автоматически созданного после расчета файла «res.xlsx» 11. Динамика заполнения горизонтальной емкости десублимированным UF₆ 12. Динамика заполнения горизонтальной емкости 48У гексафторидом урана при использовании различных хладагентов
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Клемашева Е.И.
Социальная ответственность	Доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Ю.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2022
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	Д.Т.Н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Верлинский М.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Верлинскому Максиму Вадимовичу

Школа	ИЯТШ	Отделение	Отделение ядерно-топливного цикла
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1.Цели и результат проекта. 2.Организационная структура проекта. 3.Ограничения и допущения проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: - организация работ НИ; - определение структуры работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на НИ: - материальные затраты; - заработная плата; - отчисления во внебюджетные фонды.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1.Определение интегрального финансового показателя разработки; 2.Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3.Определение интегрального показателя эффективности; 4.Оценка абсолютной эффективности НИ.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Матрица SWOT-анализа 4. Иерархическая структура работ 5. Диаграмма Ганта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.22
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Верлинский Максим Вадимович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Верлинскому Максиму Вадимовичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: горизонтальная транспортная емкость. Область применения: атомная промышленность.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020); – ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень шума; – психофизиологические факторы; – опасность поражения электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; – разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– выбор и описание типичной ЧС - пожар; – обоснование мероприятий по предотвращению ЧС; – порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2022
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Верлинский М.В.		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация включает в себя: 132 страниц, 34 таблицы, 17 рисунков, 68 литературных источников.

Ключевые слова: математическое моделирование, десублимация, гексафторид урана, тепло- и массоперенос, хладагент, численные методы.

Объектом исследования является горизонтальная емкость объемом 4 м³ без внутреннего оребрения охлаждаемая водой или раствором CaCl₂.

Цель работы: создание, программная реализация и верификация математической модели процесса десублимации UF₆ в горизонтальной емкости, проведение исследований, направленных на повышение её производительности.

В процессе исследования разработана, программно реализована и верифицирована математическая модель десублимации гексафторида урана в горизонтальной емкости. Показано, что данная модель адекватно описывает процесс десублимации UF₆. С помощью созданной модели проведены исследования зависимости средней производительности емкости от её геометрических размеров, использования хладагентов с разной температурой.

Установлено, что при уменьшении внутреннего диаметра емкости относительно диаметра стандартной емкости 48У до 0.80 м ее средняя производительность увеличивается в 2.1 раза. Показано, что при использовании в качестве хладагента насыщенного раствора CaCl₂ с температурой минус 20°С средняя производительность емкости на 43% выше, чем при использовании в качестве хладагента воды с температурой 3°С.

Показано, что изменение геометрических размеров емкости и температуры хладагента могут привести к существенному увеличению ее средней производительности.

Полученные результаты и разработанная математическая модель могут быть использованы для расчета и оптимизации работы коллектора горизонтальных емкостей для десублимации гексафторида урана в АО «СХК», а также на других разделительных предприятиях РФ.

Оглавление

Введение.....	12
1 Десублимация гексафторида урана на разделительных предприятиях и программная реализация математических моделей данного процесса.....	14
1.1 Особенности работы с гексафторидом урана, его химические и физические свойства.....	14
1.2 Десублимация гексафторида урана на разделительных предприятиях	16
1.2.1 Десублимация гексафторида урана в вертикальные емкости.....	18
1.2.2 Десублимация гексафторида урана в горизонтальные емкости	20
1.2.3 Десублимация гексафторида урана в горизонтальные емкости на установке М-2353.....	21
1.3 Численное решение дифференциальных уравнений при программной реализации математических моделей	26
1.3.1 Одношаговые разностные методы при решении обыкновенных дифференциальных уравнений.....	26
1.3.2 Метод Эйлера	28
1.3.3 Метод Рунге-Кутты	30
1.4 Программная реализация математических моделей	34
1.4.1 Язык программирования – Python.....	35
1.4.2 Библиотека для создания интерфейса программы – Tkinter	36
1.4.3 Создание exe файла с помощью PyInstaller.....	37
2 Создание, программная реализация и верификация математической модели	39
2.1 Математическая модель	39
2.2 Программная реализация математической модели	42
2.3 Верификация математической модели	48
3. Результаты исследований и их анализ	50
3.1 Влияние размеров емкости на ее среднюю производительность	50
3.2 Влияние выбора хладагента и его температуры на среднюю производительность емкости	52
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	54
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	55
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	55
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	56

4.1.3 SWOT-анализ	58
4.2 Планирование управления научно-техническим проектом	61
4.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	61
4.2.2 Контрольные события проекта.....	61
4.2.3 План проекта	62
4.3 Инициация проекта	65
4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	66
4.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	69
4.6 Бюджет научного исследования	70
4.6.1 Расчет материальных затрат	70
4.6.2 Расчет амортизации оборудования	71
4.6.3 Основная заработная плата исполнителей темы	72
4.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	75
4.6.5 Накладные расходы	75
4.6.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	76
4.7 Организационная структура проекта	77
4.8 Матрица ответственности	78
4.9 Реестр рисков проекта	80
4.10 Оценка научно-технического эффекта	81
4.11 Определение ресурсной эффективности проекта.....	84
4.12 Оценка абсолютной эффективности НИ	86
5 Социальная ответственность.....	91
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	91
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	91
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	93
5.2 Производственная безопасность	95
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	95
5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов	97
5.2.3 Отклонение показателей микроклимата.....	97
5.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения.....	98

5.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	99
5.2.6 Превышение уровня шума	103
5.2.7 Психофизиологические факторы	103
5.2.8 Поражение электрическим током	104
5.3 Экологическая безопасность.....	106
5.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	107
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	110
Выводы по разделу	111
Выводы	112
Список используемой литературы	113
Приложение А	120

Введение

Десублимация – это процесс перехода вещества из газообразной фазы в твердую, минуя жидкое состояние [1].

Процесс десублимации нашел широкое применение в различных областях деятельности человечества, он используется в металлургии (например, при производстве титана [2, 3], циркония [2, 4], гафния [2], мышьяка [5-8], молибдена [3], и других металлов), в ряде химических производств (например, при получении малеинового ангидрида, фталевого ангидрида, хлорида алюминия, антрахинона, фталонитрила, йода [1] и т.д.), для получения веществ и/или их разделения. Этот процесс также используется в медицине [9], легкой и пищевой промышленности [10, 11], при разделении парогазовых смесей [12] и т.п.

В ядерно-топливном цикле в качестве рабочего вещества для разделения изотопов ^{235}U и ^{238}U методом центрифугирования применяется газообразный гексафторид урана UF_6 [13]. Процесс десублимации гексафторида урана является важным этапом производства обогащенного урана. На выходе из каскада газовых центрифуг потоки UF_6 , обогащенные и обедненные по изотопу ^{235}U десублимируются в транспортные емкости. На практике наибольшее распространение получили вертикальные погружные транспортные емкости без внутреннего ребрения, с горизонтальным и вертикальным ребрением, а также горизонтальные транспортные емкости без внутреннего ребрения, которые используются, в основном, для импорта/экспорта UF_6 [14, 15].

На разделительных предприятиях ядерно-топливного цикла России (Госкорпорации Росатом) осуществляется модернизация технологического оборудования. Газовые центрифуги на разделительных предприятиях заменяются на новые, более производительные, что, в свою очередь, требует увеличения производительности конденсационно-испарительных установок, предназначенных для сублимации и десублимации UF_6 и являющихся

неотъемлемой частью технологии, используемой на предприятиях по обогащению урана [13].

Повысить производительность конденсационно-испарительных установок можно следующими способами: разработать и спроектировать конденсационно-испарительные установки повышенной производительности; оптимизировать режимы работы используемых установок, обеспечив максимальную скорость десублимации (сублимации) UF_6 и наиболее полное заполнение транспортных емкостей; усовершенствовать конструкции транспортных емкостей.

Указанные задачи нецелесообразно решать экспериментальным путем, так как возможности такого подхода ограничены и требуют проведения дорогостоящих и длительных экспериментов. Перспективным путем решения указанных задач является разработка математических моделей процессов сублимации и десублимации UF_6 .

В связи с этим актуальными становятся создание таких моделей и проведение с их помощью исследований и оптимизации рассматриваемых процессов, а также совершенствование конструкции оборудования.

Данная работа направлена на создание, программную реализацию и верификацию математической модели десублимации гексафторида урана в горизонтальные транспортные емкости, а также на определение возможности повышения производительности горизонтальной емкости при изменении геометрических ее размеров, использовании хладагентов с разной температурой.

1 Десублимация гексафторида урана на разделительных предприятиях и программная реализация математических моделей данного процесса

1.1 Особенности работы с гексафторидом урана, его химические и физические свойства

Гексафторид урана, находящийся в твердом состоянии, представляет собой бесцветное кристаллическое вещество, жидкость – бесцветная, газ – бесцветен. Процесс испарения протекает с поглощением тепла. При $T = 64.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура плавления) и давлении 1134 мм рт. ст. гексафторид урана находится в твердом, жидком и газообразном состоянии (тройная точка). Плотность твердого продукта равна $4.8\dots 5.09\text{ г/см}^3$, плотность жидкого продукта равна 3.63 г/см^3 , плотность газообразного при $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна 2.887 г/см^3 . Давление насыщенных паров гексафторида урана при различных температурах приведено в таблице 1.1.

Гексафторид урана из твердого состояния может сублимироваться, переходя в газообразное состояние, минуя жидкую фазу, при широком диапазоне давлений. Обратный процесс – десублимация гексафторида урана из газообразного состояния в твердое кристаллическое – требует небольшого отвода тепла при соответствующем поддержании температуры и давления. Таким образом, можно десублимировать весь газообразный продукт, переведя его в твердую фазу. Нагреванием при пониженном давлении можно снова перевести твердую фазу в газообразную [1].

Таблица 1.1. Зависимость давления насыщенных паров гексафторида урана от температуры

Температура, °С	Давление, мм рт. ст.	Температура, °С	Давление, мм рт. ст.	Температура, °С	Давление, мм рт. ст.
-70	0.008	-9	6.93	16	58
-60	0.034	-8	7.68	17	62.5
-50	0.12	-7	8.24	18	67.8
-40	0.37	-6	9.3	19	74.6
-30	1.16	-5	10.99	20	80.8
-29	1.23	-4	12.11	21	84.9
-28	1.4	-3	13.2	22	93.8
-27	1.5	-2	14.3	23	102
-26	1.7	-1	15.6	24	111.1
-25	1.92	0	16.9	25	119.5
-24	2.1	1	18.2	26	123.9
-23	2.37	2	20.4	27	128.7
-22	2.62	3	23	28	137.7
-21	2.9	4	24.3	29	146.9
-20	3.11	5	25.53	30	158
-19	3.38	6	28.9	31	167
-18	3.62	7	32.2	32	180
-17	3.85	8	35.8	33	196
-16	4.31	9	37	34	205
-15	4.58	10	38.02	35	216
-14	4.81	11	41.3	36	224
-13	5.5	12	44.9	37	235
-12	5.83	13	48.8	38	258
-11	6.23	14	51.2	39	274
-10	6.62	15	54.4	40	295

Гексафторид урана не взаимодействует с кислородом, азотом, сухим воздухом, но взаимодействует с большинством металлов с образованием порошкообразных фторидов металлов. Покрытая никелем сталь, медь и некоторые алюминиевые сплавы устойчивы к гексафториду урана, но в присутствии фтористого водорода коррозионное воздействие гексафторида урана увеличивается. Масла реагируют с гексафторидом урана, образуя фториды углерода и фториды серы, что приводит к осмолению внутренних полостей насосов. В процессе радиолиза (α -распад) гексафторид урана медленно разлагается на твердый UF_4 , UF_5 и газообразный фтор (процесс разложения наблюдается в емкостях с отвальным гексафторидом урана при хранении их на складе в течение нескольких лет).

Гексафторид урана реагирует с водой по реакции:



На воздухе гексафторид урана, соединяясь с влагой, образует плотный белый дым, состоящий из кристаллов уранилфторида и газообразного фтористого водорода. Уранилфторид (UO_2F_2) представляет собой твердое вещество светло-желтого цвета, растворимое в воде, этиловом спирте, очень ядовитое [1].

1.2 Десублимация гексафторида урана на разделительных предприятиях

Специфика процесса десублимации на разделительных производствах, по сравнению с десублимацией на сублиматных производствах, заключается в том, что газообразный UF_6 на выходе разделительного каскада имеет более низкую температуру ($20...30^\circ C$) и содержит незначительное количество легких примесей, которые содержатся в исходном сырье или поступают в оборудование из атмосферного воздуха по причине его неполной герметичности. Эти примеси в процессе разделения изотопов урана газоцентрифужным методом смещаются в сторону отбора легкой фракции UF_6 и являются существенным источником

потерь разделительной мощности газовых центрифуг. В потоке обедненной по легкому изотопу фракции содержание легких примесей минимально [22, 23]. Несмотря на это емкости коллектора отвала периодически (2 раза за цикл заполнения) прокачиваются в отсосную систему для извлечения из них легких примесей.

Поток обогащенной по ^{235}U фракции на отборном конце каскада перед десублимацией проходит очистку от легких и тяжелых примесей на специальных очистительных каскадах [24]. В результате общее содержание всех примесей в потоке обогащенной по ^{235}U фракции в соответствии с требованиями технических условий не превышает $5 \cdot 10^{-3}\%$ об. [25, 26].

Указанные особенности значительно упрощают реализацию процесса десублимации и позволяют осуществлять перевод UF_6 из газообразного состояния в твердое непосредственно в транспортных емкостях (без применения специальных десублиматоров).

В настоящее время в связи с закрытием газодиффузионных разделительных предприятий в США и Франции произошло перераспределение мировых позиций стран на рынке обогащенного урана. Теперь его основными производителями являются Россия и консорциум URENCO, использующие центробежную технологию обогащения. За ними следуют Япония и Китай. Причем Россия на 100% снабжает обогащенным ураном свой внутренний рынок, а также поставляет значительную долю обогащенного урана на внешний рынок.

В России действует четыре предприятия по разделению изотопов урана газодиффузионным методом. Распределение суммарной разделительной мощности отрасли по этим предприятиям [27] представлено в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Распределение суммарной разделительной мощности предприятий России

Предприятие	Вклад в суммарную мощность, %
АО «Уральский электрохимический комбинат» (АО «УЭХК»), г. Новоуральск	49
АО «ПО «Электрохимический завод» (АО «ПО ЭХЗ»), г. Зеленогорск	29
АО «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК»), г. Северск	14
АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (АО «АЭХК»), г. Ангарск	8

1.2.1 Десублимация гексафторида урана в вертикальные емкости

На двух крупнейших предприятиях АО «УЭХК» и АО «ЭХЗ» для десублимации обогащенного и обедненного UF_6 используются преимущественно вертикальные погружные транспортные емкости [28, 29], которые могут иметь внутреннее вертикальное или горизонтальное ребрение (рисунок 1.1). Вертикальные ребрение применяется в емкостях отбора тяжелой фракции, горизонтальные ребра – в некоторых емкостях отбора легкой фракции.

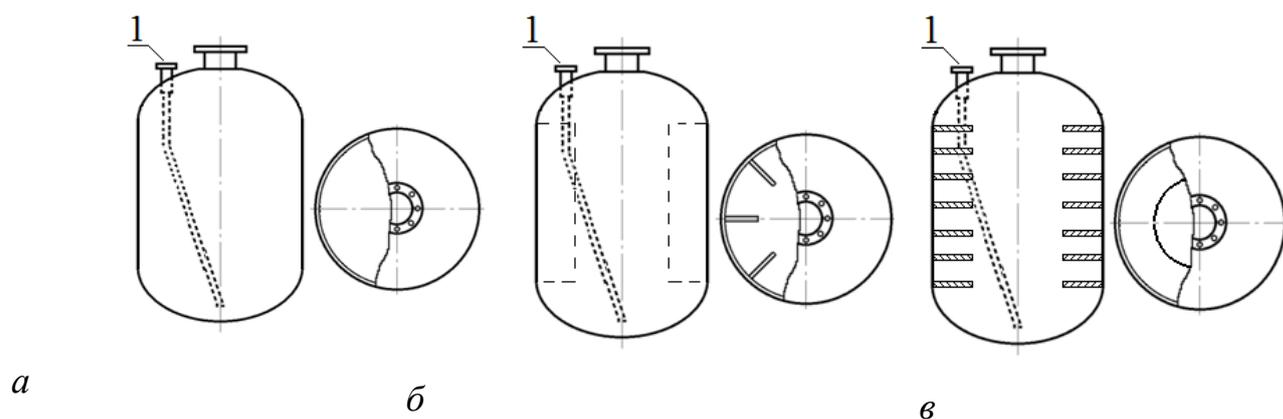


Рисунок 1.1. Вертикальная погружная емкость:

а – гладкие внутренние стенки; б – вертикальное оребрение;
в – горизонтальное оребрение (1 – отсосный патрубок)

Вертикальные погружные транспортные емкости (рисунок 1.2) (1) помещаются в термостат (2), закрепляются в нем, предотвращая самопроизвольное всплытие, после чего термостат заполняется насыщенным раствором CaCl_2 (потоки I, II), который захлаживается жидким азотом (3) до минус 20°C . Затем в транспортные емкости подается газообразный UF_6 (поток А) и в результате процессов тепло- массопереноса происходит его десублимация.

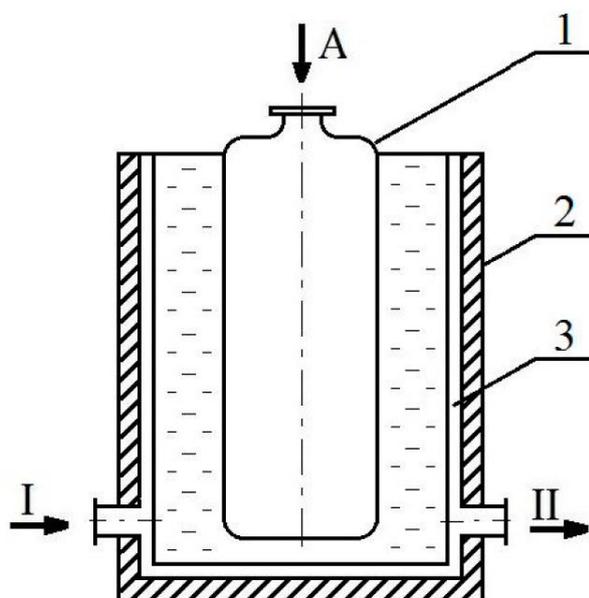


Рисунок 1.2. Вертикальная емкость, погруженная в хладагент

Достоинством десублимации в вертикальные погружные емкости является удобство и экономичность его эксплуатации [29-34]. Недостатком – резкое уменьшение производительности по мере заполнения емкости, вследствие относительно низкого коэффициента теплоотдачи от стенок емкости к хладагенту и низкой теплопроводности слоя десублимированного UF_6 . В связи с этим для обеспечения необходимой производительности участков десублимации, приходится использовать несколько емкостей, соединенных в коллектор и работающих параллельно.

1.2.2 Десублимация гексафторида урана в горизонтальные емкости

В АО «АЭХК» десублимация UF_6 также осуществляется в горизонтальные емкости [14] (рисунок 1.3). Газообразный UF_6 подается в емкость через патрубок 2. Охлаждение емкостей происходит орошением их внешней поверхности хладагентом. В качестве хладагента может использоваться вода (температура $3^{\circ}C$) или насыщенный водный раствор $CaCl_2$ (температура минус $20^{\circ}C$). Хладагент (поток I) в виде тонкой пленки подается из оросительного устройства 1, стекает по боковым стенкам емкости, при этом частично испаряясь. В результате испарения коэффициент теплоотдачи стенки емкости несколько выше, чем у погружных емкостей [23]. Под емкостью устанавливается поддон (3) для сбора стекающего хладагента (поток II).

