

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

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

<b>Тема работы</b> <b>Влияние толщины и материала стенок емкостей на скорость десублимации гексафторида урана</b>
--

УДК 621.039.548:536:661.87.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Алибаев Эльдар Кусаинович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Малюгин Р.В.	к.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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  
 \_\_\_\_\_ Бычков П.Н.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Д	Алибаев Эльдар Кусаинович

Тема работы:

Влияние толщины и материала стенок емкостей на скорость десублимации гексафторида урана	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1383/с от 21.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники по основам процесса десублимации $UF_6$ и особенностям процесса десублимации на разделительных предприятиях. Математическая модель нестационарного процесса десублимации $UF_6$ в вертикальные погружные емкости.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор и анализ литературы</li> <li>2. Описание математической модели десублимации в вертикальные погружные емкости</li> <li>3. Результаты расчетов, их анализ</li> <li>4. Экономический расчет</li> <li>5. Охрана труда и техника безопасности</li> <li>6. Выводы. Заключение</li> </ol>

<b>Перечень графического материала</b>	Графики: Динамика заполнения емкости объемом 1 м <sup>3</sup> при изменении толщины ее стенок; Зависимости скорости десублимации UF <sub>6</sub> от толщины стенки емкости; Зависимость скорости десублимации UF <sub>6</sub> от толщины стенки емкости при времени заполнения t = 300 с; Динамика заполнения емкости объемом 1 м <sup>3</sup> при изменении коэффициента теплопроводности стенки; Зависимость скорости десублимации UF <sub>6</sub> от коэффициента теплопроводности материала стенки емкости; Зависимость скорости десублимации UF <sub>6</sub> от коэффициента теплопроводности материала стенки при времени заполнения t = 1500с; Зависимость скорости десублимации UF <sub>6</sub> от времени, коэффициента теплопроводности, и толщины стенки.
--	--

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Скорость десублимации UF <sub>6</sub> в вертикальной погружной емкости	Ассистент Отделения ядерно-топливного цикла, к.ф.-м.н. Малюгин Роман Владиславович
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Ассистент Отделения ядерно-топливного цикла, к.ф.-м.н. Гоголева Т.С.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Малюгин Р.В.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Алибаев Э.К.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

### «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b> 0А5Д	<b>ФИО</b> Алибаев Эльдар Кусаинович
-----------------------	---

<b>Инженерная школа</b>	ИШЯТ	<b>Отделение</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление</b>	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, информационных и человеческих, финансовых,	1. Стоимость расходных материалов 2. Тариф на электроэнергию 3. Должностные оклады исполнителей
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1. Ставки НДС и социального налога
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Выполнить
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Выполнить
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Выполнить
<b>Перечень графического материала:</b>	
1. График проведения НИ	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	Доцент, к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А5Д	Алибаев Э.К.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А5Д	Алибаев Эльдар Кусаинович

<b>Школа</b>	<b>ИШЯТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	Ядерные физика и технологии

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды: микроклимат, шум, вибрация, освещение, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ПЭВМ;</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды: электрического тока, пожарная и взрывная безопасность;</li> </ul>
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> </ul>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защиты).</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (причины, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

### Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А5Д	Алибаев Э.К.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает в себя: 82 страниц, 10 таблиц, 22 рисунков, 48 библиотечных ссылок.

Ключевые слова: математическое моделирование, десублимация, аппроксимация, гексафторид урана, тепло- и массоперенос, толщина стенки емкости, материал стенки емкости.

Объект исследования: процесс десублимации гексафторида урана в вертикальную погружную емкость без оребрения объемом  $1\text{ м}^3$ .

Цель работы: проведение численного моделирования процесса десублимации  $\text{UF}_6$  в вертикальную погружную емкость без оребрения объемом  $1\text{ м}^3$ , определение влияния толщины и материала стенки емкости на ее среднюю производительность.

В процессе исследования проводились: расчет динамики заполнения десублимированным  $\text{UF}_6$  вертикальной погружной емкости без оребрения объемом  $1\text{ м}^3$  при изменении толщины стенок емкости от  $5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$  до  $20 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ , и коэффициента температуропроводности материала стенок емкости от  $2,58 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$  до  $12,9 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ . Определен характер зависимости скорости десублимации  $\text{UF}_6$  от времени, толщины стенки емкости и коэффициента ее температуропроводности.

В результате проведенного численного моделирования показано, что увеличение толщины стенки емкости с  $5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$  до  $20 \cdot 10^{-3}\text{ м}$  приводит к снижению средней производительности емкости на  $0,2\%$ ; увеличение коэффициента температуропроводности материала стенки емкости с  $2,58 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$  до  $12,9 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$  приводит к увеличению средней производительности емкости на  $0,1\%$ .

Получена аппроксимирующая формула зависимости скорости десублимации  $\text{UF}_6$  от времени, толщины стенки емкости и коэффициента ее температуропроводности:

$$v(h, a, t) = (138 \cdot t^{-0,60717} + 5,66 \cdot a^{-0,0046} - 1,28473 \cdot h + 1,84) \cdot 10^{-6}$$

Было показано, что при выборе материала и толщины стенки емкости, главными критериями являются прочностные и конструкционные параметры, т.к. влияние, оказываемое на скорость десублимации стенкой емкости, проявляется только на начальных этапах процесса, и практически не сказывается на средней производительности.

Область применения: Полученные в ходе работы данные вносят определенный вклад в теоретическое исследование процесса десублимации  $UF_6$ ; полученная аппроксимирующая формула скорости десублимации  $UF_6$  от времени, толщины стенки емкости и ее теплофизических свойств в дальнейшем может быть использована при проведении расчетов динамики заполнения вертикальных погружных емкостей.

## **Сокращения и обозначения**

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

$UF_6$  – гексафторид урана;

$^{235}U$  – изотоп урана с атомной массой 235;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

КИУ – конденсационно-испарительная установка;

ИММ – итерационно-интерполяционный метод;

МНК – метод наименьших квадратов;

ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина;

НИР – научно-исследовательская работа.

## Оглавление

Введение.....	12
1 Применение процесса десублимации в ядерно-топливном цикле.....	15
1.1 Способы получения UF <sub>6</sub> на сублиматных производствах .....	15
1.2 Десублимация на разделительных производствах.....	23
1.3 Физические и химические свойства UF <sub>6</sub> .....	26
2 Математическая модель .....	29
2.1 Объект исследования .....	29
2.2 Одномерная модель .....	30
2.3 Итерационно – интерполяционный метод .....	32
3 Влияние толщины и материала стенок емкостей на скорость десублимации гексафторида урана .....	36
3.1 Метод наименьших квадратов.....	36
3.2 Влияние толщины стенки на скорость десублимации UF <sub>6</sub> .....	41
3.3 Влияние коэффициента температуропроводности на скорость десублимации UF <sub>6</sub> .....	45
3.4 Зависимости скорости десублимации UF <sub>6</sub> от времени и параметров материала стенки емкости.....	50
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	51
4.1 Организация и планирование работы .....	51
4.1.1 Продолжительность этапов работ .....	52
4.1.2 Расчет накопления готовности проекта.....	57
4.2 Расчет сметы на выполнение проекта.....	58
4.2.1 Расчет затрат на материалы .....	58
4.2.2 Расчет заработной платы.....	59
4.2.3 Расчет затрат на электроэнергию .....	61
4.2.4 Расчет амортизационных расходов.....	62
4.2.5 Расчет прочих расходов .....	63
4.2.6 Расчет прибыли .....	64
4.3 Оценка экономической эффективности проекта .....	64

5 Социальная ответственность .....	65
5.1 Характеристика вредных и опасных факторов.....	66
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ...	67
5.2.1 Организационные мероприятия .....	67
5.2.2 Технические мероприятия .....	67
5.2.3 Условия безопасной работы с ПЭВМ.....	70
5.2.4 Электробезопасность.....	72
5.2.5 Пожарная безопасность.....	74
Вывод.....	77
Список используемой литературы .....	78

## Введение

Десублимация – это процесс перехода вещества из газообразной фазы в твердую, минуя жидкое состояние. Обратным процессом является сублимация, в результате которой происходит переход из твердого состояние в газообразное [1].

Процессы десублимации и сублимации нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, они используются в ряде химических производств (например, при получении йода, фталевого ангидрида, малеинового ангидрида, антрахинона, фталонитрила, хлорида алюминия [1] и т.д.), в металлургии (например, при производстве циркония [2,3], гафния [3], титана [3, 4], молибдена [4], мышьяка [5-8] и других металлов) для получения веществ и/или их разделения. Также эти процессы используются в легкой и пищевой промышленности [9, 10], медицине [11], при разделении парогазовых смесей [12] и др.

Кроме того, совместно процессы сублимации и десублимации активно используются в ядерно-топливном цикле [13-15]. В качестве рабочего вещества при обогащении урана по легкому изотопу ( $^{235}\text{U}$ ) в каскадах газовых центрифуг используется  $\text{UF}_6$ , его получают фторированием на сублиматных производствах, где с помощью десублимации очищают от примесей, переводят в твердое состояние и в специальных емкостях отправляют на разделительные производства. Далее емкости с  $\text{UF}_6$  подключаются к коллектору питания, с помощью индукторов происходит их нагрев,  $\text{UF}_6$  сублимируется, проходит очистку от легких примесей и подается на питание разделительного каскада. На выходе разделительного каскада получают потоки обогащенного и обедненного по  $^{235}\text{U}$  газообразного  $\text{UF}_6$ , которые десублимируются в транспортные емкости. Емкости с обогащенной фракцией отправляют на предприятия по изготовлению ТВЭЛов, емкости с обедненной – на склад для длительного хранения [14, 15].

Строительство и ввод в эксплуатацию новых АЭС в мире (на текущий момент времени строительство ведется в таких странах, как Турция, Белоруссия, Финляндия, Индия, Китай, Россия) приводит к тому, что все большее число стран стремится овладеть технологией обогащения изотопов урана (например, Иран, Китай), а также возрастает конкурентная борьба между уже существующими производителями ядерного топлива за рынки сбыта своей продукции.

В связи с этим на разделительных предприятиях ядерно-топливного цикла России (ГК Росатом) непрерывно осуществляется модернизация технологического оборудования, заключающаяся в оптимизации производственных и эксплуатационных затрат и направленная на снижение цены ядерного топлива для потребителя [13]. В частности, газовые центрифуги заменяются на новые, более производительные, что, в свою очередь, требует увеличения производительности конденсационно-испарительных установок (КИУ), предназначенных для сублимации и десублимации  $UF_6$  и являющихся неотъемлемой частью технологии, используемой на предприятиях по обогащению урана.

Решить задачу повышения производительности КИУ 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, т.к. возможности такого подхода ограничены и требуют проведения длительных и дорогостоящих экспериментов, и одним из перспективных путей решения является разработка математических моделей процессов сублимации и десублимации  $UF_6$  для дальнейшего исследования технологических режимов работы оборудования, оптимизации геометрии

емкостей, разработки и создания коллекторов повышенной производительности.

В связи с вышесказанным актуальными являются работы, направленные на исследование зависимостей скорости десублимации от толщины и материала стенки емкости.

# 1 Применение процесса десублимации в ядерно-топливном цикле

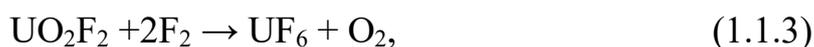
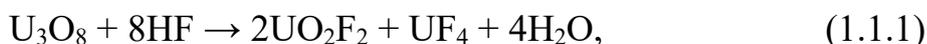
## 1.1 Способы получения UF<sub>6</sub> на сублиматных производствах

Полученное на рудных фабриках сырье в виде U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> [16] для его дальнейшего участия в ЯТЦ необходимо перевести в соединение UF<sub>6</sub>, применение которого в качестве рабочего вещества на разделительных предприятиях объясняется возможностью обогащения его в газовой фазе и моноизотопностью природного фтора, что облегчает процесс разделения изотопов урана (смесь состоит из двух изотопов) [17].

Известные способы получения UF<sub>6</sub> без применения фтора [18, 19], такие как диспропорционирование UF<sub>5</sub> и взаимодействие сухого кислорода с UF<sub>4</sub> при температуре 800°C, используются только в лабораторных и полупромышленных масштабах и не нашли широкого применения, в связи с образованием побочных соединений урана, которые требуется выводить из системы и повторно перерабатывать [19]. Использование галогенфторидов (ClF, ClF<sub>3</sub>, BrF<sub>3</sub> и другие) и фторидов металлов (AgF<sub>2</sub>, CoF<sub>3</sub>, HgF<sub>2</sub>) помимо указанных проблем с отделением продуктов реакции от UF<sub>6</sub> приводит к сложностям с подбором конструкционных материалов в связи с высокой коррозионной активностью реагентов [19].

В связи совершенствованием процесса электролитического получения фтора основным промышленным способом получения UF<sub>6</sub> является непосредственное фторирование урана в атмосфере газов HF и F<sub>2</sub> [18-21].

Операция фторирования может быть реализована на аппаратах нескольких типов [20]: в шнековых реакторах (рисунок 1), уже практически не используемых в связи со своей низкой производительностью, в аппаратах псевдооживленного слоя (рисунок 2) и в пламенных реакторах (рисунок 3), например, по следующим реакциям:





При получении  $\text{UF}_6$  в аппаратах псевдоожиженного слоя (рисунок 2) в качестве исходного сырья используют  $\text{UF}_4$ , постоянный псевдоожиженный слой создается гранулами  $\text{CaF}_2$ . На входе в реактор для снижения температуры горения фтор разбавляется азотом и при температуре 450–500°C в результате реакции (1.1.4) образуется газообразный  $\text{UF}_6$ . Достоинствами аппаратов данного типа являются хорошее терморегулирование реакции фторирования и отсутствие местных перегревов. Недостатками этого способа можно считать потери 1 – 2% урана, который не удастся извлечь из псевдоожиженного слоя, требование высокой степени однородности частиц  $\text{UF}_4$  и  $\text{CaF}_2$  по размеру и плотности, а также образование трудно вскрываемых нелетучих комплексных соединений типа  $\text{CaUF}_6$ ,  $\text{Na}_3\text{UF}_7$  и др., которые требуется извлекать из псевдоожиженного слоя и повторно перерабатывать [21].

Технология получения  $\text{UF}_6$  в пламенных ректорах (рисунок 3) более чувствительна к морфологии и размеру частиц, чем к химической формуле исходного соединения урана, поэтому в качестве сырья могут использоваться как оксидные соединения урана, так и  $\text{UF}_4$  [20]. Преимуществом оксидного сырья является упрощение технологической схемы получения  $\text{UF}_6$  (исключаются стадии восстановления высших оксидов до диоксидов и гидрофторирования диоксида до тетрафторида урана), а также отсутствие в системе промежуточных фторидов урана [20, 21]. Использование  $\text{UF}_4$  значительно повышает концентрацию гексафторида урана на выходе реактора, сокращает количество тепла, выделяющегося при фторировании, что облегчает охлаждение реактора, а также уменьшает удельный расход фтора [20, 21]. За рубежом более распространены схемы получения  $\text{UF}_6$  с использованием тетрафторида урана, в России используют оба вида исходного сырья [20].

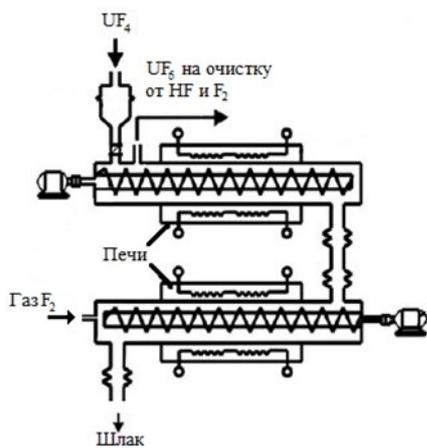


Рисунок 1. Шнековый реактор

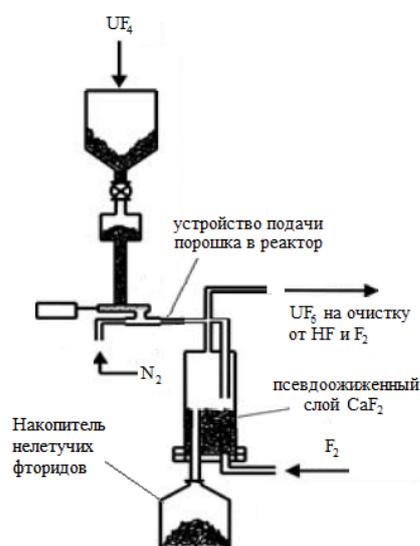


Рисунок 2. Реактор псевдоожиженного слоя

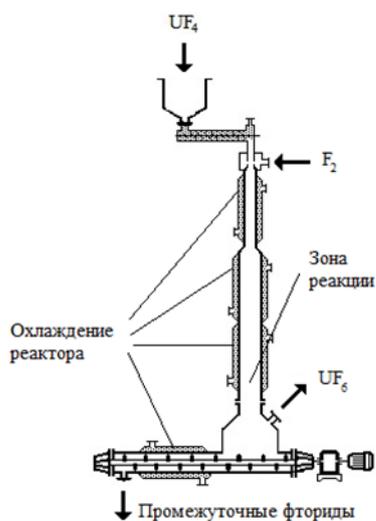


Рисунок 3. Пламенный реактор

Фторирование в пламенных реакторах происходит при температуре 900...1100°C, при этом температуру стенок реактора необходимо поддерживать в интервале 450...500°C. Понижение температуры стенок приводит к образованию промежуточных фторидов и их налипанию на стенки, что сопровождается резким ухудшением условий теплоотдачи, а повышение температуры стенок способствует разрушению материала стенок реактора. Преимуществом пламенных реакторов является большая производительность и максимальная степень реагирования фтора, к недостаткам можно отнести жесткие требования к чистоте сырья и необходимость строгого контроля за параметрами процесса [19, 20].

В зависимости от типа используемого сырья концентрация  $UF_6$  в составе продуктов фторирования изменяется от 45 % (при использовании  $UF_4$ ) до 75 % (при использовании оксидов урана), соответственно изменяется и концентрация примесей [19, 20].

Далее полученная парогазовая смесь пропускается через фильтр для очистки от пыли и твердых частиц и направляется в десублиматор в нагретом состоянии, где происходит ее охлаждение и десублимация на стенках аппарата, а затем затаривается в транспортные емкости и направляется на разделительные производства. Десублимация  $UF_6$  в объеме в виде кристаллов и аэрозолей не желательно, поскольку ведет к уносу продукта из аппарата вместе с газообразными примесями, поэтому для устранения или уменьшения влияния объемной десублимации применяют аппараты с обновляющейся или развитой поверхностью [22].

Известны следующие типы десублиматоров [23]: скребковые (с обновляющейся поверхностью); с тепловым сбросом (с обновляющейся поверхностью); с развитой поверхностью (с U-образными трубками); многокамерные с одной теплой стенкой; многокамерные с двумя теплыми стенками; десублиматоры комбинированного типа.

В вертикальных десублиматорах скребкового типа (рисунок 4) реализуется механическое обновление поверхностей теплообмена.

Парогазовая смесь I поступает в охлаждаемый цилиндрический аппарат 1. Газообразный  $UF_6$  десублимируется на внутренней поверхности аппарата, срезается скребками 2, расположенными на непрерывно вращающемся валу, после чего  $UF_6$  и газообразные примеси выводятся из аппарата (потoki II и III соответственно). В настоящее время в связи со сложностью обеспечения герметичности корпуса аппарата (наличием движущихся частей и уплотнений вала) и повышенным износом скребков и корпуса конструкции такого типа на сублиматных производствах  $UF_6$  не применяются.