Недостатком этого способа охлаждения является неравномерное смачивание наружной поверхности боковых стенок емкостей, при стекании по ним хладагента, а также то, что торцевые поверхности емкостей практически не участвуют в процессе теплообмена [30, 31, 33–36].

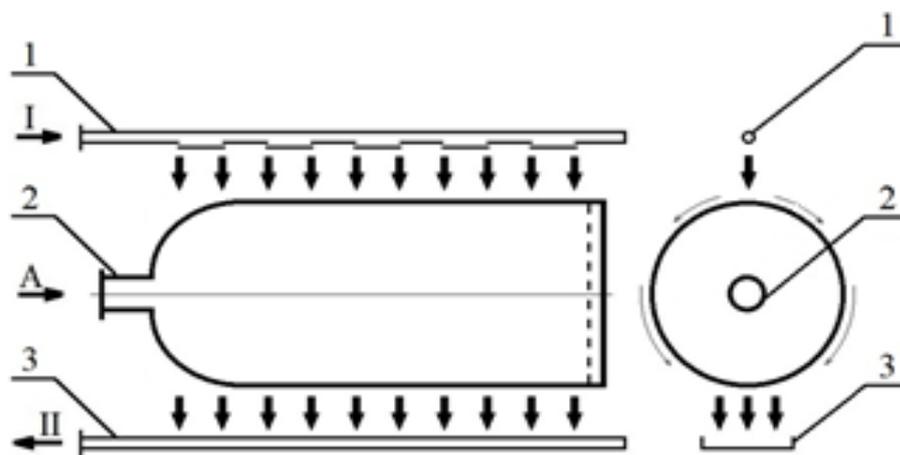


Рисунок 1.3. Горизонтальная транспортная емкость

Использование метода десублимации UF_6 в горизонтальных емкостях представляет интерес в связи с увеличением количества горизонтальных емкостей зарубежного производства.

1.2.3 Десублимация гексафторида урана в горизонтальные емкости на установке М-2353

В АО «СХК» десублимация газообразного потока обогащенной фракции также осуществляется непосредственно в вертикальные погружные емкости, а обедненная по ^{235}U фракция десублимируется с использованием аппаратов комбинированного типа с тепловым сбросом и горизонтальные транспортные емкости. На данном предприятии также используется установка М-2353, предназначенная для десублимации гексафторида урана в горизонтальные транспортные емкости типа «48», сублимируемого из вертикальных емкостей объемом 2.5 м^3 .

Установка М-2353 предназначена для заполнения контейнеров типа «48» (48У, 48G, 48Н, 48F) гексафторидом урана с содержанием по ^{235}U до 1% путем его десублимации для последующего длительного хранения на складах Отдела хранения транспортировки и контроля. Проектная производительность установки – 150 контейнеров в год.

Внешний вид секции установки М-2353 представлен на рисунке 1.4.

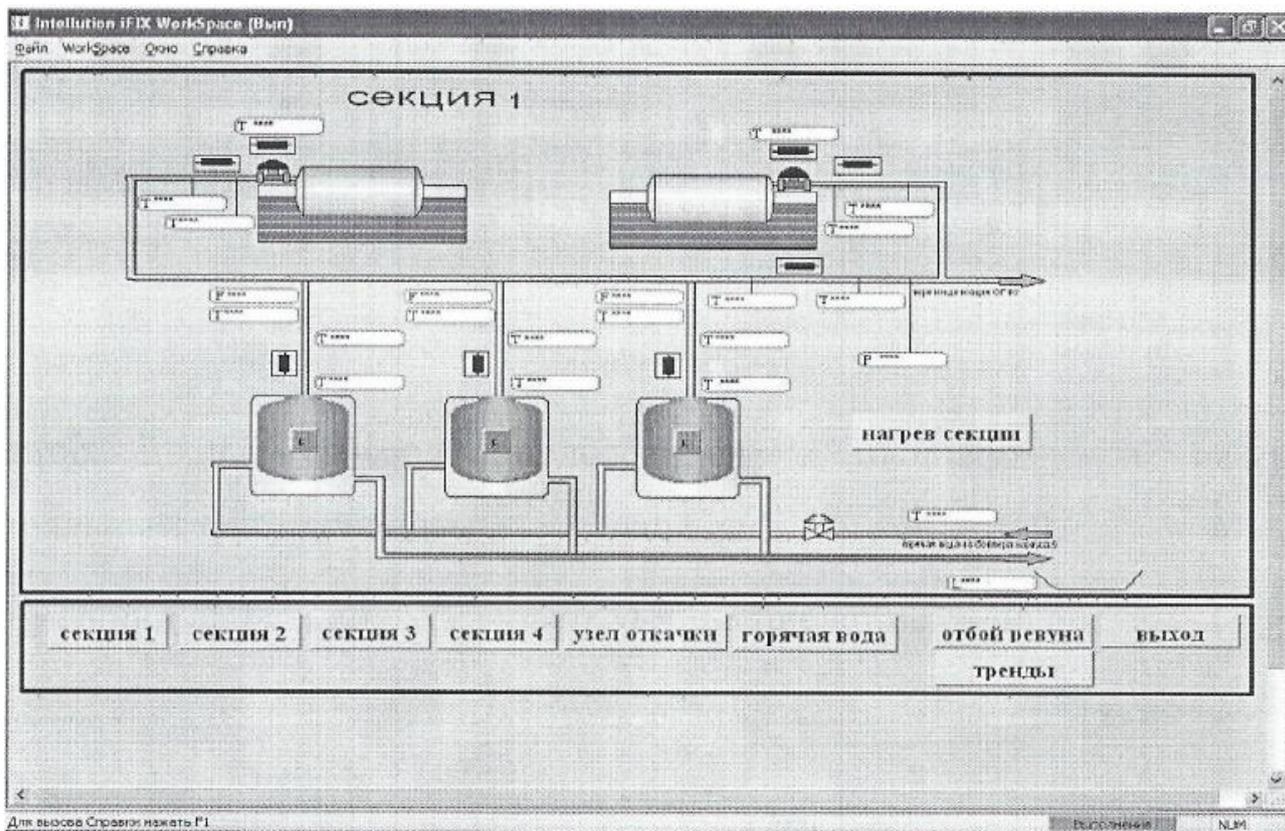


Рисунок 1.4. Вид секции установки М-2353

Установка М-2353 включает в себя:

- 1) 12 вертикальных сублиматоров под емкости объемом 2.5 м^3 ;
- 2) 8 горизонтальных камер захлаживания контейнеров;
- 3) схему подачи гексафторида урана из емкостей объемом 2.5 м^3 в контейнеры;
- 4) отсосную систему К-09;
- 5) промывочную (эжекторную) систему К-22;
- 6) систему подачи горячей воды к сублиматорам;
- 7) систему подачи хладагента;
- 8) систему местных вентиляционных отсосов;
- 9) систему технологического контроля, автоматики и защиты;
- 10) трубопроводы речной воды;
- 11) систему контроля радиационной безопасности.

Для удобства эксплуатации оборудование установки сгруппировано в 4 секции. Каждая секция включает 3 сублиматора (Б₁, Б₂, Б₃) с узлом регулирования расхода горячей воды, 2 камеры захлаживания (48₁, 48₂) и коллектор переконденсации (линия 06). Коллекторы откачки (К-09), промывки (К-22), горячей воды (линии 03 и 30), хладагента (линии 02 и 20), речной воды (линии 04 и 40) и нулевая приборная линия – являются общими для всех секций установки. Все коллекторы выполнены в однотрубном исполнении (без резервирования). Коллектор подачи хладагента подсоединен к основному и резервному магистральным трубопроводам системы хладагента корпуса 9.

Десублимация гексафторида урана на установке М-2353 происходит в камере захлаживания (десублиматор). Камера предназначена для захлаживания контейнеров раствором хлористого кальция (хладагент) путем погружения контейнера в рассол на 2/3 высоты и орошения верхней части контейнера рассолом с целью повышения равномерности отвода тепла при десублимации гексафторида урана. Основными узлами камеры являются ванна, в которую помещается пустой контейнер, и рассеиватель, предназначенный для орошения верхней части контейнера.

Ванна корытообразной формы изготовлена из состыкованных между собой 4-х верхних корпусов машины ОК-30М (разрезанных по образующей цилиндра) и торцевых стенок. Размеры ванны по внутренним стенкам: длина ванны 4560 мм; высота ванны 1030 мм; радиус цилиндрической части 770 мм.

В нижней части ванны выполнены 3 опоры для контейнера. Для фиксации контейнера от всплывания в хладагенте используются упоры с фиксирующими цепями. Корпус ванны теплоизолирован.

Ванна имеет следующие патрубки: для подачи рассола – диаметром 50 мм; для перелива хладагента – диаметром 100 мм; для опорожнения ванны от хладагента и воды (после промывки контейнера) – диаметром 50 мм.

На установку заполнения контейнеры типа «48» поступают после проведения пневмо- и вакуумных испытаний, откачанные до давления 1-2 мм рт. ст. и прошедшие тарирование.

Рассеиватель предназначен для подачи хладагента (для орошения верхней части контейнера в период десублимации гексафторида урана) и воды (для обмыва контейнера от рассола после окончания его заполнения) и выполнен из двух нержавеющей труб диаметром 25 мм с равномерно размещенными отверстиями диаметром 2 мм, через которые осуществляется душирование хладагента или воды. Трубы с отверстиями проложены над контейнером вдоль его продольной оси и подсоединены к трубопроводам подачи хладагента и воды через поворотное уплотнение. На период загрузки и выгрузки контейнера трубы отворачиваются в сторону, а в период душирования устанавливаются в положение, обеспечивающее равномерное орошение поверхности контейнера жидкостью. Внешний вид камеры захлаживания приведен на рисунке 1.5.

Схема включает в себя четыре секции переконденсации, разделенные рассекающими клапанами № ИК1, ИК2 на секционные коллекторы. Каждая секция включает в себя:

– три точки испарения с отводами для подсоединения емкости объемом 2.5 м³, соединенные с:

- 1) линией переконденсации ГФУ (через клапаны И1, И2, И3)
- 2) линией откачки (через клапан N- О1);
- 3) линией промывки (через клапан № П1);

– две точки конденсации с обогреваемыми отводами для подсоединения контейнера типа «48», соединенные с:

- 1) линией переконденсации ГФУ (через клапаны К1, К2, К3);
- 2) линией откачки (через клапан 3° ОК1);
- 3) линией промывки (через клапан № ПК1).

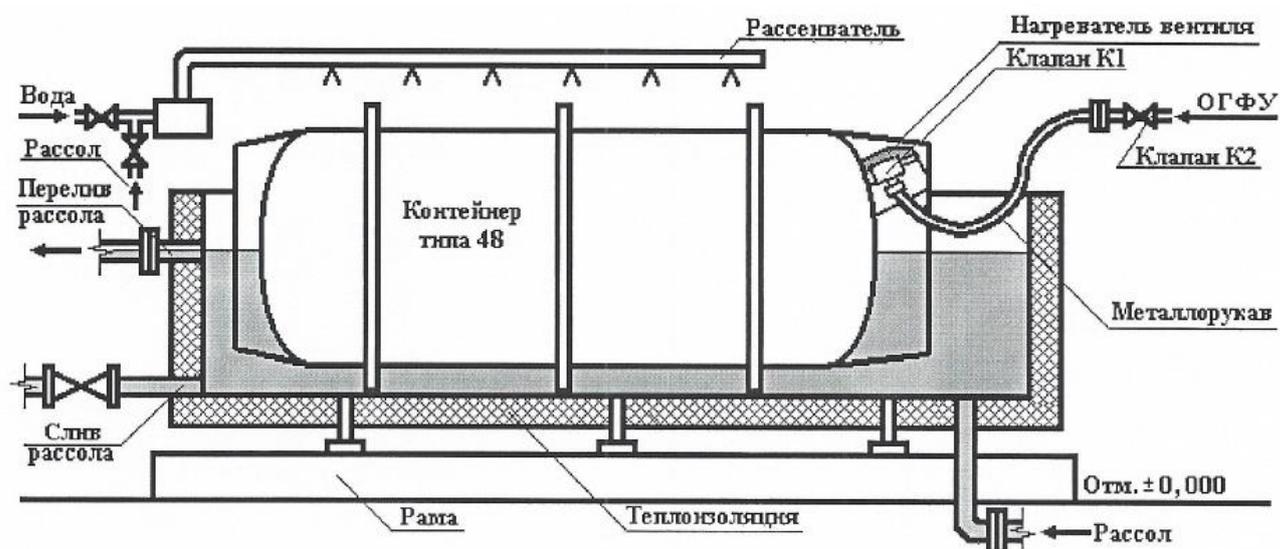


Рисунок 1.5. Камера захлаживания (десублиматор)

Трубопроводы выполнены из стальных бесшовных труб. Металлорукав предназначен для обеспечения гибкости узла подсоединения емкости объемом 2.5 м³ и контейнера и представляет собой гибкий гофрированный трубопровод из нержавеющей стали толщиной 0.2 мм. На гибкую оболочку металлорукава одета защитная металлическая оплетка. На концах металлорукава имеются наконечники, к которым приварены соответствующие штуцеры. Для исключения десублимации гексафторида урана в процессе работы внутри металлорукава, на него сверху равномерно намотан обогреватель (мощность 35 Вт, напряжение питания 42 В). В установившемся режиме (через 1 час после включения нагревателя) температура внешней поверхности металлорукава составляет 50-80С°.

Съемный нагреватель вентиля контейнера снабжен термометром, задействованным в схеме регулирования температуры. Номинальная мощность нагревателя составляет 180 Вт.

Для исключения десублимации гексафторида урана в процессе работы коллектор переконденсации выполнен из обогреваемого трубопровода и укомплектован рассеченными межсекционными клапанами dy100 № ИК1, ИК2, ИК3, которые в нормальном режиме работы установки закрыты и опломбированы.

1.3 Численное решение дифференциальных уравнений при программной реализации математических моделей

1.3.1 Одношаговые разностные методы при решении обыкновенных дифференциальных уравнений

Обыкновенными дифференциальными уравнениями описываются различные физические процессы. Зачастую такие уравнения в явном виде не интегрируются. В связи с этим, необходимо использовать методы, позволяющие получать приближённое решение задачи. Различные прикладные задачи могут приводить к дифференциальным уравнениям или системе дифференциальных уравнений любого порядка. Но известно, что обыкновенное дифференциальное уравнение p -го порядка:

$$u^{(p)}(x) = f(x, u, u', u'', \dots, u^{(p-1)}), \quad (1.1)$$

при помощи замены $u^{(k)} = u_k(x)$ (при этом $u_0 = u(x)$) можно свести к эквивалентной системе p уравнений первого порядка [37]:

$$\begin{aligned} u'_k(x) &= u_{k+1}(x), \quad 0 \leq k \leq p-2, \\ u'_{p-1}(x) &= f(x, u_0, u_1, \dots, u_{p-1}). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Аналогично произвольную систему дифференциальных уравнений любого порядка можно заменить некоторой эквивалентной системой уравнений первого порядка. Поэтому далее будут рассматриваться системы уравнений первого порядка:

$$\frac{du_k}{dx} = f_k(x, u_0, u_1, \dots, u_p), \quad 1 \leq k \leq p, \quad (1.3)$$

или в векторной форме.

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{u}}{dx} &= \vec{f}(x, \vec{u}(x)), \\ \vec{u} &= \{u_1, u_2, \dots, u_p\}, \quad \vec{f} = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Известно, что система p -го порядка имеет множество решений, которое в общем случае зависит от p параметров $c = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ и может быть записана

в форме $u = u(x; c)$. Для определения значений этих параметров, т.е. для выделения единственного решения, надо наложить p дополнительных условий на функции $u_k(x)$.

Различают три типа задач для обыкновенных дифференциальных уравнений: задачи Коши, краевые задачи и задачи на собственные значения. Задача Коши предполагает дополнительные условия в виде значения функции в определённой точке. Краевая задача подразумевает поиск решения на заданном отрезке с краевыми (граничными) условиями в концах интервала или на границе области. Задача на собственные значения — помимо искомым функций и их производных, в уравнение входят дополнительное несколько неизвестных параметров, которые являются собственными значениями. Для реализации нашей математической модели необходимо решение задачи Коши [37].

Задача Коши представляет собой уравнение (1.4) с начальными условиями вида:

$$u_k(\xi) = \eta_k, \quad 0 \leq k \leq p, \quad (1.5)$$

т.е. заданы значения всех функций в одной точке $x = \xi$. Эти условия можно рассматривать как задание координат начальной точки $(\xi, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p)$ интегральной кривой в $(p + 1)$ -мерном пространстве $\{x, u_1, u_2, \dots, u_p\}$. При этом решение необходимо найти на отрезке $\xi \leq x \leq X$, так что точку $x = \xi$ можно считать начальной точкой этого отрезка [37].

В дальнейшем ограничимся решением задачи Коши, записанной в виде:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y(x)), \quad a \leq x \leq b, \quad (1.6)$$

с одной неизвестной функцией y и начальным условием $y(a) = \hat{y}$.

Первый шаг численного решения состоит в разбиении отрезка $[a, b]$ на конечное число частей путем введения узловых точек $a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b$. Если обозначить через h расстояние между узлами (шаг сетки), то $h = \frac{a-b}{N}$ и $x_k = a + kh$, ($k = 0, 1, \dots, N$), где N – целое число отрезков разбиения. В дальнейшем будем обозначать через $y(x_k)$ значение

точного решения уравнения (1.6) в точке x_k , а через y_k – соответствующее приближенное значение [37-40].

1.3.2 Метод Эйлера

Простейшей численной схемой является метод Эйлера, который определяется формулами:

$$y_{k+1} = y_k + hf(x_k, y_k), \quad y_0 = \hat{y}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (1.7)$$

Решение уравнение (1.7) получается в результате разложении функции $y(x)$ (интегральной кривой уравнения (1.6)) в ряд Тейлора в окрестности точки x_k :

$$y(x_{k+1}) = y(x_k) + hy'(x_k) + \frac{h^2}{2}y''(z_k), \quad (1.8)$$
$$y(x_{k+1}) = y(x_k) + hf(x_k, y(x_k)) + \frac{h^2}{2}y''(z_k),$$

где z_k лежит внутри отрезка $[x_k, x_{k+1}]$.

Будем считать, что все указанные производные существуют. Если ограничиться первыми двумя членами разложения, то можно записать:

$$y_{k+1} \approx y_k + hf(x_k, y_k). \quad (1.9)$$

Геометрический смысл метода Эйлера заключается в аппроксимации искомого решения (интегральной кривой $y(x)$) на отрезке $[x_k, x_{k+1}]$ отрезком касательной, проведённой к графику решения в точке x_k . На рисунке 1.6 приведено графическое представление метода Эйлера. Сплошными линиями изображено поле интегральных кривых, отвечающих уравнению (1.7). Стартуя из некоторой начальной точки x_k , проводим касательную к интегральной кривой, проходящей через данную точку. Тогда следующей точкой численного решения станет точка y_{k+1} , которая получается при пересечении соответствующей касательной с интегральной кривой в точке x_{k+1} , и т.д. Таким образом численным решением исходного уравнения будет ломанная линия, проведённая по касательным [37-40].