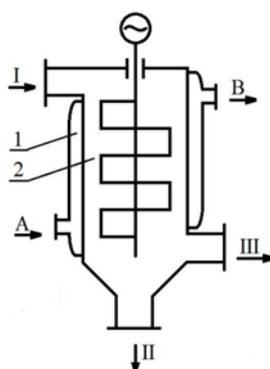


Рисунок 4. Скребокый десублиматор

Десублиматор с тепловым сбросом (рисунок 5) состоит из цилиндрического корпуса 1, обогреваемого рубашкой 2. На крышке корпуса в несколько рядов крепятся охлаждающие элементы 3 (трубки Фильда), в которые подается хладагент (потoki A, B) или теплоноситель. Десублимация  $UF_6$  происходит на внешней поверхности трубок при подаче в них хладагента, по мере увеличения толщины слоя десублимата в один из рядов трубок вместо хладагента подается теплоноситель, после чего происходит сброс  $UF_6$  в транспортные емкости и с поверхности трубок этого ряда (поток II). Таким образом постепенно осуществляется непрерывное обновление всей теплообменной поверхности аппарата. Десублиматоры с тепловым сбросом имеют высокую производительность, поэтому применяются в крупнотоннажных производствах [22, 23]. Их недостатками можно считать высокую степень проскальзывания целевого продукта в момент сброса

десублимата и повышенную энергоемкость вследствие периодичности процессов нагрева и охлаждения.

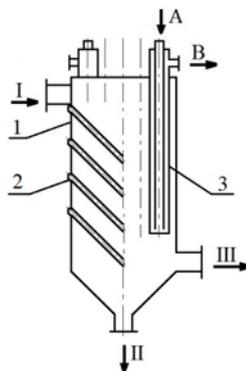


Рисунок 5. Десублиматор с тепловым сбросом

Схема десублиматора с развитой поверхностью представлена на рисунке 6. Парогазовая смесь I подается в корпус 1, и целевой продукт десублимируется на охлаждаемых хладагентом стенках U – образных трубок. В центре аппарата установлена перегородка 2, позволяющая равномерно распределять парогазовую смесь вдоль всей длины трубок. Такие аппараты в отличие от десублиматоров других типов не являются стационарными и сразу после заполнения готовы к транспортировке на разделительные предприятия.

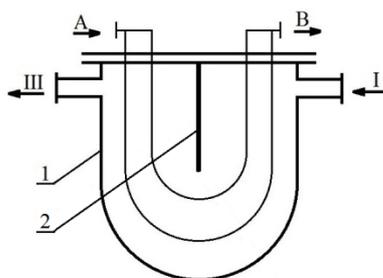


Рисунок 6. Десублиматор с развитой поверхностью

Схема вертикального многокамерного десублиматора с одной теплой стенкой приведена на рисунке 7. В холодильную камеру, помещенную в корпусе 1, подается парогазовая смесь I. Снаружи корпус обогревается электронагревателями 2 до температуры, превышающей температуру сублимации целевого продукта. Хладагент поступает в охлаждающие

элементы 3, на внешней поверхности которых расположены ребра, образующие десублимационные камеры 4 (вид Е).  $UF_6$  десублимируется в камерах последовательно от входа парогазовой смеси к выходу, при этом образующиеся аэрозоли проходят по зазору 5 шириной  $\delta$  между обогреваемым корпусом и ребром, и повторно сублимируются при контакте с нагретой стенкой, после чего вновь образующиеся пары продукта десублимируются в следующей камере. При заполнении аппарата десублиматом подача парогазовой смеси и хладагента прекращается, электронагреватели повышают температуру в аппарате до температуры плавления  $UF_6$  и расплавленный десублимат выводится из аппарата через патрубок в донной части (поток II) [23]. Такие десублиматоры надежны в работе и позволяют повысить эффективность улавливания  $UF_6$  за счет более полного и равномерного заполнения аппарата.

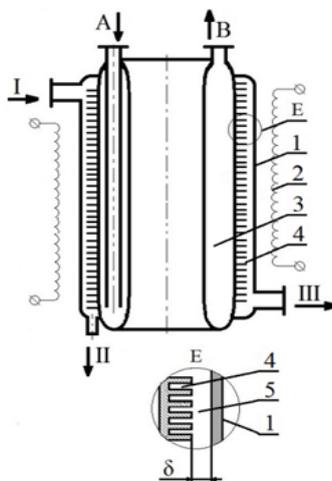


Рисунок 7. Многокамерный десублиматор с одной тепловой стенкой

Многокамерный аппарат с двумя теплыми стенками (рисунок 8) состоит из кольцевого корпуса 1, в котором расположена десублимационная камера 2, внутри соосно корпусу находится кольцевая охлаждающая камера 3, разделенная перегородками 4, которые имеют отверстия 5 для циркуляции хладагента. На внутренней и наружной стенках кольцевого корпуса расположены нагреватели 6.

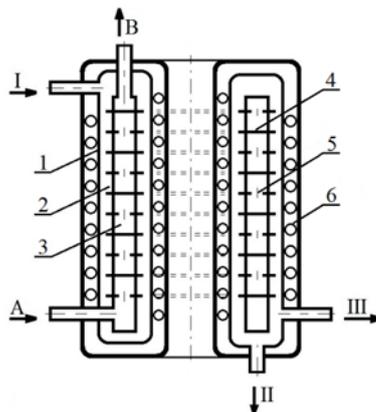


Рисунок 8. Многокамерный десублиматор с двумя теплыми стенками

Для выделения  $UF_6$  из парогазовой смеси на сублиматных предприятиях наибольшее промышленное применение нашли десублиматоры комбинированного типа (рисунок 9), состоящие из аппарата с тепловым сбросом и вертикальной погружной транспортной емкости с гладкими внутренними стенками, подключенной к нижней части десублиматора. Вертикальная емкость помещается в термостат, закрепляется в нем, предотвращая самопроизвольное всплытие, после чего термостат заполняется хладагентом – насыщенным раствором  $CaCl_2$  с температурой минус  $20^\circ C$  (потoki C, D). После заполнения емкости до 54% применение десублиматора с тепловым сбросом становится неэффективным, поэтому подача хладагента в десублиматор прекращается и дальнейшее заполнение емкости происходит за счет десублимации  $UF_6$  на внутренних стенках погружной емкости. Не десублимированные примеси, поступающие в аппарат в составе парогазовой смеси, выводятся из десублиматора.

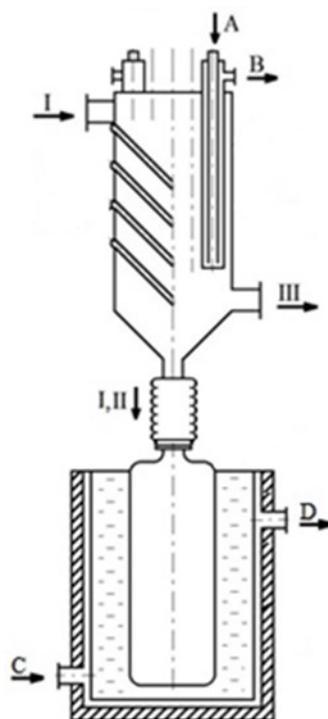


Рисунок 9. Десублиматор комбинированного типа

Десублиматоры комбинированного типа имеют те же достоинства и недостатки, что и аппараты с тепловым сбросом. Кроме того, к их недостаткам можно отнести невозможность заполнения вертикальных транспортных емкостей только насыпным способом (с помощью десублиматора с тепловым сбросом), а также возможность попадания части десублимированного  $UF_6$  в производственное помещение при замене заполненных транспортных емкостей на пустые.

## 1.2 Десублимация на разделительных производствах

Десублимация  $UF_6$  на предприятиях по обогащению урана, в отличие от десублимации на сублиматных производствах, не требует интенсивного теплоотвода, так как газообразный  $UF_6$  на выходе разделительного каскада имеет температуру  $20...30^{\circ}C$  при давлении 80 мм рт. ст. и практически не содержит примесей [24], что существенно упрощает реализацию процесса и позволяет осуществлять перевод  $UF_6$  из газообразного состояния в твердое непосредственно в транспортных емкостях.

В России имеется четыре разделительных предприятия, использующих газоцентрифужную технологию. На двух крупнейших предприятиях АО «Уральский электрохимический комбинат», г. Новоуральск и АО «ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск для десублимации обогащенного и обедненного  $UF_6$  используются вертикальные погружные транспортные емкости [25], имеющие гладкую внутреннюю поверхность или внутреннее горизонтальное, или вертикальное оребрение (рисунок 10). Вертикальные ребра прямоугольной формы применяются в емкостях отвала, горизонтальные – в некоторых отборных. Достоинством этого способа является простота устройства, удобство и экономичность его эксплуатации [24, 25]. Недостатком десублимации в вертикальные погружные емкости является уменьшение ее производительности по мере заполнения емкости, происходящее из-за 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.