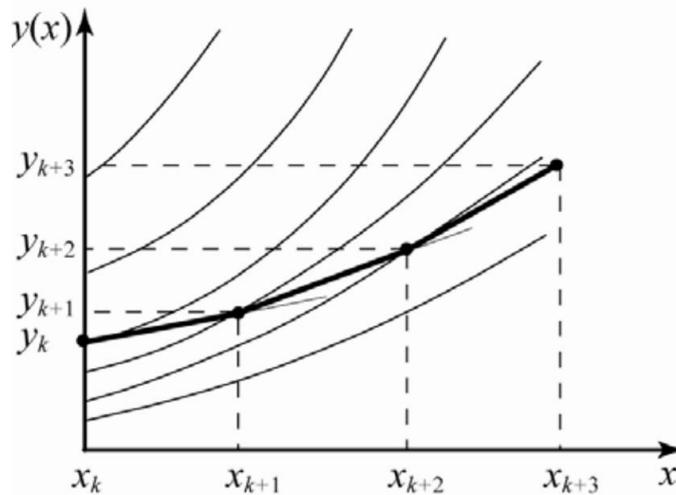


Рисунок 1.6. Геометрическая интерпретация метода Эйлера

Метод Эйлера прост для численной реализации: на шаге k вычисляется значение $f(x_k, y_k)$, которое затем подставляют в уравнение (1.7). Недостатком метода является высокая погрешность вычислений, основным источником которой выступает ошибка дискретизации, возникающая в результате замены дифференциального уравнения (1.6) разностной аппроксимацией (1.7). Можно показать, что глобальная ошибка дискретизации есть $O(h)$. Это означает, что при уменьшении шага h приближённое решение будет всё более точным, и при стремлении h к нулю будет сходиться к точному решению с линейной скоростью по h . Этот факт выражают утверждением, что метод Эйлера имеет первый порядок. Столь медленная сходимость при уменьшении шага h характерна для всех методов первого порядка [37-40].

1.3.3 Метод Рунге-Кутты

Идея метода, предложенного немецкими математиками К. Рунге и М.В. Куттой [40], основана на вычислении приближённого решения y_{i+1} в узле $y_{i+1} = x_i + h$ в виде линейной комбинации с постоянными коэффициентами:

$$y_{i+1} = y_i + p_{q1}k_1(h) + p_{q2}k_2(h) + \dots + p_{qq}k_q(h), \quad (1.10)$$

где

$$\begin{aligned} k_1(h) &= hf(x_i, y_i), \\ k_2(h) &= hf(x_i + \alpha_2 h, y_i + \beta_{21}k_1(h)), \\ &\dots \\ k_q(h) &= hf(x_i + \alpha_q h, y_i + \beta_{q1}k_1(h) + \dots + \beta_{q,q-1}k_{q-1}(h)). \end{aligned} \quad (1.11)$$

При этом коэффициенты α_i , β_{ii} и p_{qi} выбирают так, чтобы разложение выражения (1.10) по степеням h совпадало до максимально возможной степени при произвольной правой части $f(x, y)$ и произвольном шаге h с разложением в ряд Тейлора искомого решения:

$$\begin{aligned} y(x_{i+1}) &= y(x_i) + hy'(x_i) + \frac{h^2}{2}y''(x_i) + \dots + \frac{h^s}{s!}y^{(s)}(x_i) + \\ &+ \frac{h^{s+1}}{(s+1)!}y^{(s+1)}(x_i) + \dots. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Это эквивалентно введению вспомогательной функции:

$$\varphi_q(h) = y(x_{i+1}) - y_{i+1} = y(x_i + h) - y_i - \sum_{i=1}^q p_{qi}k_i(h). \quad (1.13)$$

Её разложение должно начинаться с максимально возможной степени:

$$\varphi_q(h) = \frac{h^{s+1}}{(s+1)!}\varphi_q^{(s+1)}(0) + O(h^{s+1}). \quad (1.14)$$

Если определить эти постоянные таким образом, что разложение $\varphi_q(h)$ будет иметь вид (1.14), то говорят, что формула (1.10) с выбранными коэффициентами имеет порядок точности s . При этом величина $p_1 = \varphi_q(h) = y(x_i) - y_i$ называется локальной погрешностью метода на шаге, а первое

слагаемое в уравнении (1.14) называется главным членом локальной погрешности метода.

Можно показать, что формула 1-го порядка малости в данном случае будет совпадать с формулой Эйлера, который также называется методом Рунге-Кутты первого порядка.

Рассмотрим более подробно вывод двухчленной формулы метода Рунге-Кутты 2-го порядка. Приближённое решение в точке x_{i+1} в этом случае находят в виде:

$$y_{i+1} = y_i + p_{21}k_1(h) + p_{22}k_2(h), \quad (1.15)$$

где

$$\begin{aligned} k_1(h) &= hf(x_i, y_i), \\ k_2(h) &= hf(x_i + \alpha_2 h, y_i + \beta_{21}k_1(h)). \end{aligned} \quad (1.16)$$

Для вычисления неизвестных α_2 , β_{21} , p_{21} и p_{22} введём вспомогательную функцию:

$$\varphi_2(h) = y(x_i + h) - y_i - p_{21}k_1(h) - p_{22}k_2(h). \quad (1.17)$$

Разложим функцию (1.17) в ряд Тейлора по степеням h :

$$\begin{aligned} \varphi_2'(h) &= y'(x_i + h) - p_{21}f(x_i, y_i) - \\ &- p_{22}f(x_i + \alpha_2 h, y_i + \beta_{21}hf(x_i, y_i)) - \\ &- p_{22}\alpha_2 hf(x_i + \alpha_2 h, y_i + \beta_{21}hf(x_i, y_i)) - \\ &- p_{22}h\beta_{21}f_y'f(x_i + \alpha_2 h, y_i + \beta_{21}hf(x_i, y_i)), \\ \varphi_2''(h) &= y'' - 2p_{22}\alpha_2 f' - 2p_{22}\beta_{21}f_y'f - p_{22}h[\dots], \\ &\dots \end{aligned} \quad (1.18)$$

При подсчёте производных используем следующие формулы:

$$\begin{aligned} y' &= f, \\ y'' &= f' + f_y'f. \end{aligned} \quad (1.19)$$

При использовании метода Рунге-Кутты второго порядка необходимо, выполнение условия $\varphi_2(0) = \varphi_2'(0) = \varphi_2''(0) = 0$. Это условие выполняется, когда:

$$1 - p_{21} - p_{22} = 0, \quad (1.20)$$

$$1 - 2\alpha_2 p_{22} = 0,$$

$$1 - 2\beta_{21} p_{22} = 0.$$

Решая систему уравнений (1.20), получим:

$$\begin{aligned}\beta_{21} &= \alpha_2, \\ p_{22} &= \frac{1}{2\alpha_2}, \\ p_{21} &= 1 - \frac{1}{2\alpha_2}.\end{aligned}\tag{1.21}$$

В трёх уравнениях имеем четыре неизвестных параметра. Задавая один из них, получим различные модификации численной схемы Рунге-Кутты 2-го порядка. В данном случае следует выбирать такие значения коэффициентов, которые дают удобные для вычисления формулы. Общепринятыми стали схемы со следующими наборами параметров:

$$\begin{aligned}\beta_{21} = \alpha_2 &= \frac{1}{2}, \\ p_{22} &= 1, \\ p_{21} &= 0,\end{aligned}\tag{1.22}$$

и

$$\begin{aligned}\beta_{21} = \alpha_2 &= 1, \\ p_{22} &= \frac{1}{2}, \\ p_{21} &= \frac{1}{2}.\end{aligned}\tag{1.23}$$

В общем случае для коэффициентов численной схемы должно выполняться следующее условие:

$$\sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} = \alpha_i,\tag{1.24}$$

где $i = 2, 3, \dots, s$, а s – порядок метода Рунге-Кутты.

Метод Рунге-Кутты 3-го порядка, как правило, не используется, поэтому рассмотрим метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Проведем аналогичные выкладки

и покажем, что существует целое семейство численных схем 4-го порядка [37-40].

Классическим вариантом записи метода Рунге-Кутты 4-го порядка стала следующего схема:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= hf(x_i, y_i), \\
 k_2 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right), \\
 k_3 &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right), \\
 k_4 &= hf(x_i + h, y_i + k_3), \\
 y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4).
 \end{aligned}
 \tag{1.25}$$

Погрешность данной формулы определяется следующим образом:

$$p_1 = \frac{h^5}{120} \varphi_4^{(5)}(0) + O(h^5),
 \tag{1.26}$$

где φ_4 – соответствующая вспомогательная функция.

На рисунке 1.7 представлена геометрическая интерпретация классического метода Рунге-Кутты.

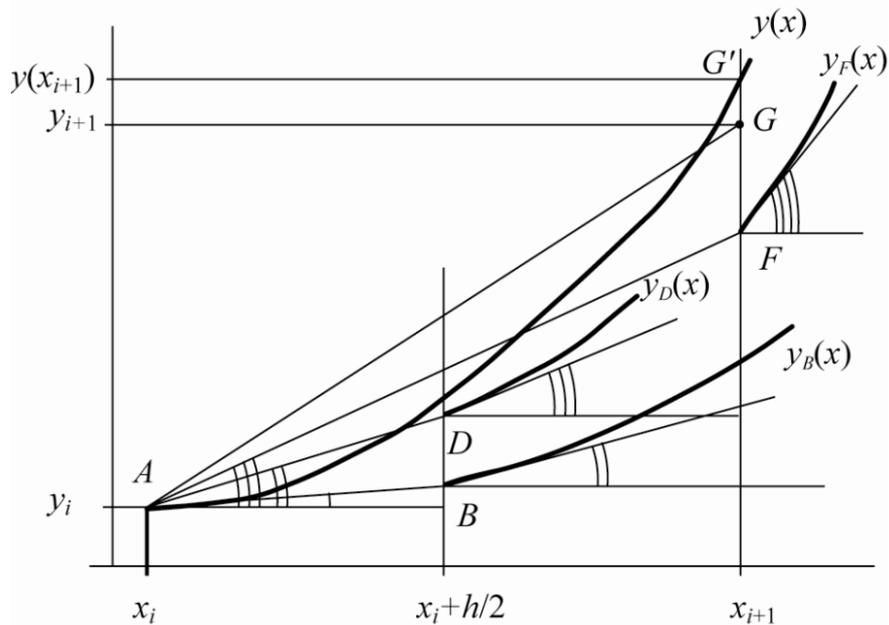


Рисунок 1.7. Геометрическая интерпретация метода Рунге-Кутты 4-го порядка

Ломаная линия на рисунке 1.7 является результатом численного решения. Наклон отрезка AG определяется взвешенным средним значением угловых коэффициентов касательных в точках A, B, D и F проведённых к интегральным кривым, проходящим через эти точки.

AG представляет собой отрезок ломанной численного решения на одном шаге численного интегрирования. При этом точка G – точка, полученная при численном решении на шаге $i + 1$, а G' – точное значение функции $y(x)$ в точке x_{i+1} . Решение y_{i+1} получают следующим образом. В точке A проводят касательную к интегральной кривой $y(x)$ (вычисляют функцию k_1), пересечение которой с прямой $x_i + \frac{h}{2}$ даёт точку B. Далее в точке B строят касательную к интегральной кривой $y_B(x)$ проходящей через неё. В численном решении этому соответствует вычисление функции k_2 . Тогда прямая с угловым коэффициентом, определяемым через k_2 , проведённая из точки A, даёт вторую промежуточную точку D. Далее процедуру повторяют (вычисляются функции k_3 и k_4). Результирующее значение y_{i+1} (точка G) определяют как взвешенное среднее угловых коэффициентов в четырёх точках A, B, D и F (см. (1.25)) [37-40].

Результаты анализа литературы показали, что наиболее точным из рассмотренных численных методов является классический метод Рунге-Кутты 4-го порядка, поэтому в дальнейшем при программной реализации нами будет использоваться данный метод.

1.4 Программная реализация математических моделей

Для проведения исследований с использованием математических моделей необходимо программно их реализовать на одном из языков программирования. При этом предпочтительно создание программы с удобным пользовательским интерфейсом. Python является простым в освоении полноценным языком программирования, для которого имеется большое число библиотек пригодных для решения разнообразных задач [41]. В дальнейшем для создания модели десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости

нами выбран язык программирования Python и его библиотеки Tkinter и PyInstaller. Их описание приведено ниже.

1.4.1 Язык программирования – Python

Python – высокоуровневый язык программирования общего назначения с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью, ориентированный на повышение производительности разработчика, читаемости кода и его качества, а также на обеспечение переносимости написанных на нём программ. Язык является объектно-ориентированным. Особенностью языка является выделение блоков кода пробельными отступами. Синтаксис ядра языка минималистичен, за счёт чего на практике редко возникает необходимость обращаться к документации. Сам же язык известен как интерпретируемый и используется в том числе для написания скриптов. Недостатками языка являются зачастую более низкая скорость работы и более высокое потребление памяти написанных на нём программ по сравнению с аналогичным кодом, написанным на компилируемых языках, таких как C или C++ [41-43].

Python является мультипарадигмальным языком программирования, поддерживающим императивное, процедурное, структурное, объектно-ориентированное программирование, метапрограммирование и функциональное программирование. Задачи обобщённого программирования решаются за счёт динамической типизации. Аспектно-ориентированное программирование частично поддерживается через декораторы, более полноценная поддержка обеспечивается дополнительными фреймворками. Такие методики как контрактное и логическое программирование можно реализовать с помощью библиотек или расширений. Основные архитектурные черты – динамическая типизация, автоматическое управление памятью, полная интроспекция, механизм обработки исключений, поддержка многопоточных вычислений с глобальной блокировкой интерпретатора, высокоуровневые структуры данных.

Поддерживается разбиение программ на модули, которые, в свою очередь, могут объединяться в пакеты.

Python стал одним из самых популярных языков, он используется в анализе данных, машинном обучении, DevOps и веб-разработке, а также в других сферах, включая разработку игр. За счёт читабельности, простого синтаксиса и отсутствия необходимости в компиляции язык хорошо подходит для обучения программированию, позволяя концентрироваться на изучении алгоритмов, концептов и парадигм. Отладка же и экспериментирование в значительной степени облегчаются тем фактом, что язык является интерпретируемым. Применяется язык многими крупными компаниями, такими как Google или Facebook. По состоянию на октябрь 2021 года Python занимает первое место в рейтинге TIOBE популярности языков программирования с показателем 11.27%. «Языком года» по версии TIOBE Python объявлялся в 2007, 2010, 2018 и 2020 годах [41-43].

1.4.2 Библиотека для создания интерфейса программы – Tkinter

Tkinter – кросс-платформенная событийно-ориентированная графическая библиотека на основе средств Tk (широко распространённая в мире GNU/Linux и других UNIX-подобных систем, портирована также и на Microsoft Windows), написанная Стином Лумхольтом (Steen Lumholt) и Гвидо ван Россумом [41]. Входит в стандартную библиотеку Python.

Tkinter – это свободное программное обеспечение, распространяемое под Python-лицензией.

В Python есть довольно много GUI фреймворков (graphical user interface), однако только Tkinter встроен в стандартную библиотеку языка. У Tkinter есть несколько преимуществ: кроссплатформенность (один и тот же код можно использовать на Windows, macOS и Linux [43-45]), визуальные элементы отображаются через собственные элементы текущей операционной системы

(приложения, созданные с помощью Tkinter, выглядят так, как будто они принадлежат той платформе, на которой они работают).

Хотя Tkinter является популярным GUI фреймворком на Python, у него есть свои недостатки. Одним из недостатков Tkinter является то, что графические интерфейсы выглядят устаревшими. Для создания современного интерфейса можно использовать библиотеку PyQt.

Тем не менее, в плане использования, Tkinter является относительно легким по сравнению с другими библиотеками. Это отличный выбор для создания GUI приложений в Python, особенно если современный облик не в приоритете для программы, а большую роль играет функциональность и кроссплатформенная скорость [43-45].

1.4.3 Создание exe файла с помощью PyInstaller

При создании расчетного программного обеспечения, необходимо предусмотреть возможность его запуска без установленного в системе интерпретатора Python. Для работы ПО на компьютерах с системами MS Windows отличным вариантом является создание exe файла.

PyInstaller собирает в один пакет Python-приложение и все необходимые ему библиотеки следующим образом:

1. Считывает файл скрипта.
2. Анализирует код для выявления всех зависимостей, необходимых для работы.
3. Создает файл `spec`, который содержит название скрипта, библиотеки-зависимости, любые файлы, включая те параметры, которые были переданы в команду PyInstaller.
4. Собирает копии всех библиотек и файлов вместе с активным интерпретатором Python.
5. Создает папку `BUILD` в папке со скриптом и записывает логи вместе с рабочими файлами в `BUILD`.

6. Создает папку DIST в папке со скриптом, если она еще не существует.

7. Записывает все необходимые файлы вместе со скриптом или в одну папку, или в один исполняемый файл.

Если использовать параметр команды «onedir» или «-D» при генерации исполняемого файла, тогда все будет помещено в одну папку. Это поведение по умолчанию. Если же использовать параметр «onefile» или «-F», то все окажется в одном исполняемом файле, что в нашем случае является удобным вариантом [43].

2 Создание, программная реализация и верификация математической модели

2.1 Математическая модель

Объектом исследования являлась горизонтальная транспортная емкость объемом 4 м³, охлаждаемая водой до температуры 3°C (рисунок 1.3) или насыщенным раствором CaCl₂ до температуры минус 20°C (рисунок 1.5).

В основу модели приняты следующие допущения:

1. Процесс десублимации UF₆ происходит на цилиндрической, охлаждаемой хладагентом поверхности емкости.

2. Десублимированный UF₆ в каждый момент времени представляет собой цилиндр с осевой симметрией, которая обусловлена равномерным распределением давления газообразного UF₆ внутри емкости.

3. Температура наружной поверхности цилиндрической стенки емкости постоянна и равна температуре хладагента в рассматриваемый момент времени. Температура границы раздела фаз равна температуре фазового перехода (десублимации) UF₆ для текущего давления в емкости.

4. Процесс десублимации UF₆ в емкости является квазистационарным, т.е. распределение температур линейно и практически не изменяется во времени.

Тепловой поток через цилиндрическую поверхность слоя UF₆ при квазистационарном процессе теплопередачи [46] описывается уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} = K\pi L(T_2 - T_1), \quad (2.1)$$

где dQ – количество тепла, проходящего тепла через цилиндрическую поверхность емкости за время dt , Дж·м⁻²·с⁻¹; L – протяженность поверхности (длина цилиндрической стенки), м; T_1 – температура внешней поверхности цилиндрической стенки емкости, равная температуре хладагента, °С; K – коэффициент теплопередачи через двухслойную поверхность (1 слой – металлическая стенка емкости, 2 слой – образованный десублимат гексафторида

урана), Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹ [47]; T_2 – температура фазового равновесия на границе десублимации UF₆, °С.

Коэффициент теплопередачи K через двухслойную поверхность рассчитывалась по след формуле:

$$K = \frac{1}{\lambda_1 \ln \frac{R_1}{R_2} + \lambda_2 \ln \frac{R_2}{R_2-x}}, \quad (2.2)$$

где λ_1 – теплопроводность твердого UF₆, Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹; R_1 – внешний радиус цилиндрической части емкости, м; R_2 – внутренний радиус цилиндрической части емкости, м; λ_2 – теплопроводность стенки емкости, Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹; x – толщина слоя десублимированного UF₆, м.

Температура фазового равновесия на границе десублимации UF₆ в диапазоне температур от 0 до 64°С определяется по формуле [48, 49]:

$$T_2 = \lg P - a + \frac{\sqrt{(a - \lg P)^2 - b \cdot (c - d \cdot \lg P)}}{e}, \quad (2.3)$$

где P – давление газообразного UF₆ в емкости, мм рт.ст.; a, b, c, d, e – эмпирические коэффициенты: $a = 7.7661648$, $b = 0.0301508$, $c = 228.09988$, $d = 183.416$, $e = 0.0150754$.

Количество теплоты Q [50], проходящей через поверхность емкости описывается уравнением (2.4).

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2.4)$$

где Q_1 – количество теплоты, выделившееся при переходе газообразного UF₆ в твердое состояние, Дж; Q_2 – количество теплоты, выделившееся при охлаждении десублимированного UF₆ при изменении температуры от температуры фазового перехода до температуры, соответствующей стационарному состоянию, Дж; Q_3 – количество теплоты, переданное газообразным UF₆ при фазовом переходе, Дж.

Q_3 незначительно (теплоемкость и плотность газообразного UF₆ много меньше этих характеристик UF₆ в твердой фазе), поэтому будем считать его равным нулю. Тогда уравнение (2.4) преобразуется к виду:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (2.5)$$

Для упрощения вычислений преобразуем выражение для Q_2 , исходя из того, что толщина слоя десублимированного UF_6 по сравнению с радиусом цилиндрической части емкости мала, следовательно, зависимость температуры T от толщины слоя десублимированного UF_6 x можно считать линейной. Тогда при увеличении толщины слоя на величину dx количество теплоты Q_2 , будет равно половине количества теплоты выделившейся при остывании слоя толщиной dx с температуры T_2 до температуры внешней поверхности цилиндрической стенки.

Таким образом, уравнение (2.5) преобразуется в уравнение:

$$\frac{dQ}{dt} = \left(r + \frac{c \cdot (T_2 - T_1)}{2} \right) \frac{dm}{dt}, \quad (2.6)$$

где r – удельная теплота десублимации UF_6 , Дж·кг⁻¹; c – удельная теплоемкость UF_6 при постоянном давлении, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $\frac{dm}{dt}$ – скорость изменения массы десублимированного UF_6 , кг·с⁻¹.

Количество теплоты, отданное системой, равно количеству теплоты, образовавшемуся в ней, тогда с учетом уравнений (2.1) и (2.6) получаем:

$$K\pi L(T_2 - T_1) = \left(r + \frac{c \cdot (T_2 - T_1)}{2} \right) \frac{dm}{dt}. \quad (2.7)$$

Динамика массы гексафторида урана описывалась уравнением:

$$\frac{dm}{dt} = 2\rho\pi L(R_2 - x) \frac{dx}{dt}, \quad (2.8)$$

где ρ – плотность твердого UF_6 , кг·м⁻³.

Подставив уравнение (2.8) и (2.2) в (2.7) и выразив $\frac{dx}{dt}$, получили основное расчетное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho \cdot (T_2 - T_1) \cdot (R_2 - x)}{2 \cdot \left(r + \frac{c \cdot (T_2 - T_1)}{2} \right) \cdot \left(\lambda_1 \ln \frac{R_1}{R_2} + \lambda_2 \ln \frac{R_2}{R_2 - x} \right)}. \quad (2.9)$$

Для начального условия $t_0 = 0$, $x(t_0) = 0$ дифференциальное уравнение (2.9) численно решим методом Рунге-Кутты 4-го порядка [14]. Каждое следующее

значение толщины слоя десублимированного UF₆ x_{i+1} будем находить с помощью предыдущего x_i по формуле:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{dt}{6}(y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4), \quad (2.10)$$

где dt – шаг расчета по времени; $f(x)$ – правая часть уравнения (2.9); $y_1 = f(x_i)$; $y_2 = f(x_i + 0.5 \cdot dt \cdot y_1)$; $y_3 = f(x_i + 0.5 \cdot dt \cdot y_2)$; $y_4 = f(x_i + dt \cdot y_3)$.

Для каждого значения толщины слоя десублимированного UF₆ x находим значение массы десублимированного UF₆ m по формуле:

$$m = \rho \pi L (R_2^2 - (R_2 - x)^2). \quad (2.11)$$

Согласно правилам хранения/транспортировки UF₆ заполнение емкости необходимо проводить до 70% ее свободного объема. Следовательно, расчет должен останавливаться при достижении массы десублимированного UF₆ $m = 0.7\rho V$, где V – объем заполняемой емкости.

2.2 Программная реализация математической модели

Математическая модель реализована в виде программы на языке Python 3.8 в функционально-процедурном стиле. Используются стандартные библиотеки: `math` (для расчета логарифмов, для значения числа ПИ), `os` (для работы с файлами) и сторонние библиотеки: `tkinter` (для создания пользовательского интерфейса), `openpyxl` (для создания Excel файлов и работы с ними).

Интерфейс разработанной программы представлен на рисунке 2.1.

Десублимация гексафторида урана в горизонтальные емкости

Длина емкости	<input type="text"/>	м
Внешний диаметр емкости	<input type="text"/>	м
Внутренний диаметр емкости	<input type="text"/>	м
Теплоемкость гексафторида урана	<input type="text"/>	Дж/(кг*К)
Теплопроводность гексафторида урана	<input type="text"/>	Вт/(м*К)
Плотность гексафторида урана	<input type="text"/>	кг/м ³
Давление гексафторида урана в коллекторе	<input type="text"/>	мм рт. ст.
Температура хладагента	<input type="text"/>	°С
Теплопроводность стенки емкости	<input type="text"/>	Вт/(м*К)
Шаг расчета по времени	<input type="text"/>	с

Средняя производительность емкости	<input type="text"/>	кг/с
	<input type="text"/>	кг/ч
Масса десублимированного гексафторида урана	<input type="text"/>	кг
Время заполнения емкости до 70% свободного объема	<input type="text"/>	с
	<input type="text"/>	ч

Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет
 Инженерная школа ядерных технологий
 Отделение ядерно-топливного цикла
 Программное обеспечение
 Десублимация гексафторида урана в горизонтальные емкости
 Верлинский Максим Валимович
 Орлов Алексей Алексеевич

Рисунок 2.1. Интерфейс программы

Он содержит поля для ввода исходных данных: «Длина емкости»; «Внешний диаметр емкости»; «Внутренний диаметр емкости»; «Теплоемкость гексафторида урана»; «Теплопроводность гексафторида урана»; «Плотность гексафторида урана»; «Давление гексафторида урана в коллекторе»; «Температура хладагента»; «Шаг расчета по времени». Кроме того, интерфейс содержит поля, в которые выводятся результаты расчета: «Средняя производительность емкости», «Масса десублимированного гексафторида урана», «Время заполнения емкости до 70% свободного объема», и три кнопки: «По умолчанию», «Размеры емкости 48У», «Провести расчет».

При нажатии кнопки «По умолчанию» автоматически заполняются все поля с исходными данными кроме полей: «Длина емкости», «Внешний диаметр емкости», «Внутренний диаметр емкости» стандартными значениями параметров. Поля, не заполняемые автоматически, заполняются вручную произвольными размерами, либо автоматически при нажатии кнопки «Размеры емкости 48У». При этом в соответствующие поля выводятся стандартные размеры емкости 48У.

После нажатии кнопки «Провести расчет» результаты расчета выводятся в соответствующие поля (рисунок 2.2), а также в директории с файлом программы создается Excel файл с таблицей и графиком зависимости массы десублимированного урана от времени (рисунок 2.3).

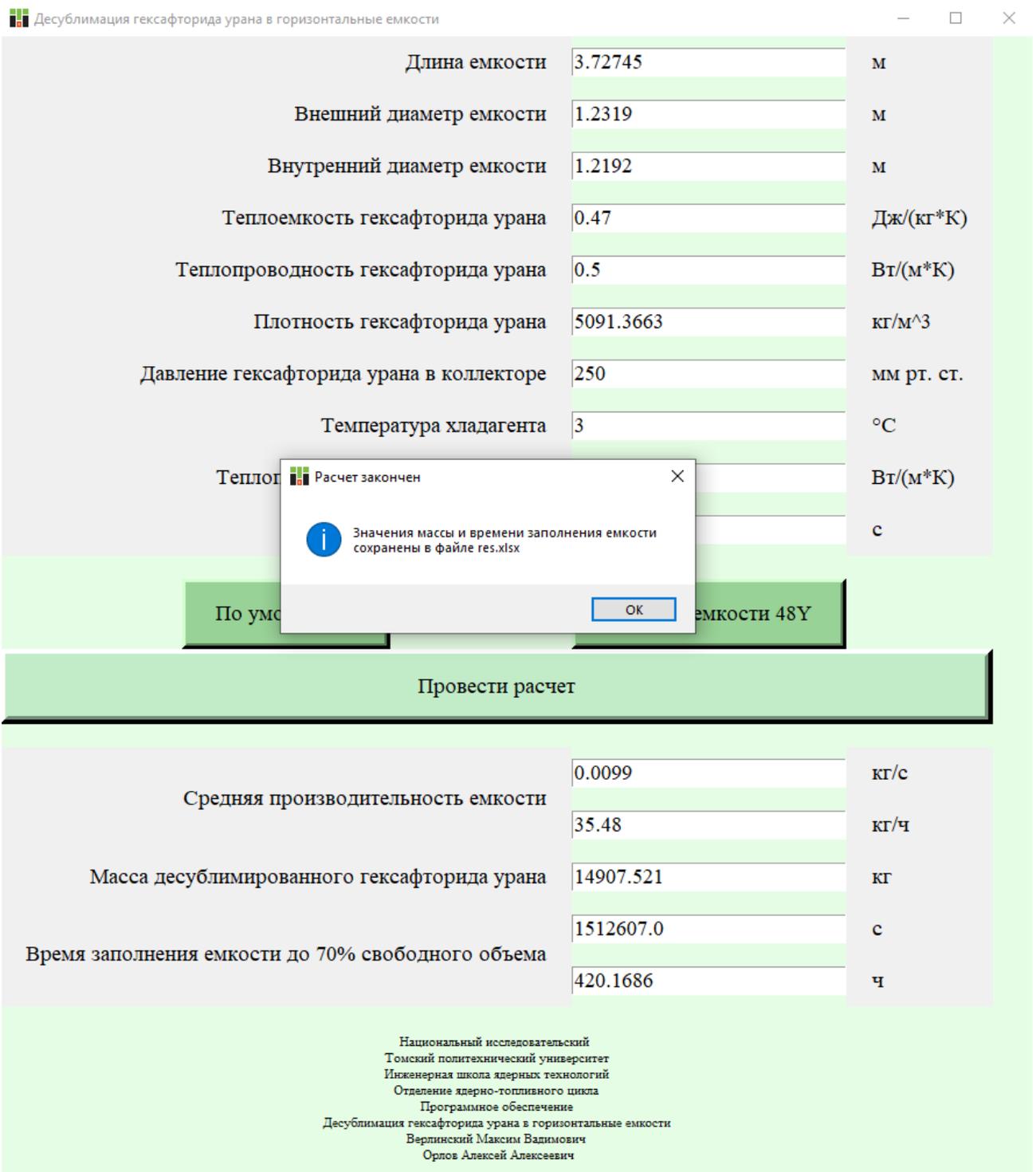


Рисунок 2.2. Интерфейс программы после окончания расчета

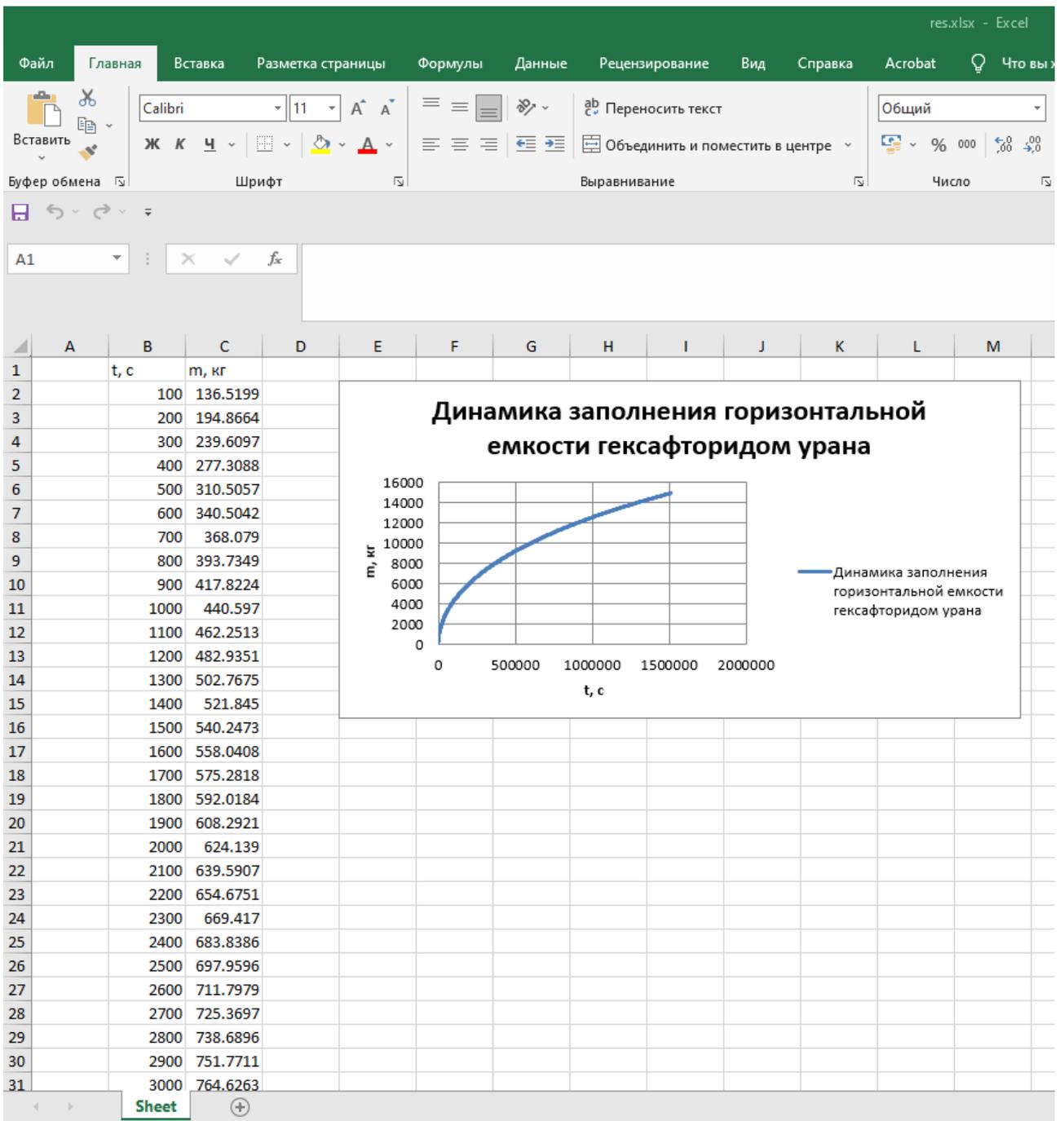


Рисунок 2.3. Внешний вид автоматически созданного после расчета файла «res.xlsx»

Библиотека `tkinter` позволила создать программу с интерфейсом в функционально-процедурной парадигме без использования парадигмы объектно-ориентированного программирования. Реализованы 6 функций:

1) `f_by_x`

Данная функция принимает на вход 10 аргументов: внешний диаметр, внутренний диаметр, удельная теплота десублимации UF_6 , удельная теплоемкость UF_6 при постоянном давлении, теплопроводность твердого UF_6 , теплопроводность стенки емкости, температура внешней поверхности цилиндрической стенки емкости (равная температуре хладагента), температура фазового равновесия на границе десублимации UF_6 , плотность твердого UF_6 , толщина слоя десублимированного UF_6 и возвращает значение $f(x)$. Она необходима для численного решения уравнения (2.9) методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

2) `standart_values`

Вторая функция обеспечивает автоматический ввод исходных данных в соответствующие поля при нажатии кнопки «По умолчанию». Если данные поля ранее заполнены вручную, то данная функция производит их очистку перед вводом исходных данных.

3) `tank_48y`

Третья функция обеспечивает автоматический ввод размеров емкости 48Y при нажатии соответствующей кнопки. Если данные поля ранее заполнены вручную, то данная функция производит их очистку перед вводом исходных данных.

4) `cleaning_res`

Четвертая функция позволяет очистить поля интерфейса, в которые выводятся результаты расчета для того, чтобы не перезапускать программу для проведения нового расчета.

5) `start_calculation`

Данная функция принимает на вход 11 аргументов: шаг расчета по времени, внешний диаметр, внутренний диаметр, удельная теплота

десублимации UF_6 , удельная теплоемкость UF_6 при постоянном давлении, теплопроводность твердого UF_6 , теплопроводность стенки емкости, температура внешней поверхности цилиндрической стенки емкости (равная температуре хладагента), температура фазового равновесия на границе десублимации UF_6 , плотность твердого UF_6 . Она в свою очередь вызывает функцию `cleaning_res`. Кроме того, данная функция готовит начальные данные для расчета, а также таблицу Excel для его результатов. Затем реализуется расчет, который выполняется до достижения степени заполнения емкости 70%. При этом происходит заполнение Excel таблицы расчетными данными, а также прорисовывается соответствующий график и заполняются поля интерфейса «Средняя производительность емкости», «Масса десублимированного гексафторида урана», «Время заполнения емкости до 70% свободного объема».

б) `do_calculation`

Шестая функция при нажатии кнопки «Провести расчет» передает исходные данные функции `start_calculation` и, после ее выполнения, выводит окно с сообщением «Расчет закончен. Значения массы и времени заполнения емкости сохранены в файле `res.xlsx`».

2.3 Верификация математической модели

С помощью созданной и программно реализованной математической модели проведены расчеты динамики заполнения горизонтальной транспортной емкости 48У объемом 4 м^3 десублимированным UF_6 до 70% ее свободного объема при давлении UF_6 в коллекторе 250 мм рт. ст., температуре газообразного UF_6 30°C , давлении в пустой емкости 4 мм рт. ст., температуре охлаждающей воды 3°C .

Рассчитанная зависимость массы десублимированного UF_6 от времени представлена на рисунке 2.4 вместе с экспериментальными данными, полученными в аналогичных условиях [35].

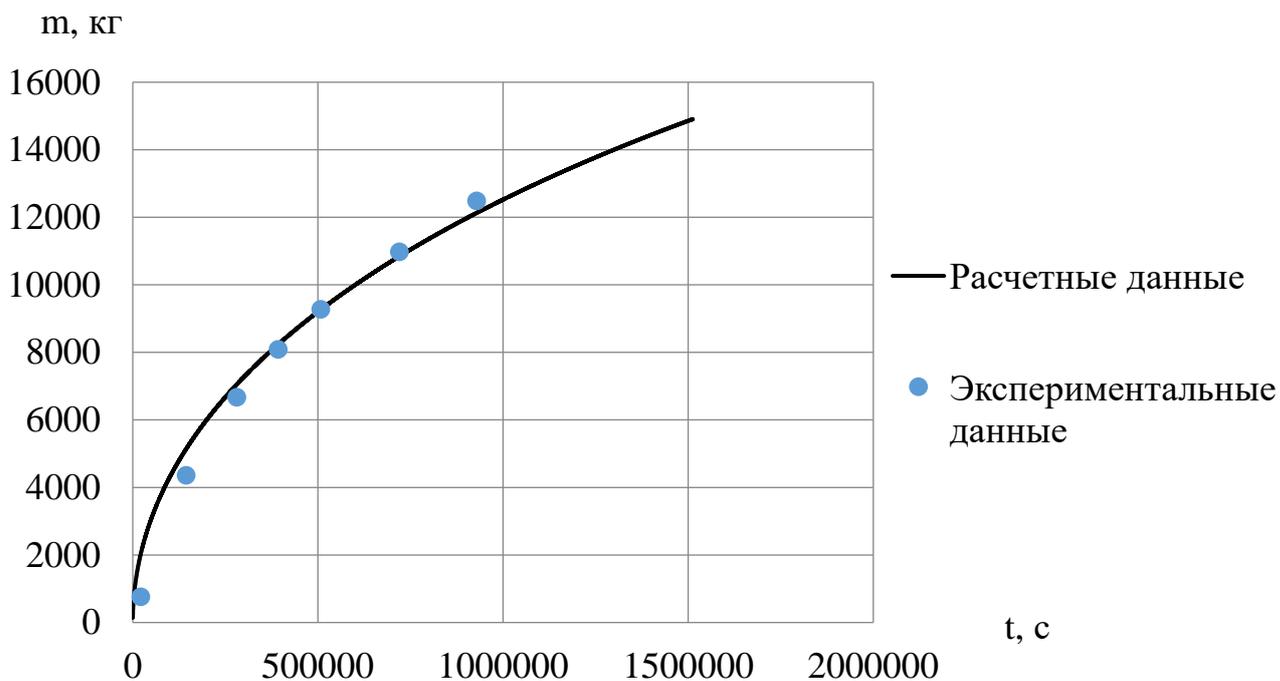


Рисунок 2.4. Динамика заполнения горизонтальной емкости десублимированным UF_6

Из рисунка 2.4 видно, что расчетные экспериментальные данные имеют хорошую сходимость.