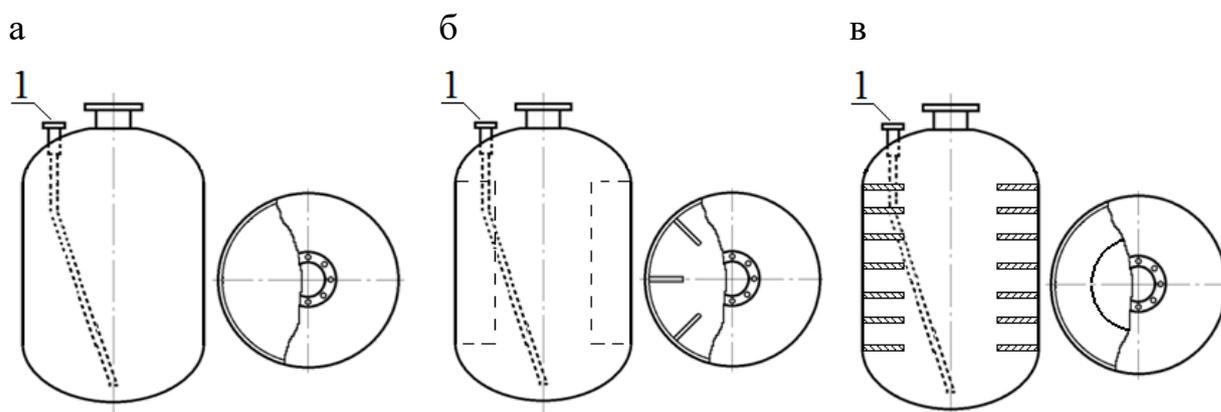


Рисунок 10. Вертикальная погружная емкость

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

В АО «Сибирский химический комбинат», г. Северск 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, принцип действия которых рассмотрен в п. 1.1.

В АО «Ангарский электролизный химический комбинат», г. Ангарск десублимация  $UF_6$  осуществляется в горизонтальные емкости [24, 25] (рисунок 11). Газообразный  $UF_6$  подается в емкость через патрубок 2, и охлаждается при контакте со стенками емкости, внешняя поверхность которых орошается хладагентом (1). Частичное испарение хладагента (поток I) по мере того, как он стекает по боковым стенкам емкости, повышает коэффициент теплоотдачи. Для стекающего хладагента (поток II) под емкостью устанавливается поддон (3).

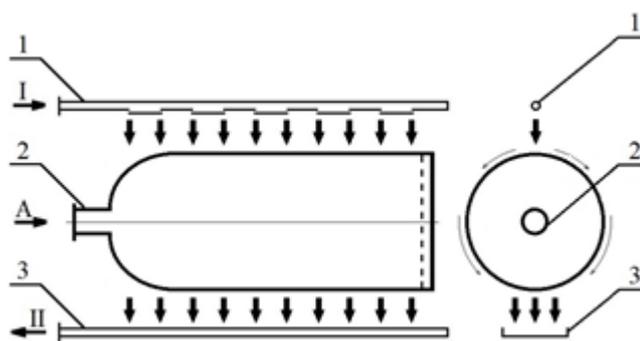


Рисунок 11. Горизонтальная транспортная емкость

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 [24, 25].

Таким образом, показано, что на российских предприятиях по обогащению урана наиболее распространенным является способ десублимации  $UF_6$  в вертикальные погружные емкости с гладкой внутренней поверхностью или внутренним оребрением, который прост, удобен и экономичен в эксплуатации.

### 1.3 Физические и химические свойства UF<sub>6</sub>

На предприятиях ядерно-топливного цикла UF<sub>6</sub> может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразный UF<sub>6</sub> в каскаде газовых центрифуг обогащается по легкому изотопу, в твердом виде UF<sub>6</sub> обогащенный по легкому изотопу транспортируется между предприятиями отрасли, а обедненный хранится на складах; в жидкой фазе UF<sub>6</sub> находится при осуществлении операции «перелива» из вертикальной транспортной емкости в горизонтальную емкость для гомогенизации смеси в случае, если товарный продукт нарабатывался для зарубежного заказчика.

Монокристаллы UF<sub>6</sub> являются ортогональными. Кристаллическая решетка принадлежит пространственной группе симметрии и имеет постоянные решетки  $a = 99 \text{ \AA}$ ,  $b = 89,6 \text{ \AA}$ ,  $c = 52,1 \text{ \AA}$ . Элементарная ячейка решетки состоит из четырех молекул UF<sub>6</sub>. Диаметр молекулы составляет 0,55...0,6 нм, длина связей U – F в молекуле равна 0,2 нм [26].

На рисунке 12 изображена фазовая диаграмма UF<sub>6</sub>. Тройная точка соответствует температуре 64,052°C и давлению 1134 мм рт. ст. (151,2 кПа), точка возгонки – 56,4°C при 759,8 мм рт. ст. (101,3 кПа) [26-28]. Критическая точка UF<sub>6</sub> характеризуется следующими параметрами: температура 245°C, давление 47876,6 мм рт. ст. (6383 кПа или 45,5 атм.) плотность 1,39 г/см<sup>3</sup>. При превышении критической температуры UF<sub>6</sub> распадается [28].

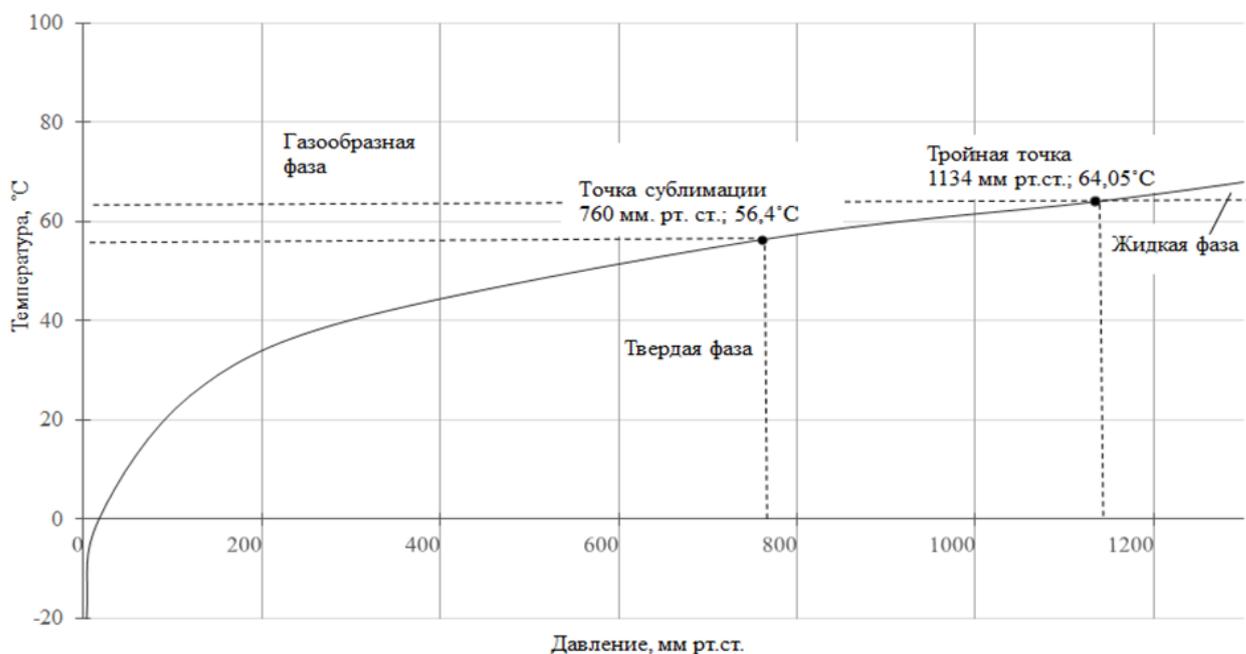


Рисунок 12. Фазовая диаграмма UF<sub>6</sub>

При 65°C плотность твердого UF<sub>6</sub> составляет 4,87 г/см<sup>3</sup>, а плотность жидкого UF<sub>6</sub> – 3,624 г/см<sup>3</sup>, с этим связано увеличение на 1/3 объема, занимаемого UF<sub>6</sub>, при его переходе из твердого состояния в жидкое. При температуре 63,89°C теплота сублимации равна 46,02 кДж/моль, плавления 19,12 кДж/моль, испарения 28,7 кДж/моль. Теплоемкость твердой фазы 167 кДж/(моль·град), жидкой фазы 194,97 кДж/(моль·град), газообразной фазы 138 кДж/ (моль·град) [27, 28].

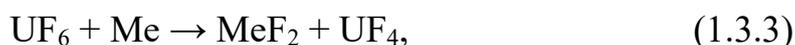
Необходимо отметить, что UF<sub>6</sub> имеет сильную химическую активность. Так, например, при взаимодействии с воздухом он мгновенно гидролизуется, и образует нелетучие соединения UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> и плавиковую кислоту:

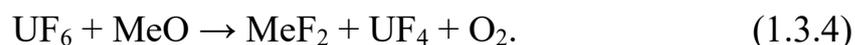


При взаимодействии с органическими соединениями образуется тетрафторида урана и ряд других соединений:



При взаимодействии UF<sub>6</sub> с некоторыми металлами, в частности с цинком, кремнием, свинцом, оловом, и железом велики коррозионные потери:





Вследствие реакций  $\text{UF}_6$  с органическими соединениями, металлами и их оксидами  $\text{UF}_4$  осаждается на стенках технологического оборудования. Возникающие потери рабочего газа приводят к тому, что целевые изотопы урана выводятся из технологического процесса, что приводит к снижению производительности отдельных центрифуг, а, следовательно, и к уменьшению разделительной способности всего каскада.

Ряд металлов, таких как медь, никель, алюминий, и магний устойчивы к взаимодействию с  $\text{UF}_6$ , что объясняется образованием на поверхности металлов фторидной пленки, препятствующей дальнейшему взаимодействию веществ [26]. Кроме того, достаточную устойчивость проявляют ряд синтетических материалов, таких как тефлон, фторидная смазка и др.

Несмотря на достаточно специфические физические и химические свойства  $\text{UF}_6$  точное соблюдение требований по эксплуатации оборудования позволяет избежать их негативного влияния на технологический процесс [28].