Кроме того, адекватность математической модели была проверена нами с помощью вычисления критерия Фишера, который рассчитывается как отношение остаточной дисперсии (дисперсия адекватности) к общей дисперсии (дисперсия воспроизводимости) [52]:

$$F = \frac{S_{\text{ост}}}{S_{\text{общ}}} = \frac{541948}{11765337} = 0.04. \quad (2.12)$$

Рассчитанное значение критерия Фишера равно 0.04. Оно намного меньше его табличного значения (16.26), следовательно, математическая модель адекватно описывает процесс десублимации UF_6 в горизонтальную транспортную емкость [52].

3. Результаты исследований и их анализ

3.1 Влияние размеров емкости на ее среднюю производительность

Исследована зависимость средней производительности горизонтальной емкости объемом 4 м^3 от ее длины (диаметра) при давлении UF_6 в коллекторе 250 мм рт. ст., температуре хладагента 3°C , температуре газообразного UF_6 30°C , давлении в пустой емкости 4 мм рт. ст., толщине стенок емкости 12.7 мм. Стандартная емкость 48У объемом 4 м^3 имеет внутренний диаметр 1.22 м, длину 3.73 м. При расчетах объем емкости сохранялся постоянным, диаметр емкости изменялся от 0.80 м до 1.60 м, а длина от 8.30 м до 2.28 м соответственно. Диапазон изменения размеров емкости ограничен. Он выбирался исходя из размеров железнодорожных вагонов, в которых перевозят данные емкости и необходимости установки на торцевой поверхности емкости двух клапанов (входного и отсосного).

Результаты расчета представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Результаты исследования зависимости средней производительности горизонтальной емкости объемом 4 м³ от ее геометрических размеров

Внутренний диаметр емкости, м	Длина, м	Средняя производительность, кг/ч	Площадь теплообменной поверхности, м ²
0.80	8.30	74.34	20.87
0.85	7.39	66.54	19.72
0.90	6.62	60.00	18.71
0.95	5.97	54.47	17.81
1,00	5.41	49.75	17.00
1.05	4.93	45.69	16.27
1.10	4.52	42.17	15.61
1.15	4.16	39.11	15.02
1.20	3.84	36.42	14.47
1.22	3.73	35.48	14.28
1.25	3.56	34.06	13.98
1.30	3.31	31.96	13.52
1.35	3.09	30.09	13.10
1.40	2.89	28.43	12.72
1.45	2.71	26.94	12.36
1.50	2.55	25.59	12.03
1.55	2.41	24.38	11.73
1.60	2.28	23.28	11.44

Из таблицы 3.1 видно, что при уменьшении внутреннего диаметра и увеличении длины емкости ее средняя производительность и площадь теплообменной поверхности увеличиваются.

При уменьшении внутреннего диаметра емкости относительно диаметра стандартной емкости 48У (выделено в таблице заливкой) до 0.80 м ее средняя производительность увеличивается в 2.1 раз, а площадь теплообменной поверхности – в 1.5 раза.

Увеличение средней производительности емкости объясняется, во-первых, увеличением площади теплообменной поверхности, во-вторых, тем, что

слой образуемого десублимата в емкости с меньшим диаметром при заполнении до 70% будет намного меньше, чем в емкости с большим диаметром.

3.2 Влияние выбора хладагента и его температуры на среднюю производительность емкости

Как было показано в обзорной главе, для десублимации гексафторида урана используется два хладагента: вода (предельная температура 3°C) и насыщенный раствор CaCl₂ (предельная температура минус 20°C). В связи с этим представляло интерес провести сравнение работы горизонтальной емкости при использовании хладагентов с различной температурой.

Для этого с использованием разработанной нами математической модели проведены расчеты параметров заполнения горизонтальной емкости 48У объемом 4 м³ при использовании в качестве хладагента воды с температурой 3°C и насыщенного раствора CaCl₂ с температурой минус 20°C, при давлении UF₆ в коллекторе 250 мм рт. ст., температуре газообразного UF₆ 30°C, давлении в пустой емкости 4 мм рт. ст., толщине стенок емкости 12.7 мм. Исследована динамика заполнения данной емкости гексафторидом урана.

Результаты расчетов представлены на рисунке 3.1.

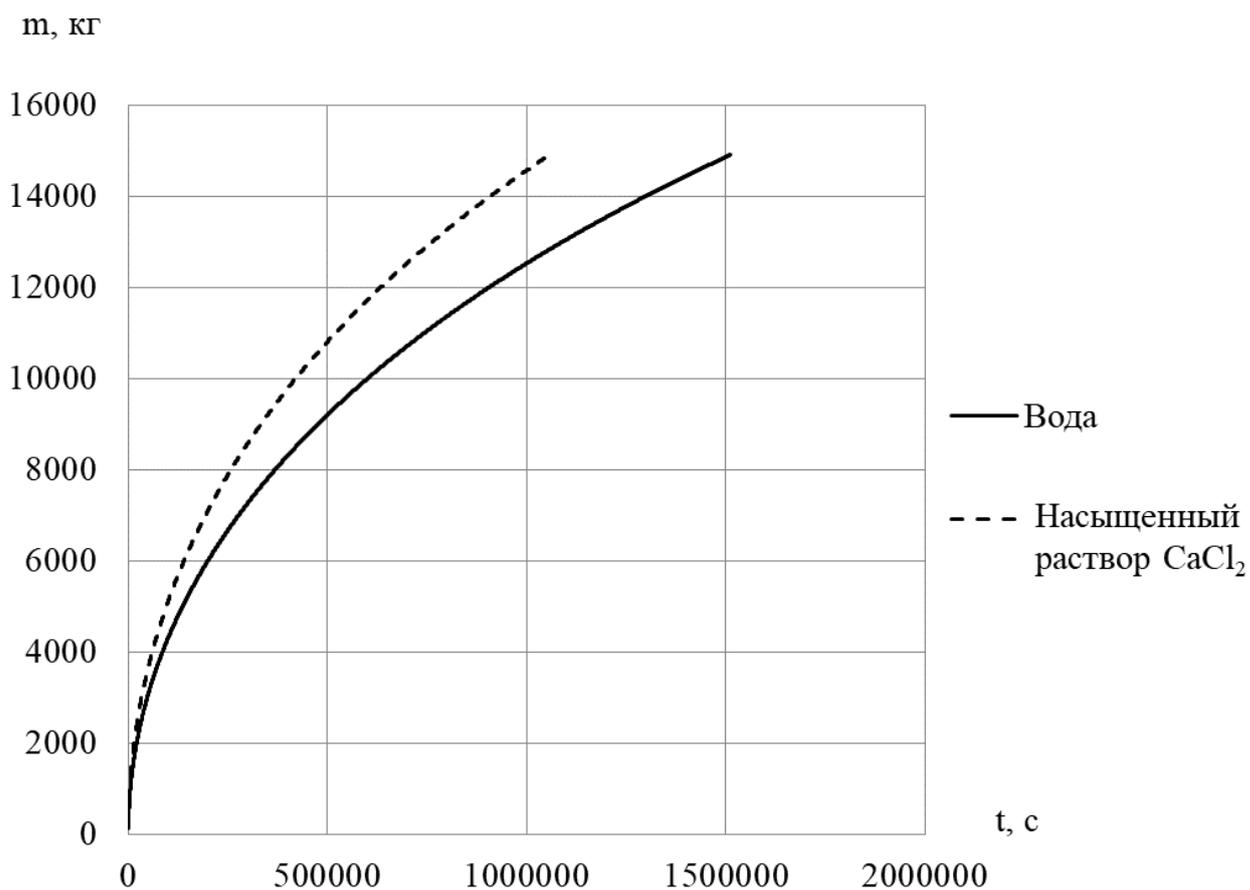


Рисунок 3.1. Динамика заполнения горизонтальной емкости 48У гексафторидом урана при использовании различных хладагентов

Из рисунка 3.1 видно, что при использовании в качестве хладагента насыщенного раствора CaCl₂ с температурой минус 20°С время заполнения емкости в 1.43 раза меньше, чем при использовании в качестве хладагента воды с температурой 3°С. Соответственно, средняя производительность емкости при использовании раствора CaCl₂ на 43% выше, чем при использовании воды.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является определение экономической целесообразности создания математической модели десублимации гексафторида урана в горизонтальную емкость и исследования влияния геометрии и выбора хладагента на ее производительность.

В данном разделе необходимо решить следующие задачи:

- Оценить конкурентоспособность технических решений
- Провести SWOT-анализ;
- Выполнить планирование научно-исследовательской работы;
- Провести расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Провести расчет и оценку сравнительной финансовой эффективности

исследования.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе разработана расчетная модель динамики десублимации гексафторида урана с учетом геометрии емкости.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является математическая модель десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, области производства, основная цель которых, это использование емкостей с высокими физико-химическими показателями, например, хранилища уранового топлива.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 4.1.

		Математическая модель десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости			
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Иные производственные отрасли	Экспортный контроль
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Рисунок 4.1. Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Главное преимущество – это проведенная верификация математической модели. Математическая модель позволяет не проводить многочисленные эксперименты и избежать крупных финансовых затрат на их реализацию. Конкурентные методы исследования – экспериментальные исследования динамики десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1. 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:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя [53].

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии: повышение производительности труда (насколько данное техническое решение поможет увеличить производительность труда на предприятии); удобство эксплуатации (возможность удобного использования модели для получения необходимых результатов); экономичность (сокращение материальных затрат на получение необходимых данных); надежность (точность и корректность получения данных в любой момент); закрытость получаемых данных (данный пункт важен для того, чтобы доступ к данным расчетной модели имел определенный круг лиц, а также, чтобы модель не оптимизировалась под новые параметры без участия разработчиков); потребность в материальных ресурсах (получение необходимых данных без высокого уровня затрат); стабильность (безотказность расчетной модели при различных устанавливаемых параметрах в любой момент времени); доступность (возможность приобретения предприятиями данной расчетной модели, либо получения результатов расчета заказчиками); конкурентоспособность (преимущества данной расчетной модели

над иными способами получения данных); затраты на разработку (сколько потрачено материальных ресурсов на реализацию модели); предполагаемый срок эксплуатации (в течении какого периода возможно получать необходимые данные тем или иным способом); финансирование разработанного метода(начальное и дальнейшее вложение средств для получения данных различными способами).

Таблица 4.1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
4. Надежность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Закрытость получаемых данных	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
7. Стабильность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
8. Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Финансирование разработанного метода	0,1	5	1	3	0,5	0,1	0,3
Итого	1				5	2,92	3,25

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что разработанная в данной работе модель является наиболее оптимальной для

использования в практических целях. Конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. В свою очередь разработанная модель позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую точность расчетных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

4.1.3 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 [53, 54].

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют

разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем [54].

В таблице 4.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.2. Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	+	+	+	+	+
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.3.

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной модели такие как корректность, точность получаемых данных, возможность оптимизации модели, экономичность, стабильность, доступность, удобство эксплуатации, возможность получения данных «здесь и сейчас» значительно преобладают над ее недостатками (небольшой круг потребителей, закрытость). Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

Таблица 4.3. SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>С2. Применение современного оборудования и программного кода.</p> <p>С3. Бюджетное финансирование.</p> <p>С4. Получение результатов высокой точности.</p> <p>С5. Возможность оптимизации расчетной модели.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченное применение конкретной модели.</p> <p>Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов.</p> <p>Сл3. Закрытость программного кода.</p> <p>Сл4. Ограниченный круг потребителей.</p> <p>Сл5. Ограниченные возможности расчета (только для определенных компонентов).</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование модели для исследований.</p> <p>В2. Разработка рекомендаций по применению модели для персонала.</p> <p>В3. Расширение возможностей расчетной модели.</p> <p>В4. Возможность исследования различных емкостей.</p> <p>В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Полное обеспечение условий для создания и применения модели для расчетов.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики и использованием современных расчетных моделей.</p> <p>3. Высокая точность получаемых результатов позволяет повысить спрос на расчетную модель</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Необходимо экспериментальное подтверждение, что возможно реализовать в условиях вуза.</p> <p>2. Закрытость расчетной модели не отражается на точности результатов.</p> <p>3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения возможностей расчетной модели.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Низкий спрос со стороны предприятий.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных расчетных моделей другими организациями.</p> <p>У3. Сложность в продвижении модели.</p> <p>У4. Полное отсутствие спроса.</p> <p>У5. Разработка новейших моделей расчета.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>1. Благодаря возможностям расчетной модели и своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.</p> <p>2. Так как существует возможность оптимизации расчетной модели, то это позволит конкурировать с новейшими разработками.</p> <p>3. Дополнительное финансирование позволит продвинуть расчетную модель на рынок.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>1. Создание подобных моделей другими организациями можно решить с помощью возможностей расчетной модели, которых нет у конкурентов.</p> <p>2. Несовершенства разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые параметры</p>

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ (рисунок 4.2). В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 4.2. Иерархическая структура работ

4.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2022	Приказ по ИЯТШ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2022	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2022	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2022	Отчет
5	Календарное планирование работ	12.02.2022	План работ
6	Изучение возможностей расчетной модели	13.02.2022	Отчет
7	Освоение методики расчета на практике	14.02.2022	Отчет
8	Проведение расчетов	15.02.2022-30.03.2022	Отчет
9	Анализ полученных данных	28.03.2022	Отчет
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2022	Отчет
11	Составление пояснительной записки	14.02.2022-25.04.2022	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2022	
13	Подготовка к защите	27.04.2022-25.05.2022	

4.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ [53, 55].

Линейный график представлен в таблице 4.5. В таблице 4.6 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 4.5. Календарный план проекта

Код работ ы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	1	1.02.2022	2.02.2022	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	1	3.02.2022	4.02.2022	Руководитель
3	Выбор направления исследований	3	5.02.2022	7.02.2022	Руководитель, исполнитель
4	Подбор и изучение материалов по теме	6	7.02.2022	12.02.2022	Исполнитель
5	Календарное планирование работ	1	12.02.2022	13.02.2022	Руководитель, исполнитель
6	Изучение возможностей расчетной модели	1	13.02.2022	14.02.2022	Исполнитель
7	Освоение методики расчета на практике	1	14.02.2022	14.02.2022	Исполнитель
8	Проведение расчетов	45	15.02.2022	30.03.2022	Исполнитель
9	Анализ полученных данных	2	28.03.2022	30.03.2022	Исполнитель
10	Обобщение и оценка результатов	1	30.03.2022	30.03.2022	Руководитель, исполнитель
11	Составление пояснительной записки	72	14.02.2022	25.04.2022	Исполнитель
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	26.04.2022	27.04.2022	Руководитель, исполнитель
13	Подготовка к защите	29	27.04.2022	25.05.2022	Исполнитель

Таблица 4.6. Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2				
1	Разработка технического задания	Руководитель	2	1	2																
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	1	2																
3	Выбор направления исследований	Руководитель, исполнитель	5	1	2	3															
4	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	2		1	2															
5	Календарное планирование работ	Руководитель, исполнитель	1	1	2																
6	Изучение возможностей расчетной модели	Исполнитель	1		1	2															
7	Освоение методики расчета на практике	Исполнитель	1		1	2															
8	Проведение расчетов	Исполнитель	45		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
9	Анализ полученных данных	Исполнитель	2																		
10	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, исполнитель	1																		
11	Составление пояснительной записки	Исполнитель	72		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, исполнитель	1																		
13	Подготовка к защите	Исполнитель	29																		

 – Руководитель  – Исполнитель

4.3 Инициация проекта

Приведем 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. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 4.7.

Представим информацию об иерархии целей проекта и критерия достижения целей в таблице 4.8.

Таблица 4.7. Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИИ	Использование разработанной математической модели для дальнейшего исследования процесса десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости
Компании атомной промышленности	Использование расчетов для интенсификации процесса десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений

Таблица 4.8. Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Создание, программная реализация и верификация математической модели процесса десублимации гексафторида урана в горизонтальную емкость, проведение исследований, направленных на повышение её производительности.
Ожидаемые результаты проекта:	Созданная, программно реализованная и верифицированная математическая модель процесса десублимации гексафторида урана в горизонтальную емкость, а также информация для интенсификации данного процесса.
Критерии приемки результата проекта:	Созданная, верифицированная математическая модель.
Требования к результату проекта:	Сходимость с экспериментальными данными, оцененная критерием адекватности (расчетный критерий Фишера меньше табличного).

4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим степень готовности научной разработки к коммерциализации и выясним уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполним специальную форму (таблица 4.9), содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает непроработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает

следующий вид: 1 означает незнаком или мало знаком, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровня имеющихся знаний разработчика) определяется по формуле: $B_{\text{сум}} = \sum B_i$, где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению; B_i – балл по i -му показателю.

Если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таблица 4.9. Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	2
	ИТОГО БАЛЛОВ	41	30

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

4.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации.

Для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как инжиниринг. Так как консультант имеет знания и опыт в оказании инженерно-технических услуг, но не имеет возможности построить собственное предприятие, заключается договор с заказчиком. Заказчик имеет собственное производство, но нуждается в дополнительном ведении узконаправленных проектов, которые выступают как вспомогательные для реализации рабочего процесса. Хотя методика и доступна в открытом доступе, необходимы ресурсы для найма сотрудников. В данном случае заказчику выгоднее заключать договор с компанией извне, а не создавать собственный отдел по расчету какой-либо составляющей процесса. Консультант же способен к выполнению большого количества задач и гибкости в отношении их количества и потраченного на проект времени.

4.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.6.1 Расчет материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi},$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15 – 25 % от стоимости материалов [53, 54].

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию. Программное обеспечение по образовательным лицензиям бесплатное. Результаты расчетов по затратам на материалы приведены в таблице 4.10.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,5 \cdot 960 = 2784,$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2784 рубля.

Таблица 4.10. Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия	–	480 кВт·ч	5,8	2784
Программное обеспечение: операционная система Ubuntu и среда разработки PyCharm (Education license)		4 месяца	0	0
Всего за материалы				2784
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье C_m				2784

4.6.2 Расчет амортизации оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Все работы проводились на персональном компьютере.

Таблица 4.11. Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Персональный компьютер	1	3	45000	45000
Итого:		45000руб.			

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования, лет.

Амортизация рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию для персонального компьютера, с учётом, что срок полезного использования 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33$$

Сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot 4 = \frac{0,33 \cdot 45000}{12} \cdot 4 = 4950 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 4950$$

В данном разделе проведен расчёт амортизации оборудования. Амортизация для персонального компьютера, с учётом, что срок полезного использования 3 года составила 0,33, а общая сумма амортизационных отчислений 4950 рублей. Суммарные затраты амортизационных отчислений – 4950 рублей.

4.6.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника; $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочих дней; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

1) при отпуске в 24 раб.дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

2) при отпуске в 48 раб.дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.12).

Таблица 4.12. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни/праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени:		
– отпуск/невыходы по болезни	56	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251

Исполнитель ежемесячно получает вознаграждение в размере МРОТ 13890 руб.

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

- иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессор и степенью доктор наук. Оклад профессора составляет 35000 рублей (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p,$$

где $Z_{ок}$ – заработная плата по окладу, руб.; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.13. Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнители	$Z_{ок}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{раб}$	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	35000	1,30	45500	2240	8 д.	17920
Исполнитель	13890	1,30	18057	863	63д.	54369
Итого $Z_{осн}$:	72289 руб.					

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15 % от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Примем коэффициент дополнительной заработной платы для научного руководителя равным 15 %. Тогда дополнительная зарплата руководителя 2688 рублей, а исполнителя 8155 рублей.

Суммарная зарплата руководителя 20608 рублей, исполнителя 62524 рублей.

4.6.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30,2 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

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

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя вычисляются следующим образом:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 20608 = 6223 \text{ руб.}$$

Отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда исполнителя вычисляются следующим образом:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 62524 = 18882 \text{ руб.}$$

В результате расчётов определены отчисления во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда руководителя и исполнителя, при том, что коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составил 0,302. Для руководителя, отчисления составили 6223 руб., а для исполнителя 18882 рубля.

4.6.5 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 12 – 16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем $k_{\text{накл}} = 16 \%$.

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (20608 + 62524) = 13301 \text{ руб.}$$

4.6.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.14.

Таблица 4.14. Расчет бюджета затрат исследовательского проекта

Статьи							
Амортизационные отчисления	Материальные затраты	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Страховые взносы	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
4950 руб.	2784 руб.	72289 руб.	10843 руб.	25105 руб.	115971 руб.	13301 руб.	129272 руб.

4.7 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель). Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 4.3.

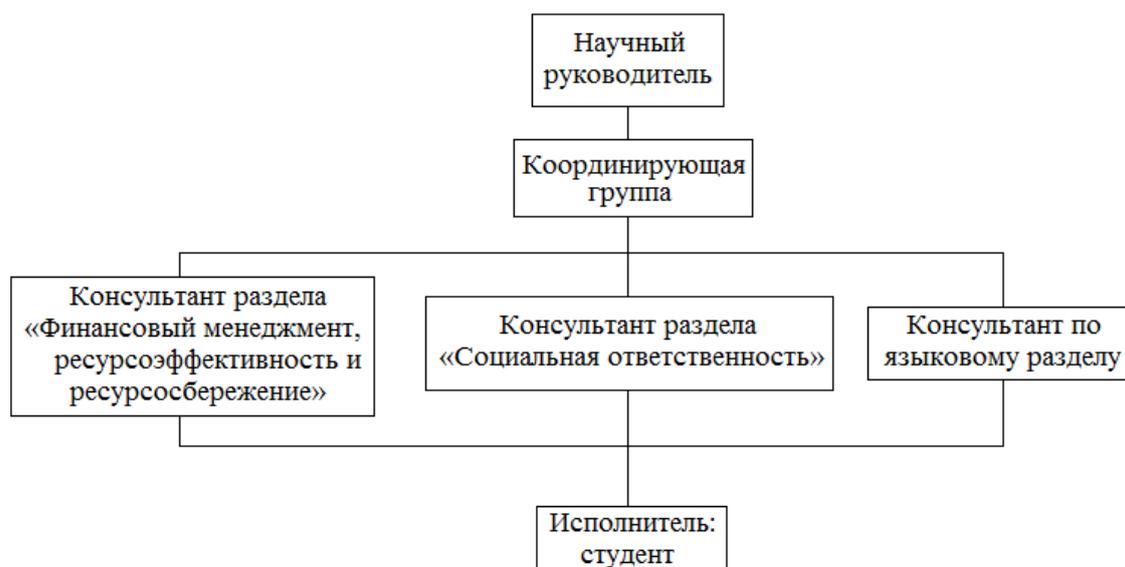


Рисунок 4.3. Организационная структура научного проекта

4.8 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 4.15.

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.

Таблица 4.15. Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответствие»	Консультант по языковому разделу	Исполнитель
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
Изучение возможностей расчетной модели					И
Освоение методики расчета на практике					И
Проведение расчетов	О				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

4.9 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Реестр рисков проекта представлен в таблице 4.16.

Таблица 4.16. Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Внешний	Кризис	5	3	средний	Расширение ПО для поддержки Linux системами	Изменение политической и международной конъюнктуры
2	Финансовый	Повышение уровня инфляции во время реализации проекта	3	1	низкий	Оптимизация работы с программой	Изменение политической и международной конъюнктуры
3	Производственный	Изменение конфигурации оборудования десублимации и гексафторида урана	3	2	низкий	Доработка ПО	В зависимости от задач руководства

4.10 Оценка научно-технического эффекта

Социально-научный эффект проявляется в росте числа открытий, изобретений, увеличении суммарного объема научно-технической информации, полученной в результате выполнения НИОКР, создании научного «задела», являющегося необходимой предпосылкой для проведения в будущем прикладных НИОКР и выполнения работ по модернизации конструкции выпускаемых изделий.

За последние годы появились предложения не только по качественной характеристике социального эффекта, но и по системе количественных показателей его оценки.

Элементом количественной оценки социально-научного эффекта следует считать определение научно-технического эффекта НИОКР. Методика состоит в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент научно-технического эффекта НИОКР:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot k_i,$$

где r_i — весовой коэффициент i -того признака (определяется по таблице 4.17); k_i — количественная оценка i -того признака.

Таблица 4.17.

Признак научно-технического эффекта НИОКР (i)	Примерные значения весового коэффициента (r)
Уровень новизны	0,6
Теоретический уровень	0,4
Возможности реализации	0,2

Количественная оценка уровня новизны НИОКР определяется на основе значения баллов по таблице 4.18.

Таблица 4.18. Количественная оценка уровня новизны НИОКР

Уровень новизны разработки	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Результаты исследований открывают новое направление в данной области науки и техники	8-10
Новая	По-новому или впервые объяснены известные факты, закономерности	5-7
Относительно новая	Результаты исследований систематизируют и обобщают имеющиеся сведения, определяют пути дальнейших исследований	2-4
Традиционный характер	Работа, выполненная по традиционной методике, результаты исследований носят информационный характер	1
Не обладающая новизной	Получен результат, который был ранее известен	0

Теоретический уровень полученных результатов НИОКР определяется на основе значения баллов, приведенных в таблице 4.19.

Таблица 4.19. Теоретический уровень полученных результатов НИОКР

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установление закона; разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы: многоаспектный анализ связей, взаимозависимости между фактами с наличием объяснения	8
Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, новшество и т.п.)	6
Элементарный анализ связей между фактами с наличием гипотезы, симплексного прогноза, классификации, объясняющей версии или практические рекомендации частного характера	2
Описание отдельных элементарных фактов (вещей, свойств и отношений); изложение опыта, наблюдений, результатов измерений	0,5

Возможность реализации научных результатов определяется на основе значения баллов (таблица 4.20).

Таблица 4.20. Баллы соответствующие времени и масштабам реализации

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Более 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль (министерство)	4
Народное хозяйство	10
Примечание: Баллы по времени и масштабам реализации складываются	

Результаты исследований систематизируют и обобщают имеющиеся сведения, вследствие чего определим уровень новизны разработки как новый, т.е. $k_1 = 7$.

В результате исследования была разработана расчетная модель динамики десублимации гексафторида урана с учетом геометрии емкости. В соответствии с таблицей 4.19 $k_2 = 6$.

Возможность реализации результатов разработки: по времени - в течение первых лет, по масштабам реализации - на одном или нескольких предприятиях. В соответствии с таблицей 4.20 $k_3 = 10+2 = 12$.

$$H_T = 0,6 \cdot 7 + 0,4 \cdot 6 + 0,2 \cdot 12 = 9$$

Таблица 4.21. Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень научно-технического эффекта	Коэффициент научно-технического эффекта
Низкий	1-4
Средний	5-7
Сравнительно высокий	8-10
Высокий	11-14

В соответствии с таблицей 4.21, уровень научно-технического эффекта – сравнительно высокий.

4.11 Определение ресурсной эффективности проекта

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле $I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$, 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^b – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности данного исследования представлен в форме таблицы 4.22.

Таблица 4.22. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4
4. Энергосбережение	0,1	5	4
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,2	4	3
Итого	1	4,25	3,65

$$I_p = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,25;$$

$$I_a = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 3,65.$$

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле $I_\phi^p = \frac{\Phi_i}{\Phi_{\max}}$, где Φ_i – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения НТИ (в т.ч. аналоги).

$$I_\phi^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\max}} = \frac{312572}{350000} = 0,89;$$

$$I_{\phi}^a = \frac{\Phi_a}{\Phi_{\max}} = \frac{180000}{200000} = 0,9.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финр}}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя

по формулам $I_{\text{финр}}^p = \frac{I_p}{I_{\phi}^p}$, $I_{\text{финр}}^a = \frac{I_a}{I_{\phi}^a}$:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,25}{0,89} = 4,77;$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_a}{I_{\phi}^a} = \frac{3,65}{0,9} = 4.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_p}.$$

Таблица 4.23. Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки и аналогов	3,65	4,25
Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки и аналога	4	4,77
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,09	1,12

На основе расчета интегрального показателя с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности научного исследования можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

4.12 Оценка абсолютной эффективности НИ

Для оценки общей экономической эффективности используются основные показатели:

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

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

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

где: $ЧДП_{опt}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности; I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году; t – номер шага расчета ($t= 0, 1, 2 \dots n$); n – горизонт расчета; i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Коэффициент дисконтирования рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1+i)^t}$$

где: i – ставка дисконтирования; t – шаг расчета.

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если $NPV > 0$, то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 4.24.

Таблица 4.24. Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	98712.0 214	151358	210585	210585
2	Итого приток, руб.	0	98712.0 214	151358	210585	210585
3	Инвестиционные издержки, руб.	129272	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб.	0	40000	60000	80000	80000
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	58712	91358	130585	130585
6	Налоги, руб.	0	11742	18271	26117	26117
8	Чистая прибыль, руб.(5-6)	0	46969	73086	104468	104468
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.	-129272	66360	92477	123859	123859
10	Коэффициент дисконтирования при $i=20\%$ (КД)	1	0.83333	0.69444	0.5787	0.48225
11	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)	-129272	55300	64220	71677	59731
12	\sum ЧДД			84274		
12	Итого NPV, руб.			3476		

Индекс доходности (PI) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

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

где: ЧДП - чистый денежный поток, руб.; I_0 – начальный инвестиционный капитал, руб.

Если $PI > 1$, то проект является эффективным.

Внутренняя ставка доходности (IRR). Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или $=0$. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 4.25).

Таблица 4.25. Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток, руб.	-129272	55300	64220	71677	59731
2	То же нарастающим итогом, руб.	-129272	-79311	-12201	67999	134834
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DPР_{дск} = 2,26$ года				

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что проект эффективен с точки зрения целесообразности инвестирования денежных средств, что подтверждается расчетом NPV, который оказался больше нуля. Дисконтированный срок окупаемости проекта составляет 2,26 года.

Выводы по разделу

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» согласно анализу конкурентных технических решений установлено, что конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. Разработанная и программно реализованная математическая модель десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую точность расчетных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

2. В ходе планирования научно-исследовательских работ определен перечень работ, выполняемый рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель (профессор) и исполнитель (магистрант). На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, построенный на основе диаграммы Гантта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это составление пояснительной записки.

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 129272руб.

4. Проведена оценка уровня научно-технического эффекта. Коэффициент научно-технического эффекта равен 9, что говорит о сравнительно высоком уровне научно-технического эффекта исследования.

5. Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала средний уровень, который можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

6. Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

7. Оценка абсолютной эффективности НИ показала, что проект является эффективным с точки зрения целесообразности инвестирования денежных средств, со сроком окупаемости 2,26 года.

5 Социальная ответственность

Результатом работы является разработанная и программно реализованная математическая модель десублимации гексафторида урана в горизонтальные емкости, также с помощью данной модели проводится изучение возможности повышения производительности горизонтальной емкости при изменении геометрических размеров емкости, использовании хладагентов с разной температурой.

Разработка математической модели и дальнейшие исследование проводились с использованием персональной электронно-вычислительной машины. Математическая модель разрабатывалась на языке программирования Python в среде PyCharm. Для анализа результатов использовались программы Jupiter Notebook и Microsoft Excell.

Работа выполнялась в аудитории №246 10 корпуса НИ ТПУ на базе Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий.

В разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на процесс исследования, рассмотрены воздействия исследуемого объекта на окружающую среду, правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация

профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации, каждый работник имеет право на:

- 1) рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- 2) обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- 3) получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- 4) отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- 5) обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- 6) обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- 7) личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- 8) внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- 9) гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [56].

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как изображено на рисунке 5.1 [57].

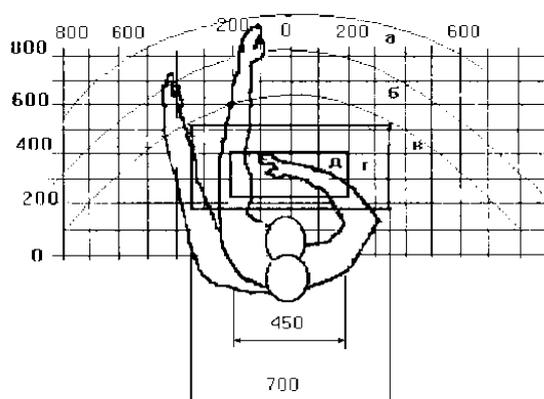


Рисунок 5.1. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а - зона максимальной досягаемости рук;
- б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в - зона легкой досягаемости ладони;
- г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- 1) дисплей размещается в зоне а (в центре);
- 2) клавиатура - в зоне г/д;
- 3) системный блок размещается в зоне б (слева);
- 4) принтер находится в зоне а (справа);
- 5) литература и документация, необходимая при работе находится в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева);
- б) в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

При выборе рабочего места, а именно письменного стола должны быть учтены следующие требования, которые представлены в таблице 5.1 [57].

Таблица 5.1. Требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за ПК

Ширина рабочего стола	От 80 до 140 см
Высота рабочего стола	75 см
Глубина рабочего стола	От 60 до 80 см
Расстояние от глаз до монитора	От 50 до 60 см
Расстояние клавиатуры от края стола	От 10 до 30 см
Сидение	Должно позволять регулировку по высоте, повороту и углу наклона спинки (регулировки должны быть независимыми друг от друга)
Пространство для ног	Ширина от 30 см, глубина – от 40 см, с углом наклона до 20 градусов

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [57].

Также должна предусматриваться возможность регулировки экрана монитора [57]:

- 1) по высоте +3 см;
- 2) наклон относительно вертикали 10-20 градусов;
- 3) в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является ее размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырехугольную форму с закругленными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

В случае если работа оператора предполагает однообразную умственную работу, которая требует значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, то лучше всего выбирать неяркие, малоконтрастные цветовые оттенки (слабонасыщенные оттенки холодного голубого или зеленого цветов), которые не ослабляют внимание. Если работа требует большой умственной и физической напряженности, тогда следует использовать более теплые оттенки, которые способствуют повышению концентрации внимания [57].

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Производственные условия на месте выполнения работы характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые по природе возникновения делятся на следующие группы:

- 1) физические;
- 2) химические;
- 3) психофизиологические;
- 4) биологические.

Опасные и вредные факторы, которые могут воздействовать на персонал при работе на ПЭВМ, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [58]
2. Повышенный уровень электромагнитного излучения	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [59]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий [60]
4. Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [61]
5. Психофизиологические факторы	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [62]
6. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [63]
7. Пожаровзрывоопасность	ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ Пожаровзрывоопасность веществ и материалов [64]

К психологически вредным факторам, воздействующим на персонал, можно отнести:

- 1) нервно - эмоциональные перегрузки;
- 2) умственное напряжение;
- 3) физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы отсутствуют.

5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м² [57].

5.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Теплый	22-24	40	0,1

Отклонение показателей микроклимата от нормы не вызывает повреждений или нарушений состояния здоровья, но может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись

контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования [57].

5.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать таблице 5.4.

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы [57].

Таблица 5.4. Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- 1) увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- 2) применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

5.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

По нормативам [60] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:

- 1) комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
- 2) местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [65].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b, \quad (5.1)$$

где А – длина, м; В – ширина, м.

$$S = 4 \cdot 5 = 20 \text{ м}^2,$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50 \%$, свежепобеленного потолка $\rho_{II} = 70 \%$. Коэффициент запаса,

учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для светодиодных лент $Z = 1,1$.

Выбираем светодиоды Varton 9w, световой поток которых равен $\Phi_{лд} = 2900$ Лм.

Выбираем светильники со светодиодами типа Diora LPO. Этот светильник имеет две светодиодные ленты мощностью 9 Вт каждая, длина светильника равна 1260 мм, ширина – 124 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для светодиодных светильников с защитным рассеивателем лежит в диапазоне 1,1 – 1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.2)$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухлентовых светильников Diora: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.} \quad (5.3)$$

Из формулы

$$\Phi_n = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} \quad (5.4)$$

находим число светодиодных лент N

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_n \cdot \eta}. \quad (5.5)$$

η определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{(a \cdot b)}{h \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot 5}{2 \cdot (4 + 5)} = 1,1. \quad (5.6)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа Diora со светодиодными лентами при $\rho_{\Pi} = 70 \%$, $\rho_c = 50 \%$ и индексе помещения $i = 1,1$ равен $\eta = 0,45$.

Тогда

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2900 \cdot 0,45} = 7,59 \text{ лент.}$$

Принимаем количество светодиодных лент 8. При этом получается 4 светильника, т.е. 2 ряда по 2 светильника.

Потребный световой поток светодиодных ламп:

$$\Phi_n = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,45} = 2750 \text{ Лм.}$$

Из условий равномерности освещения определяем расстояния L_1 и $\frac{L_1}{3}$,

L_2 и $\frac{L_2}{3}$ по следующим уравнениям:

$$4000 = L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 124; L_1 = 2251 \text{ мм}, \frac{L_1}{3} = 750 \text{ мм}; \quad (5.7)$$

$$5000 = L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 2 \cdot 1260; L_2 = 1488 \text{ мм}, \frac{L_2}{3} = 496 \text{ мм}; \quad (5.8)$$

На рисунке 5.2 изображен план помещения и размещения светильников со светодиодными лентами в аудитории №246 10 корпуса НИ ТПУ.

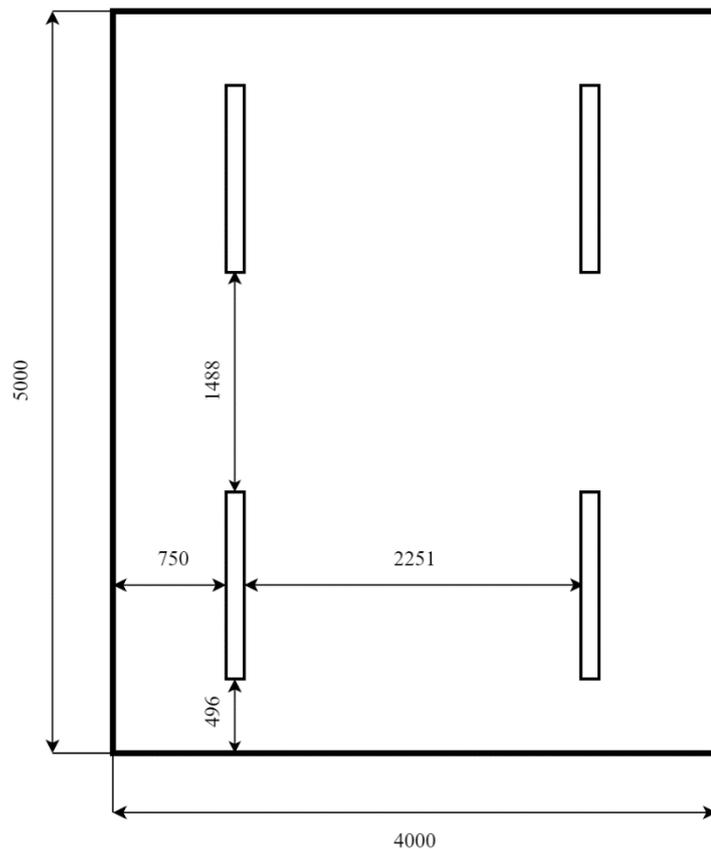


Рисунок 5.2. План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

$$\frac{-10\% \leq (\Phi_{л\delta} - \Phi_{л})}{\Phi_{л\delta}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (5.9)$$

$$\frac{(\Phi_{л\delta} - \Phi_{л})}{\Phi_{л\delta}} \cdot 100\% = \frac{(2900 - 2750)}{2900} \cdot 100\% = 5,17\%.$$

Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Мощность осветительной установки получилась:

$$P = 8 \cdot 9 = 72 \text{ Вт.}$$

Расчётное количество светильников соответствует фактически установленному в аудитории №246 10 корпуса НИ ТПУ.