## 2 Математическая модель

Процесс десублимации  $UF_6$  является нестационарным. Его скорость определяется подводом газообразного  $UF_6$  к поверхности теплообмена и интенсивностью его теплообмена с хладагентом. При заполнении емкости увеличивается толщина слоя десублимата на внутренней поверхности. Происходит ухудшение условий теплообмена между поверхностью фазового перехода  $UF_6$  и хладагентом. При этом уменьшение величин теплового потока и скорости десублимации происходит нелинейно.

Сотрудниками Отделения ядерно-топливного цикла ИЯТШ ТПУ была разработана математическая модель, описывающая процессы тепло- и массообмена, проходящие при десублимации  $UF_6$  в вертикальные погружные емкости. Описание этой модели представлено ниже.

### 2.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования выступала вертикальная погружная емкость без оребрения объемом  $1 \text{ м}^3$ , представленная на рисунке 13 [29]. Емкость изготовлена из стали 16 ГС, имеет высоту 1,8 м, радиус 0,45 м, и толщину стенки  $6 \cdot 10^{-3}$  м.

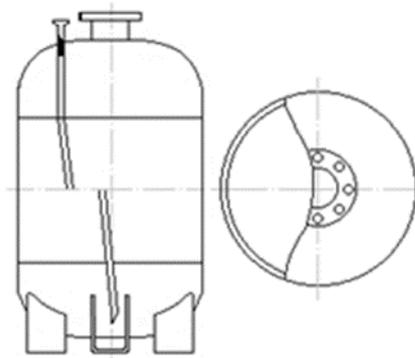


Рисунок 13. Вертикальная погружная емкость для десублимации урана

## 2.2 Одномерная модель

При построении математической модели процесса десублимации  $\text{UF}_6$  авторами [29] были приняты следующие допущения:

- градиент температур направлен перпендикулярно к теплоотводящей поверхности;
- температура внешней поверхности стенок емкости равна температуре хладагента;
- температура фазового перехода равна равновесной температуре и определяется давлением над слоем десублимата;
- изменение энтальпии газовой смеси при охлаждении ее до температуры фазового перехода намного меньше теплоты десублимации;
- выполняется гипотеза локального термодинамического равновесия в пределах каждой из фаз;
- происходит только поверхностная десублимация  $\text{UF}_6$  на теплообменных стенках емкости, десублимация в объеме газа отсутствует;
- химические реакции в рассматриваемой системе не протекают.

Данные допущения позволяют рассматривать процесс теплообмена  $\text{UF}_6$  с хладагентом и его фазовый переход в одномерном приближении.

Система стенка-десублимат разбивалась равномерной разностной сеткой таким образом, что узлы сетки совпадали с местом контакта теплообменной поверхности и слоя десублимата (рисунок 14).

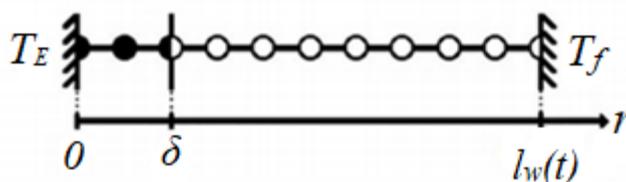


Рисунок 14. Разностная сетка

Уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат для стенки емкости записывалась следующим образом:

$$\frac{\partial rT}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} \left( a \frac{\partial rT}{\partial n} \right), \quad (2.2.1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $n$  – нормальная координата, направленная от внешней поверхности внутрь емкости,  $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$ ;  $r$  – радиальная координата,  $\text{м}$ ;  $t$  – время,  $\text{с}$ .

В связи с увеличением толщины слоя десублимата с течением времени для расчета температурного поля в слое десублимата использовалась адаптивная система координат, связанная с границей раздела стенка-десублимат (2.2.2).

$$(\rho c)_u l_w(t) \frac{\partial rT}{\partial t} + \eta(\rho c)v_w(t) \frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{\lambda_u r}{l_w(t)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right), \quad (2.2.2)$$

$$\eta = \frac{n - \delta}{l_w(t)}, \quad 0 \leq \eta \leq 1,$$

здесь и далее  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{кг})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta$  – толщина стенки емкости,  $\text{м}$ ;  $l_w(t)$  – толщина слоя десублимата,  $\text{м}$ ;  $\eta$  – безразмерная координата,  $L$  – теплота десублимации,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $v$  – скорость десублимации,  $\text{м}/\text{с}$ ; индексы  $u$ ,  $w$ ,  $E$ ,  $F$  обозначают твердый  $\text{UF}_6$ , границу раздела фаз, хладагент, газообразный  $\text{UF}_6$  соответственно.

Для определения скорости увеличения толщины десублимата на границе фазового перехода  $\text{UF}_6$  задавалось условие Стефана [30]:

$$\rho_u v_w(t) L = \frac{\lambda_u r}{l_w(t)} \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (2.2.3)$$

На внутренней и внешней стенки теплопроводящей поверхности были заданы граничные условия 1 рода:

$$T|_{\eta=0} = T_E, \quad (2.2.4)$$

$$T|_{\eta=1} = T_F. \quad (2.2.5)$$

На границе контакта стенки и слоя десублимат задавались условия сопряжения:

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=\delta-0} = \lambda_u \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=\delta+0}, \quad (2.2.6)$$

$$T|_{n=\delta-0} = T|_{n=\delta+0}. \quad (2.2.7)$$

При проведении расчетов теплофизическим свойствам твердого UF<sub>6</sub> задавались следующие значения [31-32]:

$$\lambda_{UF_6} = 0,66 \frac{Вт}{м \cdot К}, \quad \rho_{UF_6} = 5091 \frac{кг}{м^3}, \quad C_{UF_6} = 457,2 \frac{Дж}{К \cdot м^3}. \quad (2.2.8)$$

Для численного решения системы уравнений (2.2.1) – (2.2.3) с граничными и начальными условиями (2.2.4) – (2.2.8) применялся хорошо зарекомендовавший себя для решения задач подобного класса итерационно-интерполяционный метод [33].

### 2.3 Итерационно – интерполяционный метод

В общем виде исходные уравнения и граничные условия можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( a_1 \frac{\partial F}{\partial x} \right) &= -a_2 \frac{\partial F}{\partial x} + a_4 + a_6 \frac{\partial F}{\partial t}, \\ \alpha_w \left( a_1 \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \beta_w F \Big|_{x=x_w} &= f_w, \\ \alpha_0 \left( a_1 \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \beta_0 F \Big|_{x=0} &= f_0. \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

Область решения ( $0 < x < 1$ ) разбита равномерной расчетной сеткой на  $N$  отрезков, при этом узлы сетки совпадают с местом контакт стенки емкости и слоя десублимата. На  $i$ -ом интервале, с шагом  $h_i = x_i - x_{i-1}$ , искомую функцию  $F$  и коэффициенты  $a_i$  представляются в виде многочлена 1-ой степени:

$$\begin{aligned}
F^{(i)} &= C^{(i)}x + D^{(i)}, \quad a_k^{(i)} = A_k^{(i)}x + B_k^{(i)}, \quad k=1,2,4,6, \quad i=\overline{1,N}, \\
C^{(i)} &= \frac{F_i - F_{i-1}}{h_i}, \quad D^{(i)} = \frac{F_{i-1}x_i - F_i x_{i-1}}{h_i}, \\
A_k^{(i)} &= \frac{a_{k,i} - a_{k,i-1}}{h_i}, \quad B_k^{(i)} = \frac{a_{k,i-1}x_i - a_{k,i}x_{i-1}}{h_i}, \quad x \in [x_{i-1}, x_i].
\end{aligned} \tag{2.3.2}$$

Проинтегрировав уравнения (2.3.2) дважды, получаем:

$$\begin{aligned}
(A_1^{(i)}x + B_1^{(i)})\frac{\partial F}{\partial x} &= -(A_2^{(i)}\frac{x^2}{2} + B_2^{(i)}x)C^{(i)} + (A_4^{(i)}\frac{x^2}{2} + B_4^{(i)}x) + \\
&+ (A_6^{(i)}\frac{x^2}{2} + B_6^{(i)}x)\frac{\partial F}{\partial t} + C_1,
\end{aligned} \tag{2.3.3}$$

$$\begin{aligned}
(A_1^{(i)}x + B_1^{(i)})F^{(i)} &= (C^{(i)}\frac{x^2}{2} + D^{(i)}x) - (A_2^{(i)}\frac{x^3}{6} + B_2^{(i)}\frac{x^2}{2})C^{(i)} + \\
&+ (A_4^{(i)}\frac{x^3}{6} + B_4^{(i)}\frac{x^2}{2}) + (A_6^{(i)}\frac{x^3}{6} + B_6^{(i)}\frac{x^2}{2})\frac{\partial F}{\partial t} + C_1x + C_2 = \Psi(x).
\end{aligned} \tag{2.3.4}$$

где верхний индекс (i) – означает i-й интервал сетки, значения констант  $C_1, C_2$  определяются из условий:

$$(A_1^{(i)}x_i + B_1^{(i)})F_i = \Psi(x_i), \quad (A_1^{(i)}x_{i-1} + B_1^{(i)})F_{i-1} = \Psi(x_{i-1}). \tag{2.3.5}$$

После интегрирования уравнения (2.3.1) по  $x$  влево и вправо для узла сетки, в котором происходит контакт стенки емкости и слоя десублимата, и осреднения коэффициентов при конвективном члене, получаем следующие выражения для потоков в  $i$ -ом узле сетки слева и справа:

$$\begin{aligned}
a_1 \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=x_i-0} &= (F_i - F_{i-1}) \left[ \frac{a_{1,i} + a_{1,i-1}}{2h_i} - \frac{a_{2,i-1} + 2a_{2,i}}{6} \right] + \frac{h_i a_{4,i}}{2} + \frac{h_i a_{6,i}}{2} \frac{(F_i - F_{i,t})}{\tau}, \\
a_1 \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=x_i+0} &= (F_{i+1} - F_i) \left[ \frac{a_{1,i+1} + \bar{a}_{1,i}}{2h_{i+1}} + \frac{a_{2,i+1} + 2\bar{a}_{2,i}}{6} \right] - \frac{h_{i+1} \bar{a}_{4,i}}{2} - \frac{h_{i+1} \bar{a}_{6,i}}{2} \frac{(F_i - F_{i,t})}{\tau},
\end{aligned} \tag{2.3.6}$$

здесь  $\tau$  – шаг по времени, нижний индекс  $t$  означает значение на предыдущем слое по времени, черта снизу соответствует значению слева от узла, черта сверху – справа.