5.2.6 Превышение уровня шума

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, оказывает влияние не только на слуховой анализатор, но действует на структуры головного мозга, вызывая сдвиги в различных функциональных системах организма. Среди многочисленных проявлений неблагоприятного воздействия шума на организм человека выделяются: снижение разборчивости речи, неприятные ощущения, развитие утомления и снижение производительности труда, появление шумовой патологии. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

В таблице 5.5 приведены нормы уровня шума при различных видах работ [61].

Таблица 5.5. Нормативы уровня шума при различных видах работ

	Максимально допустимый уровень шума (дБ), в полосах следующих октав (Гц)									Эквивалентные уровни шума, дБА
	86	71	61	54	49	45	42	40	38	
Научная работа, расчеты, конструирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Офисы, лаборатории	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

5.2.7 Психофизиологические факторы

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Трудовая деятельность работников непромышленной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов

информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональных на активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [57].

5.2.8 Поражение электрическим током

Рабочее помещение по опасности поражения электрическим током можно отнести ко 2 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности из-за возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой [63].

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- 1) при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- 2) при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- 3) при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- 4) при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развертки.

Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от:

- 1) рода и величины напряжения и тока;
- 2) частоты электрического тока;
- 3) пути прохождения тока через тело человека;
- 4) продолжительности воздействия на организм человека;
- 5) условий внешней среды.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства.

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава.

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта.

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся произвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- 1) обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- 2) применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;

3) использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения [66];

4) использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [63].

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

5.3 Экологическая безопасность

В работе проводится изучение процесса десублимации UF_6 в горизонтальные емкости методом математического моделирования. При этом используется ПЭВМ.

Влияние эксплуатации оборудования на окружающую среду минимально. Наибольший вред от них в работе – потребление электроэнергии. ПЭВМ не производит выбросов вредных веществ, не создает излучения, способного нарушить экологическую безопасность природы. Однако его производство и утилизация составляют серьезную проблему. Так, при производстве ПЭВМ и других устройств используются тяжелые, щелочноземельные металлы, ртуть, пластик и стекло, что без должной утилизации по окончании службы попадает в природу и остается в не переработанном виде от века до полутора тысяч лет [67].

Мероприятия, позволяющие сохранять экологическую безопасность находясь на рабочем месте:

- 1) Правильная утилизация ПЭВМ и других систем, а также их комплектующих;
- 2) Использование энергосберегающих ламп;
- 3) Использование аккумуляторов вместо солевых батареек.

Снижение уровня загрязнения окружающей среды возможно за счет более эффективного и экономного использования электроэнергии самими потребителями. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии [67].

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением, ответственно относиться к утилизации различных устройств, т.к. они могут разлагаться в окружающей среде от десятков до сотен лет.

5.4 Пожарная и взрывная безопасность

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [68]. Так как помещение лаборатории по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания [68]:

- 1) работа с открытой электроаппаратурой;
- 2) короткие замыкания в блоке питания;
- 3) несоблюдение правил пожарной безопасности;

4) наличие горючих компонентов.

Наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности веществом, применяемым в работе, является этанол.

Все работы с этанолом должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования.

При отборе проб, проведении анализа и обращении в процессе транспортных и производственных операций с этанолом применяются индивидуальные средства защиты по нормам выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств защиты, утвержденным в установленном порядке.

Для тушения горящего этанола применяют порошковые огнетушители, средства объемного тушения (минимальная огнетушащая концентрация: углекислого газа – 29 % (по объему), азота – 43 % (по объему), дибромтетрафторэтана – 2,1 % (по объему), песок, асбестовое одеяло и пену [68].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [68].

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации [68].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [65].

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для

предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [65]:

1) исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

2) правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

3) правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

4) обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

5) издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

6) соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

7) правильное размещение оборудования;

8) своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении пожара сообщить руководителю, органам противопожарной безопасности предприятия и приступить к тушению пожара огнетушителем.

При возникновении аварийной ситуации необходимо [68]:

1) сообщить руководству (дежурному);

2) позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС по телефону – 112;

3) принять меры по ликвидации последствий аварии в соответствии с инструкцией.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. В таблице 5.6 рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидация их последствий.

Таблица 5.6. Чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

№	Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
1	Пожар	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Соблюдение технологических режимов производства; Создание условий для эвакуации персонала	Вызов пожарной службы и спасателей (тел. 112); Вызов скорой медицинской помощи
2	Удар током	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Содержание энергетических сетей в исправном состоянии	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи

Продолжение таблицы 5.6.

№	Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
3	Травмирование в результате падения с высоты	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Создание систем предупреждения падений; Соблюдать требования безопасности при выполнении работ на высоте	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи

Выводы по разделу

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований:

- 1) микроклимат [65];
- 2) шум и вибрация [61];
- 3) электромагнитное излучение [59];
- 4) освещенность [65];
- 5) психофизиологические факторы [65];
- 6) электробезопасность [63];
- 7) пожаро-взрывобезопасность [68].

Помещение №246 10 корпуса ТПУ отнесено:

- 1) по электробезопасности – к 2 классу [63];
- 2) по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [68].

Также рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий.

Выводы

1. Создана, программно реализована и верифицирована математическая модель десублимации гексафторида урана в горизонтальной емкости.

Показано, что модель адекватно описывает процесс десублимации гексафторида урана в горизонтальной емкости.

2. С помощью созданной модели проведены исследования зависимости средней производительности емкости от ее геометрических размеров и использования хладагентов с разной температурой.

Установлено, что при уменьшении внутреннего диаметра емкости относительно диаметра стандартной емкости 48У до 0.80 м ее средняя производительность увеличивается в 2.1 раза, а площадь теплообменной поверхности в 1.5 раза.

Показано, что при использовании в качестве хладагента насыщенного раствора CaCl_2 с температурой минус 20°C средняя производительность емкости на 43% выше, чем при использовании воды с температурой 3°C и соответственно время заполнения емкости в 1.43 раза меньше.

3. Таким образом, показано, что изменение геометрических размеров емкости и температуры хладагента могут привести к существенному увеличению ее средней производительности.

Полученные результаты и разработанная математическая модель могут быть использованы для расчета и оптимизации работы коллектора горизонтальных емкостей для десублимации гексафторида урана в АО «СХК», а также на других разделительных предприятиях РФ.

Список используемой литературы

1. Основы химии и технологии мономеров: учебное пособие / Н.А. Платэ, Е.В. Сливинский. – М.: Наука: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. – 696 с.
2. Ожерельев О.А. Применение EXAFS-спектроскопии для исследования высокотемпературной сорбции фторидов на поверхности циркония / О.А. Ожерельев, А.С. Федин, Н.К. Мереуца // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 79 – 84.
3. Андреев А.А. Аспекты технологии получения диоксида титана переработкой ильменита фторидами аммония / А.А. Андреев, А.Н. Дьяченко // VIII Всероссийская конференция «Химия фтора»: тез. докладов. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – С. 114.
4. Ажажа В.М. Совершенствование процесса и оборудования сублимации тетрафторида циркония и гафния / В.М. Ажажа, Ю.П. Бобров, П.Н. Вьюгов и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – № 4. – С. 138 – 143.
5. Истомина И.А. Сублимационная очистка препарата молибдена-99 методом лазерного сканирования / И.А. Истомина, А.А. Мальцев, Ю.А. Занора // XIII научно-практическая конференция «Дни науки - 2013»: тез. докладов. – Озерск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – Т. 2. – С. 19 – 21.
6. Хасанов Р.Н. Разработка и проверка технологического процесса сублимационной очистки молибдена-99 / Р.Н. Хасанов, Ю.А. Ворошилов // XIII научно-практическая конференция «Дни науки - 2013»: тез. докладов. – Озерск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – Т. 2. – С. 42 – 44.
7. Пищулин В.П. Установка сублимационной очистки триоксида молибдена / В.П. Пищулин, Ф.В. Макаров, В.А. Тяхонов // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы Отраслевой научно-технической конференции, посвященной 70-летию НИЯУ МИФИ: тез. докладов. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 140.

8. Макаров Ф.В. Исследование очистки триоксида молибдена от оксидов урана методом сублимации при пониженном давлении / Ф.В. Макаров // Цветные металлы. – 2010. – № 3. – С. 83 – 86.
9. Булкин М.С. Сублимационная сушка сырья биологического происхождения с учетом флуктуаций в промышленных технологиях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Булкин Максим Сергеевич. – Москва, 2010. – 24 с.
10. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 частях. Часть 2 : учебник для вузов / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др. – М.: Высш. шк., 2001. – 680 с.
11. Скрипников Ю.Г. Инновационные технологии сушки растительного сырья / Скрипников Ю.Г., Митрохин М.А., Радионов Ю.В. и др. // Вопросы современной науки и практики. – 2012. – № 3 – с. 371 – 376.
12. Вильнина А.В. Экспериментальное исследование процесса десублимации от длительности цикла захлаживания / А.В. Вильнина, В.Ф. Дядик, С.А. Байдали и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. - № 2. – С. 91 – 93.
13. Вильнина А.В. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана / А.В. Вильнина, С.В. Ливенцов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5 – С. 133 – 136.
14. Orlov A.A. Methods of uranium hexafluoride purification / A.A. Orlov, R.V. Malyugin // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 43. – P. 46–49.
15. Orlov A.A. Way of obtain uranium hexafluoride / A.A. Orlov, R.V. Malyugin // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 43. – P. 338–341.
16. Orlov A.A. Desublimation for purification and transporting UF₆: process description and modeling / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin // Separation & Purification Reviews. – 2017. – Vol. 46. – N. 1. – P. 81–89.
17. Orlov A.A. Mathematical modeling of process of obtaining the solid uranium hexafluoride / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin // Key Engineering Materials – 2016 – Vol. 683 – P. 533–539.

18. Orlov A.A. Influence of the Inlet Valve Diameter, Container Volume, and of Horizontal Finning on the Rate of Filling a Container with UF_6 / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin, D.A. Leontjeva // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2019 – Vol. 92 – P. 460-466.
19. Orlov A.A. Influence of pressure in the collector and the refrigerant temperature to dynamics of filling tanks with smooth inner walls / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin, A. Kotelnikova, D.A. Leontjeva // AIP Conference Proceedings – 2019 – Vol. 2101 – N. 020001.
20. Orlov A.A. Desublimation of UF_6 in Vertically Finned Tanks / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering – 2020 – Vol. 54 – P. 178-183.
21. Orlov A.A. Mathematical Modeling of UF_6 Desublimation in a Tank with Horizontal Ribbing / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering – 2020 – Vol. 54 – P. 342-346.
22. Смирнов А.Ю. Особенности массопереноса промежуточных компонентов в прямоугольном каскаде из газовых центрифуг для разделения многокомпонентных смесей / А.Ю. Смирнов, Г.А. Сулаберидзе // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 572–579.
23. Смирнов А.Ю. Влияние профиля потока питания ступеней каскада на массоперенос промежуточных компонентов / А.Ю. Смирнов, Г.А. Сулаберидзе, В.Д. Борисевич // Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44, № 6. – С. 672–680.
24. Пат. 2344082 РФ, МПК В01D 7/00, В01D 3/10, В01D 53/24, С01G 43/06; Способ выделения гексафторида урана из многокомпонентных газовых смесей / А.В. Сапрыгин, И.В. Ворох, Т.С. Таманова, В.Д. Пирогов, А.Ю. Куркин, В.В. Козин, А.В. Наливайко ; заявл. 20.07.2008 ; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. – 1–7 с.

25. Короткевич В.М. Реализация программы «ВОУ–НОУ» на СХК / В.М. Короткевич, В.В. Лазарчук // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 1. – С. 93–100.
26. Разработка масс-спектрометрической с индуктивно–связанной методики анализа гексафторида урана с хроматографическим разделением урана и примесей на колонке со смолой UTEVA / В.М. Голик, С.Л. Иванов, А.В. Просвирякова и др. // Аналитика и контроль. – 2011. – Т. 15, № 2. – С. 174–181.
27. Борисевич В.Д. Обогащение урана на газовых центрифугах: повторение пройденного? / В.Д. Борисевич // 6-я Всероссийская научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». – Звенигород: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2002. – С. 7–11.
28. Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана / В.В. Раев, А.В. Сапрыгин, А.П. Цедилкин и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 125–130.
29. Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана / Г.С. Соловьев, А.В. Сапрыгин, В.М. Голик и др. // Всероссийская научно–практическая конференция “Фторидные технологии”: тез. докладов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 68.
30. Сухов С.В. Основы конструирования и расчета теплообменных аппаратов / С.В. Сухов, Г.М. Казаков. – Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2009.–60 с.
31. Виноградов С.Н. Выбор и расчет теплообменников : учебное пособие / С.Н. Виноградов, К.В. Таранцев, О.С. Виноградов. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2001. – 100 с.
32. Бажан П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Канавец, В.М. Селиверстов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 369 с.
33. Берман С.С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок / С.С. Берман – Москва : МАШГИЗ, 1959. – 423 с.
34. Семакина О.К. Машины и аппараты химических производств: учебное пособие / О.К. Семакина – Томск : Изд-во ТПУ, 2011. – 127 с.

35. Математическое моделирование процесса десублимации UF_6 / А.А. Орлов, С.М. Кошелев, В.И. Вандышев и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 89–92.
36. Семилет З.В. Оросительные теплообменники химических производств / З.В. Семилет. – Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. – 113 с.
37. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – Москва : Наука, 1975. – 636 с.
38. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы (в 2-х томах). / В.И. Крылов, В.В. Бобков, П.И. Монастырный – Москва : Наука, 1976, 1977. Т.1 – 304 с., Т.2 – 400 с.
39. Самарский А.А. Введение в численные методы: учебное пособие / А.А. Самарский. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 288 с.
40. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
41. Lutz M. Learning Python / M. Lutz. – Sebastopol : O'Reilly, 2013. – 1594 p.
42. Gorelick M., Ozsvald I. High Performance Python / M. Gorelick, I. Ozsvald. – Sebastopol : O'Reilly, 2014. – 370 p.
43. Прохоренок Н.А., Дронов В.А. Python 3 Самое необходимое / Н.А. Прохоренок, В.А. Дронов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2016. – 461 с.
44. Grayson J.E. Python and Tkinter Programming / J.E. Grayson. – Shelter Island : Manning, 2000. – 658 p.
45. Сузи Р.А. Создание приложений с графическим интерфейсом пользователя. Язык программирования Python: учебное пособие / Р.А. Сузи – Москва : Интуит, Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 328 с.
46. Крайнов А.В. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – 225 с.
47. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – Москва : Изд-во Энергия, 1975. – 488 с.

48. Кац Д. Химия урана: уран как элемент, его бинарные соединения, гидраты окислов и оксигалогениды / Д. Кац, Е. Рабинович ; пер. с англ. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1954. – 487 с.
49. Зуев В.А. Гексафториды актиноидов / В.А. Зуев, В.Т. Орехов – Москва : Энергоатомиздат, 1991 – 236 с.
50. Хазен М.М. Теплотехника / М.М. Хазен, Г.А. Матвеев, М.Е. Грицевский – Москва : Высшая школа, 1981 – 480 с.
51. Крайнов А.Ю. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений : учебное пособие / А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева – Томск : СТУ, 2016. – 44 с.
52. Дорофеева Л.И. Моделирование и оптимизация разделительных процессов: учебное пособие / Л.И. Дорофеева – Томск : Изд-во ТПУ, 2008 – 128 с.
53. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.
54. Кнышова Е. Н. Экономика организации: учебник / Е. Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форум Инфра-М, 2012. – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.
55. Шульмин В. А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В. А. Шульмин, Т. С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с.
56. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.
57. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».
58. СанПиН 2.2.4.548-96. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

59. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
60. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий».
61. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Санитарные нормы «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».
62. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
63. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
64. ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.
65. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
66. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
67. СанПиН 1.2.3685-21 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
68. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность.

Приложение А

Mathematical model of UF₆ desublimation into horizontal tanks

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Верлинский Максим Вадимович		

Консультант лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Зеремская Юлия Александровна	к.филол.н.		

Introduction

The UF₆ desublimation process is an integral part of uranium enrichment technology. Enriched and depleted in ²³⁵U isotope UF₆ streams at the outlet of the cascade of gas centrifuges are desublimated into transport tanks. In practice, the most common are vertical submersible transport tanks without internal ribs, with horizontal and vertical ribs, as well as horizontal transport tanks without internal ribs, which are mainly used for the import/export of UF₆ [1, 2].

Nowadays, to all practical purposes, an important question what tank (vertical or horizontal submerged) is more efficient for being used in the production of enriched uranium. The process of desublimation in vertically submerged transport tanks is currently well studied. Papers [3–8] describe the dependences of the dynamics of UF₆ desublimation into vertical submerged transport tanks on the temperature of gaseous UF₆; refrigerant temperature; pressure of gaseous UF₆ in the manifold; tank geometry; type of internal ribbing; geometry, location and number of ribs. The results of such studies on the UF₆ desublimation into horizontal tanks have not been published. In this regard, it is relevant to conduct research on the process of UF₆ desublimation into horizontal transport tanks in order to find out which type of tanks is preferable to use at the enrichment facilities. The most promising way to solve this kind of problems is to use mathematical modeling, because the experimental approach is expensive and takes a lot of time.

The aim of this work is the creation, software implementation and verification of a mathematical model of the UF₆ desublimation process into horizontal transport tanks.

Aim of research

The object of the research is a horizontal transport tank (Figure 1). The volume and geometrical dimensions of the tank are set and can vary. The tank is cooled by sprinkling its outer surface with a refrigerant (water) supplied from a pipe

(1) located on the axis of symmetry of the tank through nozzle. The refrigerant flows down the side walls of the tank in the form of a thin film and partially evaporates. A drip tray (3) is installed under the tank to collect the flowing refrigerant.

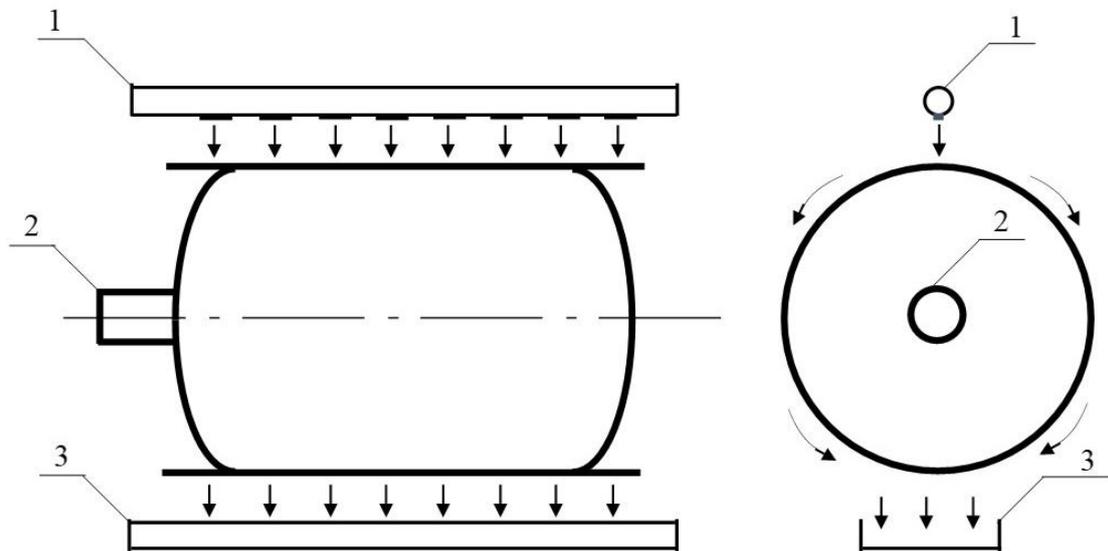


Figure 1. Horizontal tank

Mathematical model

The model is based on the following assumptions:

1. The UF_6 desublimation process takes place on a cylindrical surface of the tank that is sprayed with refrigerant.

2. The desublimated UF_6 at each moment of time is a cylinder with axial symmetry, which is due to the level pressure distribution of gaseous UF_6 inside the tank, as well as a slight change in the temperature of the refrigerant as it flows around the cylindrical wall of the tank.

3. The temperature of the outer surface of the cylindrical wall of the tank is constant and equal to the temperature of the refrigerant at the considered moment of time. The temperature of the inner wall of desublimated UF_6 is equal to the temperature in the transition phase (desublimation) of UF_6 for the current pressure in the tank.

4. The UF₆ desublimation process in the tank is quasi-stationary, i.e. the temperature distribution is linear and varies slightly with time.

The heat flux through the cylindrical surface of the UF₆ layer in the case of a quasi-stationary heat transfer process [9] is described by the equation (1):

$$\frac{dQ}{dt} = K\pi L(T_2 - T_1), \quad (1)$$

where dQ – the amount of heat passing through the given surface during the time dt , J·m⁻²·s⁻¹; L – the length of the surface (length of the cylindrical wall), m; T_1 – the temperature of the outer surface of the cylindrical wall of the tank, equal to the temperature of the refrigerant, °C; K – the coefficient of heat transfer through a two-layer surface, J·s⁻¹·m⁻¹·K⁻¹ [10]:

$$K = \frac{1}{\lambda_1 \ln \frac{R_1}{R_2} + \lambda_2 \ln \frac{R_2}{R_2-x}}, \quad (2)$$

where λ_1 – thermal conductivity of solid UF₆, J·s⁻¹·m⁻¹·K⁻¹; R_1 – outer radius of the cylindrical part of the tank, m; R_2 – inner radius of the cylindrical part of the tank, m; λ_2 – thermal conductivity of the tank wall, J·s⁻¹·m⁻¹·K⁻¹; x – thickness of desublimated UF₆ layer, m.

T_2 – phase equilibrium temperature at the UF₆ desublimation boundary, °C – the temperature ranged from 0 to 64 °C, is determined by the formula [11, 12]:

$$T_2 = \lg P - a + \frac{\sqrt{(a - \lg P)^2 - b \cdot (c - d \cdot \lg P)}}{e}, \quad (3)$$

where P – pressure of gaseous UF₆ in the tank, mm Hg; a , b , c , d , e – empirical coefficients: $a = 7,7661648$, $b = 0,0301508$, $c = 228,09988$, $d = 183,416$, $e = 0,0150754$.

The amount of heat Q [13] passing through the surface of the tank is described by the equation:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (4)$$

where Q_1 – the amount of heat released during the transition of gaseous UF₆ to a solid state, J; Q_2 – the amount of heat released during cooling of desublimated UF₆ when the temperature changes from the phase transition temperature to the

temperature of the stationary state, J ; Q_3 – the amount of heat transferred by gaseous UF_6 during phase change, J .

Since Q_3 is insignificant (the heat capacity and density of gaseous UF_6 are much less than these characteristics of UF_6 in the solid phase), we will assume it to be zero, then equation (4) is transformed to the form:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (5)$$

To simplify the calculations, it should be transformed the expression for Q_2 , proceeding from the fact that the thickness of the desublimated UF_6 layer compared to the radius of the cylindrical part of the tank is small, therefore, the dependence of the temperature T on the thickness of the desublimated UF_6 layer x can be considered linear. Then, with the increase of the layer thickness by dx , the amount of heat Q_2 will be equal to the half of the amount of heat released during the cooling of the layer with the thickness dx from the temperature T_2 to the temperature of the outer surface of the cylindrical wall.

In this way, equation (5) is transformed into the equation:

$$\frac{dQ}{dt} = \left(r + \frac{c \cdot (T_2 - T_1)}{2} \right) \frac{dm}{dt}, \quad (6)$$

where r – specific heat of UF_6 phase transition, $J \cdot kg^{-1}$; c – specific heat at constant pressure, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; $\frac{dm}{dt}$ – the change rate of desublimated UF_6 mass, $kg \cdot s^{-1}$.

The amount of heat released by the system is equal to the amount of heat generated in it, then taking into account equations (1) and (6):

$$K\pi L(T_2 - T_1) = \left(r + \frac{c \cdot (T_2 - T_1)}{2} \right) \frac{dm}{dt}. \quad (7)$$

The dynamics of the uranium hexafluoride mass is described by the equation:

$$\frac{dm}{dt} = 2\rho\pi L(R_2 - x) \frac{dx}{dt}, \quad (8)$$

where ρ – density of solid UF_6 , $kg \cdot m^{-3}$.

Substituting equation (7) in (6) and expressing $\frac{dx}{dt}$, we obtain the main calculated differential equation:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho \cdot (T_2 - T_1) \cdot (R_2 - x)}{2 \cdot \left(r + \frac{c \cdot (T_2 - T_1)}{2} \right) \cdot \left(\lambda_1 \ln \frac{R_1}{R_2} + \lambda_2 \ln \frac{R_2}{R_2 - x} \right)}. \quad (9)$$

For the initial condition $t_0 = 0$, $x(t_0) = 0$, the differential equation (9) is numerically solved by the fourth order-Runge Kutta method. [14]. Each subsequent value of the layer thickness of desublimated UF₆ x_{i+1} will be found using the previous x_i by the formula:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{dt}{6} (y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4), \quad (10)$$

where dt – time step; $y_1 = f(x_i)$; $y_2 = f(x_i + 0,5 \cdot dx \cdot y_1)$; $y_3 = f(x_i + 0,5 \cdot dx \cdot y_2)$; $y_4 = f(x_i + dx \cdot y_3)$. Here $f(x)$ is the right-hand side of equation (9).

For each value of the layer thickness of desublimated UF₆ x , the mass value of the desublimated UF₆ is found by the formula:

$$m = \rho \pi L (R_2^2 - (R_2 - x)^2). \quad (11)$$

According to the rules for storing/transporting UF₆, the tank must be filled up to 70% of its free volume. Consequently, the calculation should stop when the mass of desublimated UF₆ reaches $m = 0,7 \cdot \rho \cdot V$, where V - the volume of the tank.

The mathematical model is implemented as a program in Python 3.8 in the PyCharm 2020.1 environment.

Verification of the mathematical model

Using the created and software-implemented mathematical model, the calculations of the dynamics of filling a horizontal transport tank 48Y with a volume of 4,04 m³ with desublimated UF₆ up to 70% of its free volume have been carried out at a pressure of UF₆ 250 mm Hg in the collector, and refrigerant temperature 3 °C.

The calculated time dependence of the mass of desublimated UF₆ is shown in Figure 2 along with the experimental data obtained under similar conditions.

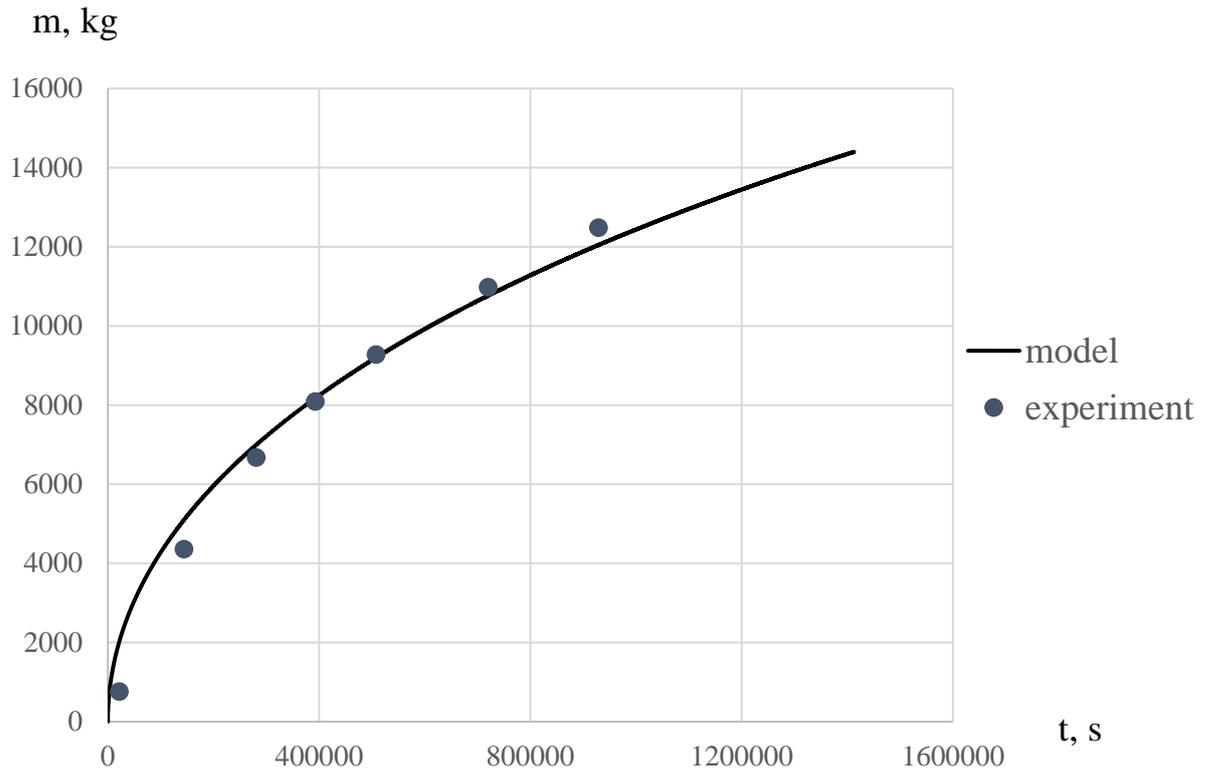


Figure 2. The dynamics of filling a horizontal tank with desublimated UF_6

Figure 2 shows that the calculated and experimental data have satisfactory convergence. Consequently, the mathematical model adequately describes the UF_6 desublimation process into a horizontal transport tank.

The time for filling the tank up to 70% of its free volume is 392 hours, the final mass of desublimated UF_6 is 14400 kg, the average productivity of the tank is 36,687 kg / hour.

Influence of tank sizes on its average productivity

The dependence of the average productivity of a horizontal tank with the volume of 4 m^3 on its length (diameter) at a UF_6 pressure (250 mm Hg) in the collector, refrigerant temperature (3°C), gaseous UF_6 temperature (30°C), pressure in an empty tank (4 mm Hg), wall thickness of the tank (12.7 mm). A standard 48Y tank with a volume of 4 m^3 has an inner diameter of 1.22 m and a length of 3.73 m. In the calculations, the volume of the tank was kept constant, the diameter of the

tank varied from 0.80 m to 1.60 m, and the length from 8.30 m to 2.28 m, respectively. The range of tank dimensions is limited. It was chosen based on the dimensions of the railway cars in which these tanks are transported and the need to install two valves (inlet and suction) on the end surface of the tank.

The calculation results are presented in Table 1.

Table 1. The study results of the dependence of the average productivity of a horizontal tank with the volume of 4 m³ on its geometric dimensions

Inner diameter, m	Length, m	Average productivity, kg/h	Heat exchange surface area, m ²
0.80	8.30	74.34	20.87
0.85	7.39	66.54	19.72
0.90	6.62	60.00	18.71
0.95	5.97	54.47	17.81
1.00	5.41	49.75	17.00
1.05	4.93	45.69	16.27
1.10	4.52	42.17	15.61
1.15	4.16	39.11	15.02
1.20	3.84	36.42	14.47
1.22	3.73	35.48	14.28
1.25	3.56	34.06	13.98
1.30	3.31	31.96	13.52
1.35	3.09	30.09	13.10
1.40	2.89	28.43	12.72
1.45	2.71	26.94	12.36
1.50	2.55	25.59	12.03
1.55	2.41	24.38	11.73
1.60	2.28	23.28	11.44

Table 1 shows that with a decrease in the inner diameter and an increase in the length of the tank, its average productivity and the area of the heat exchange surface increase.

With a decrease in the inner diameter of the tank relative to the diameter of the standard tank 48Y (highlighted in the table by filling) to 0.80 m, its average productivity increases by a factor of 2.1, and the area of the heat exchange surface, by a factor of 1.5.

The increase in the average productivity of the tank is explained, firstly, by an increase in the area of the heat exchange surface, and secondly, by the fact that the layer of desublimite formed in a tank with a smaller diameter when filled to 70% is less than in a tank with a large diameter.

Influence of the refrigerant choice and its temperature on the average productivity of the tank

As shown in the overview chapter, two refrigerants are used to desublimite uranium hexafluoride: water (temperature limit is 3°C) and saturated CaCl₂ solution (temperature limit is 20°C below zero). In this regard, it was interesting to compare the operation of a horizontal tank when using refrigerants with different temperatures.

To do this, using our mathematical model, we calculated the filling parameters of a horizontal tank 48Y with the volume of 4 m³ using water at a temperature of 3°C as a refrigerant and a saturated solution of CaCl₂ at a temperature of 20°C below zero, at a UF₆ pressure of 250 mm Hg in the collector, with the temperature of gaseous UF₆ of 30°C, with the pressure of 4 mm Hg in an empty tank, with the wall thickness of the tank of 12.7 mm. The dynamics of filling the tank with uranium hexafluoride has been studied.

The calculation results are shown in Figure 3.

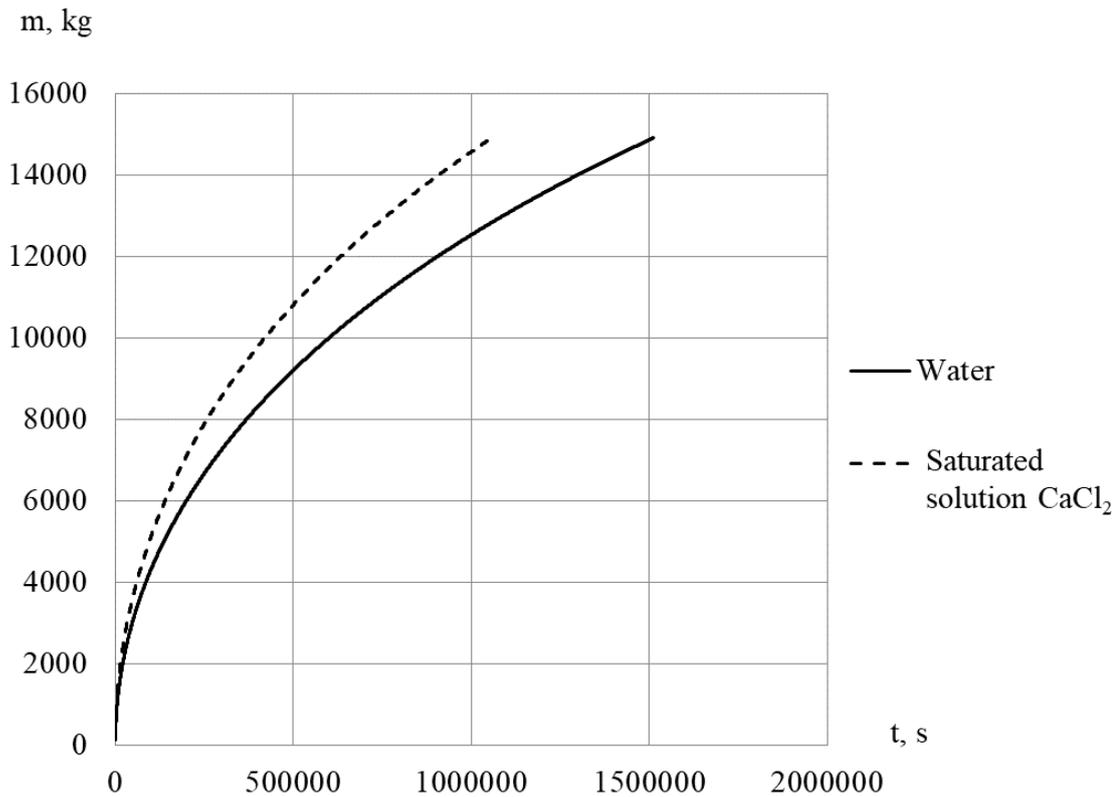


Figure 3. Dynamics of filling a horizontal tank 48Y with uranium hexafluoride using various refrigerants

Figure 3 shows that when a saturated CaCl_2 solution with the temperature of 20°C below zero is used as a refrigerant, the time for filling the tank is 1.43 times less than when the temperature of water used as a refrigerant is 3°C . Accordingly, the average capacity of the tank when using a CaCl_2 solution is 43% higher than when using water.

Conclusion

A mathematical model of desublimation of uranium hexafluoride in a horizontal tank has been created, implemented in software and verified.

It is shown that the model adequately describes the desublimation process of uranium hexafluoride in a horizontal tank.

With the help of the created model, studies of the dependence of the average capacity of the tank on its geometric dimensions and the use of refrigerants with different temperatures were carried out.

It has been established that with a decrease in the inner diameter of the tank relative to the diameter of the standard 48Y tank to 0.80 m, its average productivity is increased by 2.1 times, and the area of the heat exchange surface by 1.5 times.

It is shown that when a saturated solution of CaCl_2 with the temperature of 20°C below zero is used as a refrigerant, the average productivity of the tank is 43% higher than when using water with the temperature of 3°C and, respectively, the filling time of the tank is 1.43 times less.

Thus, it is shown that changing the geometric dimensions of the tank and the temperature of the refrigerant can lead to a significant increase in its average productivity.

References

1. Orlov A.A., Malyugin R.V. Methods of Uranium Hexafluoride Purification 2015 *Advanced Materials Research : Radiation and nuclear techniques in material science Scientific Journal* **1084** 46
2. Orlov A.A., Malyugin R.V. Way to Obtain Uranium Hexafluoride 2015 *Advanced Materials Research : Radiation and nuclear techniques in material science Scientific Journal* **1084** 338
3. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Desublimation for Purification and Transporting UF₆: Process Description and Modeling 2016 *Separation and Purification Reviews* **46** 81
4. Orlov A.A., Malyugin R.V., Tsimbalyuk A.F. Mathematical Modeling of Process of Obtaining the Solid Uranium Hexafluoride 2016 *Key Engineering Materials Scientific Journal* **683** 533
5. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Leontjeva D.A. Influence of the Inlet Valve Diameter, Container Volume, and of Horizontal Finning on the Rate of Filling a Container with UF₆ 2019 *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* **92** 460
6. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Kotelnikova A., Leontyeva D.A. Influence of pressure in the collector and the refrigerant temperature to dynamics of filling tanks with smooth inner walls 2019 *AIP Conference Proceedings* **2101** 020001
7. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Desublimation of UF₆ in Vertically Finned Tanks 2020 *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* **54** 178
8. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Mathematical Modeling of UF₆ Desublimation in a Tank with Horizontal Ribbing 2020 *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* **54** 342
9. Krainov A.Yu. 2016 *Basics of heat transfer. Heat transfer through a layer of substance* (Tomsk: STT)

10. Isachenko V.P. *et al* 1975 *Heat transfer* (Moscow: Energiya)
11. Katz J., Rabinovich E. 1954 *Chemistry of uranium* (Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury)
12. Zuev V.A., Orehov V.T. 1991 *Actinide hexafluorides* (Moscow: Energoatomizdat)
13. Matveev G.A. 1981 *Heat engineering* (Moscow: Vyshaya shkola)
14. Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. 2016 *Numerical solution methods boundary value problems for ordinary differential equations* (Tomsk: STT)