Приравнивая потоки в узлах сетки, получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
A_i F_{i-1} - C_i F_i + B_i F_{i+1} &= -D_i, \quad i = \overline{1, N-1}, \\
A_i &= \tau [h_{i+1} (\underline{a}_{1,i} + a_{1,i-1}) - \beta_i (2\underline{a}_{2,i} + a_{2,i-1})], \\
B_i &= \tau [h_i (\bar{a}_{1,i} + a_{1,i+1}) - \beta_i (2\bar{a}_{2,i} + a_{2,i+1})], \\
C_i &= A_i + B_i + \frac{(\bar{a}_{6,i} + \underline{a}_{6,i})}{2} \gamma_i, \\
D_i &= \gamma_i \left[ \frac{(\bar{a}_{6,i} + \underline{a}_{6,i})}{2} F_{i,t} - \tau \frac{(\bar{a}_{4,i} + \underline{a}_{4,i})}{2} \right], \\
S_6 &= \frac{(\bar{a}_{6,i} + \underline{a}_{6,i})}{2} \gamma_i, S_4 = \frac{(\bar{a}_{4,i} + \underline{a}_{4,i})}{2} \gamma_i, \\
C_i &= A_i + B_i + S_6, \\
D_i &= S_6 F_{i,t} - \tau S_4, \\
\beta_i &= \frac{h_i h_{i+1}}{3}, \quad \gamma_i = h_i h_{i+1} (h_i + h_{i+1}).
\end{aligned} \tag{2.3.7}$$

Аналогично, используя выражения для потоков и подставляя их в граничные условия (2.3.1), получаем разностную аппроксимацию граничных условий:

$$\begin{aligned}
A_N F_{N-1} - C_N F_N &= -D_N, \\
A_N &= \alpha_w \tau [(a_{1,N} + a_{1,N-1}) - \frac{h_N}{3} (2a_{2,N} + a_{2,N-1})], \\
C_N &= A_N + \alpha_w h_N^2 a_{6,N} + 2\beta_w \tau h_N, \\
D_N &= \alpha_w h_N^2 (a_{6,N} F_{N,t} - \tau a_{4,N}) + 2f_N \tau h_N.
\end{aligned} \tag{2.3.8}$$

$$\begin{aligned}
-C_1 F_1 + B_1 F_2 &= -D_1, \\
B_1 &= \alpha_1 \tau [(a_{1,1} + a_{1,1}) + \frac{h_1}{3} (2a_{2,1} + a_{2,2})], \\
C_1 &= B_1 + \alpha_1 h_1^2 a_{6,1} - 2\beta_1 \tau h_1, \\
D_1 &= \alpha_1 h_1^2 (a_{6,1} F_{1,t} - \tau a_{4,1}) - 2f_1 \tau h_1.
\end{aligned} \tag{2.3.9}$$

Таким образом, исходная задача (2.3.1) сводится к системе алгебраических уравнений (2.3.7) – (2.3.9). Данная система имеет трехдиагональную матрицу и может быть решена методом скалярной прогонки, при этом на первом этапе вычисляются прогоночные коэффициенты

$$\begin{aligned}
M_N &= A_N/C_N, \\
P_N &= D_N/C_N, \\
M_i &= A_i/(C_i - B_i M_{i+1}), \\
P_i &= (B_i P_{i+1} + D_i)/(C_i - B_i M_{i+1}), \quad i = \overline{N-1, 1}.
\end{aligned}
\tag{2.3.10}$$

на втором этапе вычисляются значения функции в узлах сетки

$$\begin{aligned}
F_0 &= (B_0 P_1 + D_0)/(C_0 - B_0 M_1), \\
F_i &= M_i F_{i-1} + P_i, \quad i = \overline{1, N}.
\end{aligned}
\tag{2.3.11}$$

### 3 Влияние толщины и материала стенок емкостей на скорость десублимации гексафторида урана

Ранее сотрудниками Отделения ядерно-топливного цикла было исследовано влияние температур хладагента и газообразного  $UF_6$ , давления в коллекторе, отношения высоты емкости к ее радиусу, толщины вертикальных и горизонтальных ребер емкости, их количества и размеров на среднюю производительность вертикальных погружных емкостей различного объема [34]. Проведенные расчеты показали возможность повышения эффективности технологического процесса десублимации  $UF_6$  на разделительных предприятиях отрасли за счет изменения конструкции емкостей и режима их работы.

Целью данной работы является исследование влияния толщины стенки емкости и ее теплофизических параметров на динамику изменения массы десублимированного  $UF_6$  в емкости, а также определение зависимости скорости десублимации  $UF_6$  от указанных величин.

#### 3.1 Метод наименьших квадратов

Для получения аппроксимирующих зависимостей скорости десублимации газообразного  $UF_6$  от толщины и материала стенки емкости использовался метод наименьших квадратов (МНК), широко применяемый как в статистике, так и для установления коэффициентов аппроксимирующих функций [35].

При аппроксимации функции с помощью МНК сумма квадратов отклонений является минимальной. Данное условие можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^N \zeta_i^2 = \sum_{i=1}^N (F(x_i) - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3.1.1)$$

где  $\zeta$  – отклонение,  $F(x_i)$  – значение аппроксимирующей функции,  $y_i$  – значение исходной функции.

В общем случае, когда требуется построить аппроксимирующую функцию, условие минимальности записывается следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_{m-1} x_i^{m-1} + a_m x_i^m - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (3.1.2)$$

Условием существования минимума функции (3.1.2) является равенство нулю ее частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_{m-1} x_i^{m-1} + a_m x_i^m - y_i) = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_{m-1} x_i^{m-1} + a_m x_i^m - y_i) x_i = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial S}{\partial a_m} = 2 \sum_{i=1}^N (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_{m-1} x_i^{m-1} + a_m x_i^m - y_i) x_i^m = 0. \end{cases} \quad (3.1.3)$$

После преобразования системы уравнений (3.1.3) к матричному виду получаем:

$$\begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N x_i & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^m \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_i^m & \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{2m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i^m \end{pmatrix}. \quad (3.1.4)$$

Далее матрица (3.1.4) с размерностью  $m + 1$  решается численно с помощью метода Крамера [36].

Полученные коэффициенты  $a_0, \dots, a_m$  обеспечивают построение аппроксимирующей функции в соответствии с критерием минимизации суммы квадратов отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей функции.

При аппроксимация исходных данных с использованием МНК могут быть выбраны следующие типы функций: линейная, логарифмическая, экспоненциальная и степенная. Рассмотрим эти случаи:

1) Линейная зависимость.

Для определения коэффициентов уравнения линейной зависимости, воспользовавшись формулами (3.1.1) – (3.1.4), получаем систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} a_0 N + a_1 \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^N x_i + a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N y_i x_i. \end{cases} \quad (3.1.5)$$

которая имеет следующее решение:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i) \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}, \quad (3.1.6)$$

$$a_1 = \frac{N \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i) - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}.$$

Для оценки точности полученной аппроксимирующей зависимости используется коэффициент корреляции Пирсона [33], определяемый по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - M_x)^2 \sum_{i=1}^N (y_i - M_y)^2}}, \quad (3.1.7)$$

где  $M_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ,  $M_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ .

Коэффициент корреляции изменяется в диапазоне  $-1 \leq r \leq 1$ , чем ближе  $r$  к единице, тем точнее описывается линейный характер зависимости.

2) Логарифмическая зависимость.

Рассмотрим случай, когда уравнение имеет вид  $F(x) = a + b \cdot \ln(x)$ , в этом случае коэффициенты уравнения  $a$  и  $b$  рассчитываются из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot N + b \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i) = \sum_{i=1}^N \ln(y_i), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i) + b \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(x_i))^2 = \sum_{i=1}^N y_i \cdot \ln(x_i). \end{cases} \quad (3.1.8)$$

Откуда  $a$  и  $b$ :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(x_i))^2 - \sum_{i=1}^N (y_i \cdot \ln(x_i)) \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i)}{N \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(x_i))^2 - (\sum_{i=1}^N \ln(x_i))^2}, \quad (3.1.9)$$

$$b = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (y_i \cdot \ln(x_i)) - \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N \ln(x_i)}{N \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(x_i))^2 - (\sum_{i=1}^N \ln(x_i))^2}.$$

### 3) Экспоненциальная зависимость.

Рассмотрим случай, когда уравнение имеет вид  $F(x) = a + \exp(b \cdot x)$ , после линеаризации этого уравнения получаем экспоненциальную функцию:

$$\ln(F(x)) = \ln(a) + b \cdot x. \quad (3.1.10)$$

Неизвестные коэффициенты уравнения  $a$  и  $b$  рассчитываются из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \ln(a) \cdot N + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N \ln(y_i), \\ \ln(a) \cdot \sum_{i=1}^N x_i + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N \ln(y_i) x_i. \end{cases} \quad (3.1.11)$$

Решая данную систему уравнений, получим:

$$\ln(a) = \frac{\sum_{i=1}^N \ln(y_i) \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N (\ln(y_i) \cdot x_i) \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}, \quad (3.1.12)$$

$$\ln(a) = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(y_i) \cdot x_i) - \sum_{i=1}^N \ln(y_i) \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}.$$

4) Степенная зависимость.

В случае использования степенной зависимости, ее сначала приводят к виду:

$$\ln(F(x)) = \ln(a \cdot x^b) = \ln(a) + b \ln(x). \quad (3.1.13)$$

После подстановки уравнения (3.1.13) в формулы (3.1.1) – (3.1.4), получаем:

$$\begin{cases} \ln(a) \cdot N + b \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i) = \sum_{i=1}^N \ln(y_i), \\ \ln(a) \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i) + b \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(x_i))^2 = \sum_{i=1}^N \ln(y_i) \cdot \ln(x_i). \end{cases} \quad (3.1.14)$$

Решая полученную систему уравнений, получаем следующие коэффициенты:

$$\ln(a) = \frac{\sum_{i=1}^N \ln(y_i) \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(x_i))^2 - \sum_{i=1}^N (\ln(y_i) \cdot \ln(x_i)) \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i)}{N \sum_{i=1}^N ((\ln(x_i))^2) - (\sum_{i=1}^N \ln(x_i))^2}, \quad (3.1.15)$$

$$b = \frac{N \sum_{i=1}^N (\ln(y_i) \cdot \ln(x_i)) - \sum_{i=1}^N \ln(y_i) \cdot \sum_{i=1}^N \ln(x_i)}{N \sum_{i=1}^N ((\ln(x_i))^2) - (\sum_{i=1}^N \ln(x_i))^2}.$$

Для установления адекватности нелинейных зависимостей (логарифмической, экспоненциальной, степенной) используется множественный коэффициент корреляции ( $R$ ), определяемый по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - M_y)^2}}. \quad (3.1.16)$$

### 3.2 Влияние толщины стенки на скорость десублимации UF<sub>6</sub>

На рисунке 15 показана динамика заполнения емкости объемом 1 м<sup>3</sup>, при различных значениях толщины стенки. При исследовании влияния толщины стенки емкости на динамику заполнения емкости и скорость десублимации UF<sub>6</sub>, значения толщины стенки емкости варьировались от 5·10<sup>-3</sup> м до 20·10<sup>-3</sup> м с шагом 5·10<sup>-3</sup> м.

Расчетный диапазон значений выбирался из следующих соображение:

– использование емкостей с толщиной стенки менее 5·10<sup>-3</sup> м приведет к снижению их прочностных характеристик, вследствие чего емкости не будут соответствовать требованиям безопасности;

– увеличение толщины стенки емкости более 20·10<sup>-3</sup> м считалось нецелесообразным, т.к. это приводит к возрастанию затрат металла на производство емкостей, увеличивает их массу и габариты, чем усложняет процесс транспортировки, при этом полезный объем емкостей остается неизменным.

Из рисунка 15 видно, что увеличение толщины стенки емкости с 5·10<sup>-3</sup> до 20·10<sup>-3</sup> м приводит к увеличению времени заполнения емкости, и как следствие, снижает ее среднюю производительность на 0,2%.

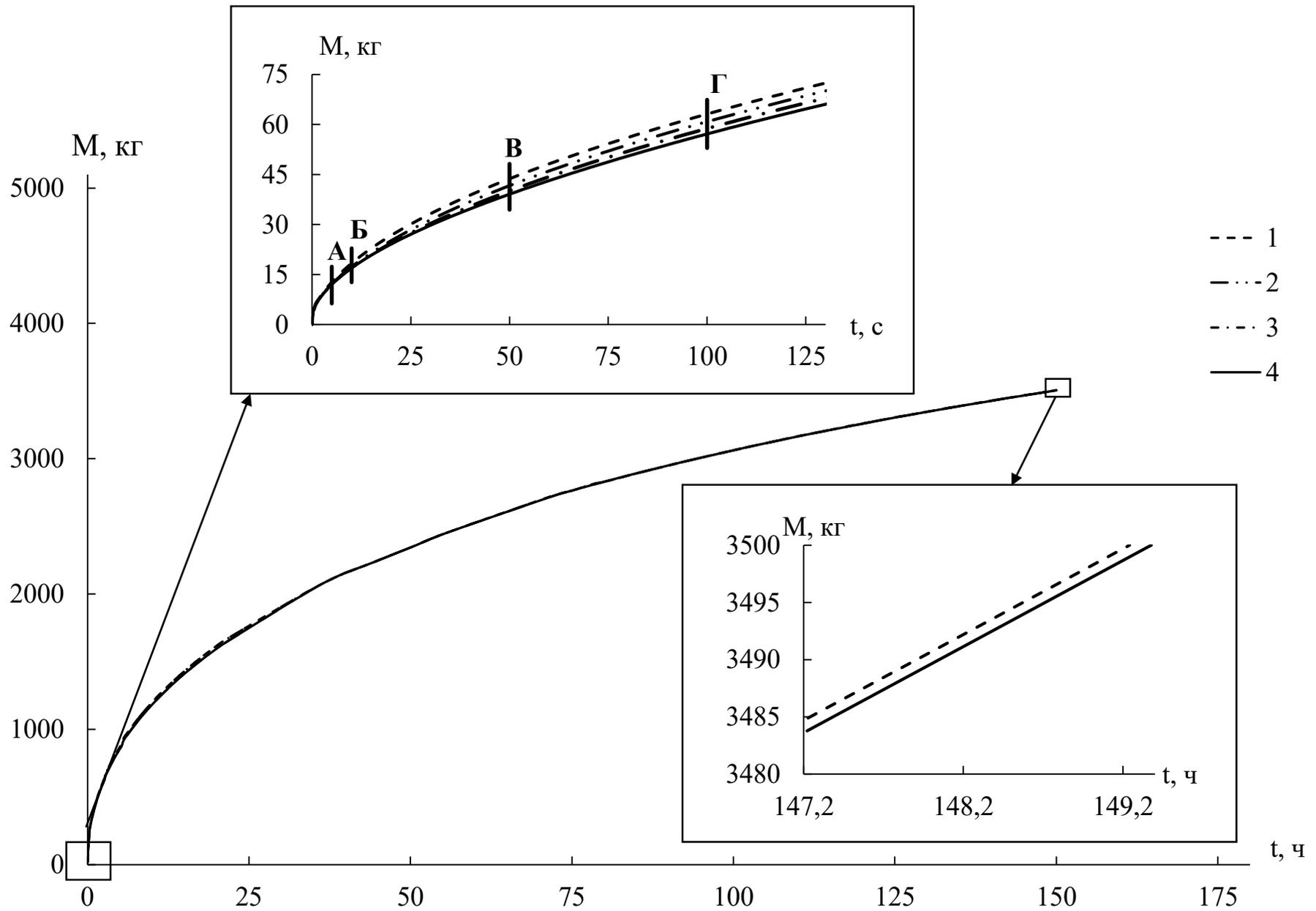


Рисунок 15. Динамика заполнения емкости объемом  $1 \text{ м}^3$  при изменении толщины ее стенок  
 1 –  $h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 –  $h = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 –  $h = 15 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ ; 4 –  $h = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Для исследования влияния толщины стенки емкости на скорость десублимации  $UF_6$  строили графики их зависимости при значениях времени 5 с, 10 с, 50 с, и 100 с, представленные на рисунке 16.

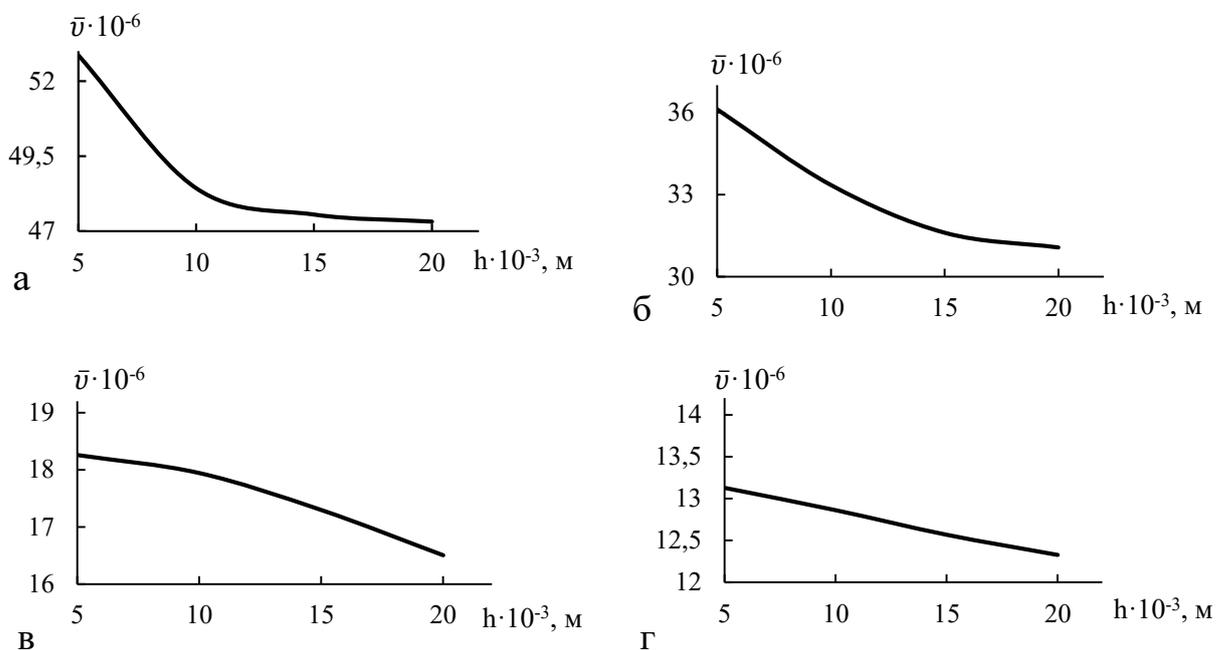


Рисунок 16. Зависимости скорости десублимации  $UF_6$  от толщины стенки емкости

а – при  $t = 5$  с; б – при  $t = 10$  с; в – при  $t = 50$  с; г – при  $t = 100$  с

Расчеты показали, что в начальный момент времени зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от толщины стенки емкости имеет степенной характер (рисунок 16а, 16б), это связано с тем, что в начальный момент времени стенка емкости охлаждена до температуры хладагента. Количество теплоты, переносимое от газообразного  $UF_6$  к хладагенту через стенку емкости и слой десублимата, имеет три составляющие:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (3.2.1)$$

где  $Q_1$  – теплота, необходимая для нагрева газообразного  $UF_6$  до температуры фазового перехода;  $Q_2$  – теплота, отводимая от газообразного  $UF_6$  для его перехода в твердое состояние;  $Q_3$  – теплота, требуемая для нагрева стенки емкости.

Наличие последнего слагаемого объясняется начальными условиями распределения температурного поля внутри стенки емкости, принятыми при проведении расчетов, оно незначительно снижает скорость десублимации на начальном этапе заполнения емкости, и в данном случае может называться тепловыми потерями.

Увеличение толщины стенок емкости приводит к ее более длительному нагреву и требует большее количество теплоты. После того, как распределение температуры в стенке емкости становится стационарным зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от толщины стенки принимает линейный характер (рисунок 16г).

Из рисунков 16а – 16г видно, что толщина стенки емкости оказывает влияние только на начальном этапе заполнения емкости ( $t < 100$  с), после чего основным фактором, определяющим скорость десублимации  $UF_6$ , является толщина слоя десублимата и его термическое сопротивление.

Время нестационарного процесса, в течение которого наблюдается нелинейный характер зависимости, много меньше времени заполнения емкости, составляющего для емкости объемом  $1 \text{ м}^3$  примерно 200 часов. В связи с этим зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от толщины стенки емкости при выводе аппроксимирующей зависимости считали линейной.

В результате расчета коэффициентов с помощью формул (3.1.5) – (3.1.6) была получена следующая аппроксимирующая зависимость:

$$v(h) = (-1,28 \cdot h + 1,84) \cdot 10^{-6}. \quad (3.2.2)$$

Коэффициент корреляции Пирсона, вычисленный по формуле (3.1.7), равен 0,994, что свидетельствует о большой точности аппроксимации.

На рисунке 17 представлено сравнение зависимостей скорости десублимации  $UF_6$  от толщины стенки емкости, полученных по аппроксимационной формуле и с помощью программы расчета при времени заполнения емкости  $t = 300$  с. Показана их хорошая сходимость

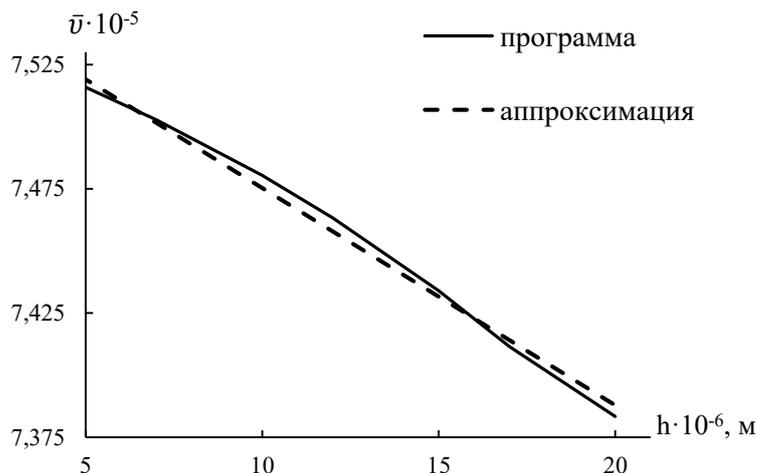


Рисунок 17. Зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от толщины стенки емкости при времени заполнения  $t = 300$  с

### 3.3 Влияние коэффициента теплопроводности на скорость десублимации $UF_6$

Коэффициент теплопроводности – величина, которая показывает скорость изменения температуры при протекании неравновесных процессов, и задается уравнением [37]:

$$a = \frac{\lambda}{C\rho}, \quad (3.3.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $C$  – теплоемкость, Дж/кг·К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Изменение теплофизических свойств материала емкости приводит к изменению значения его коэффициента теплопроводности, использованного в уравнении (2.2.1) для расчета температуры стенки емкости. Интервал изменения коэффициента теплопроводности материала стенки емкости выбирался на основе варьирования теплофизических свойств стали (таблица 1), марки которых используются при изготовлении емкостей для десублимации урана.

Таблица 1. Значения теплофизических свойств стали

Марка стали	C, Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\rho$ , кг/см <sup>3</sup>
Ст3	7850	50	472
20	7859	51	486
16ГС	7850	49	470
09ГС	7790	38	475
10Г2С1	7840	42	480
1Х13	7900	16,3	485
12Х18Н9Т	7750	31,2	480
12Х18Н10Т	7850	50	472

Далее была рассчитана динамика заполнения емкости объемом 1 м<sup>3</sup> при изменении коэффициента температуропроводности  $2,58 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> до  $12,9 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> с шагом  $2,58 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>, представленная на рисунке 18.

Из рисунка 18 видно, что увеличение массы десублимата коррелирует с ростом коэффициента температуропроводности. Это объясняется прямой зависимостью температуропроводности и интенсивности теплоотвода из системы. Так увеличение коэффициента с  $2,58 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> до  $12,9 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> привело к повышению средней производительности на 0,1%.

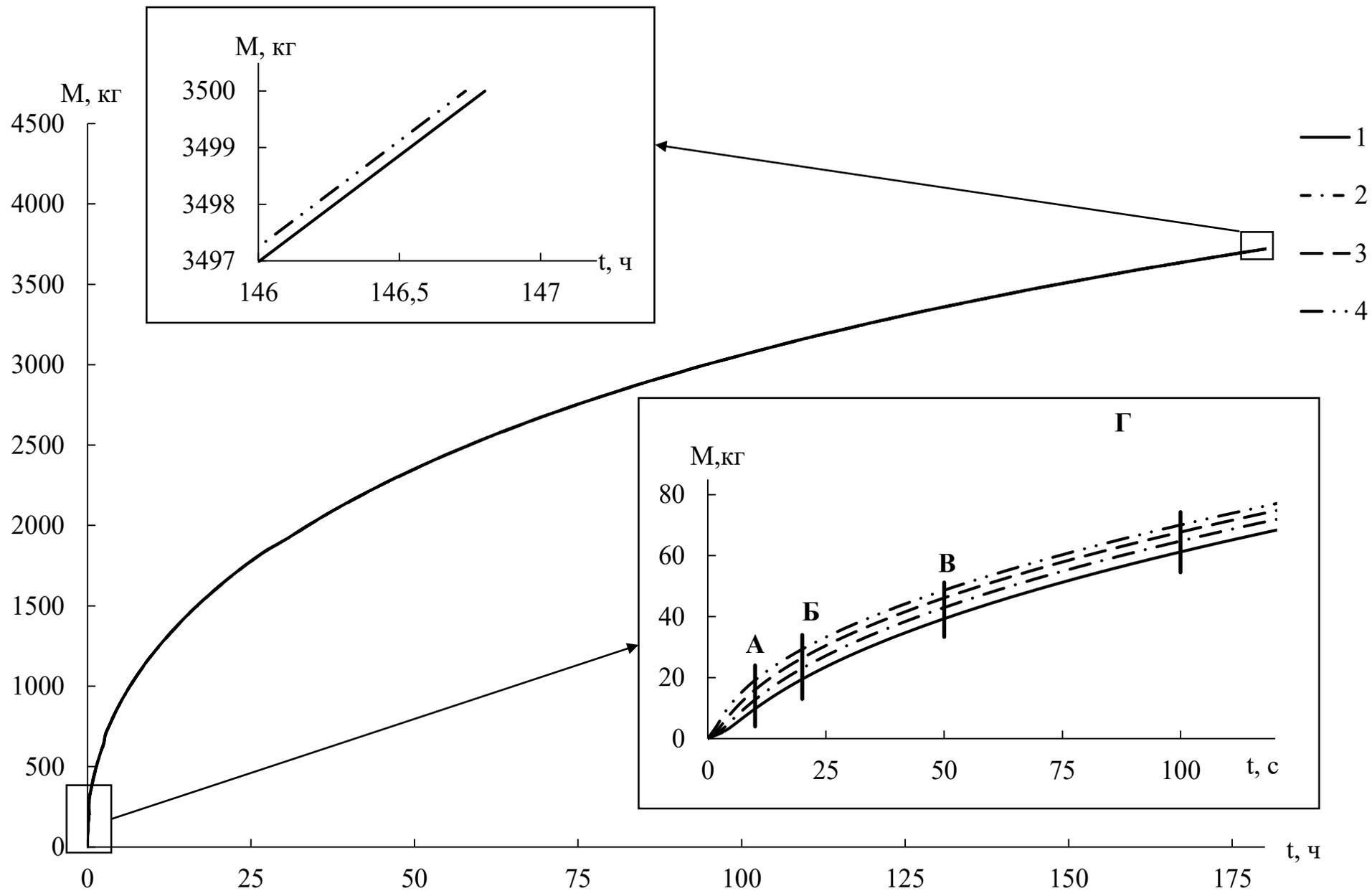


Рисунок 18. Динамика заполнения емкости объемом  $1 \text{ м}^3$  при изменении коэффициента температуропроводности стенки

1 –  $a = 2,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 –  $a = 3,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 3 –  $a = 6,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 4 –  $a = 12,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Для определения влияния коэффициента температуропроводности материала стенки емкости на скорость десублимации  $UF_6$  строили графики их зависимости при значениях времени 10 с, 20 с, 50 с и 100 с, представленные на рисунке 19.

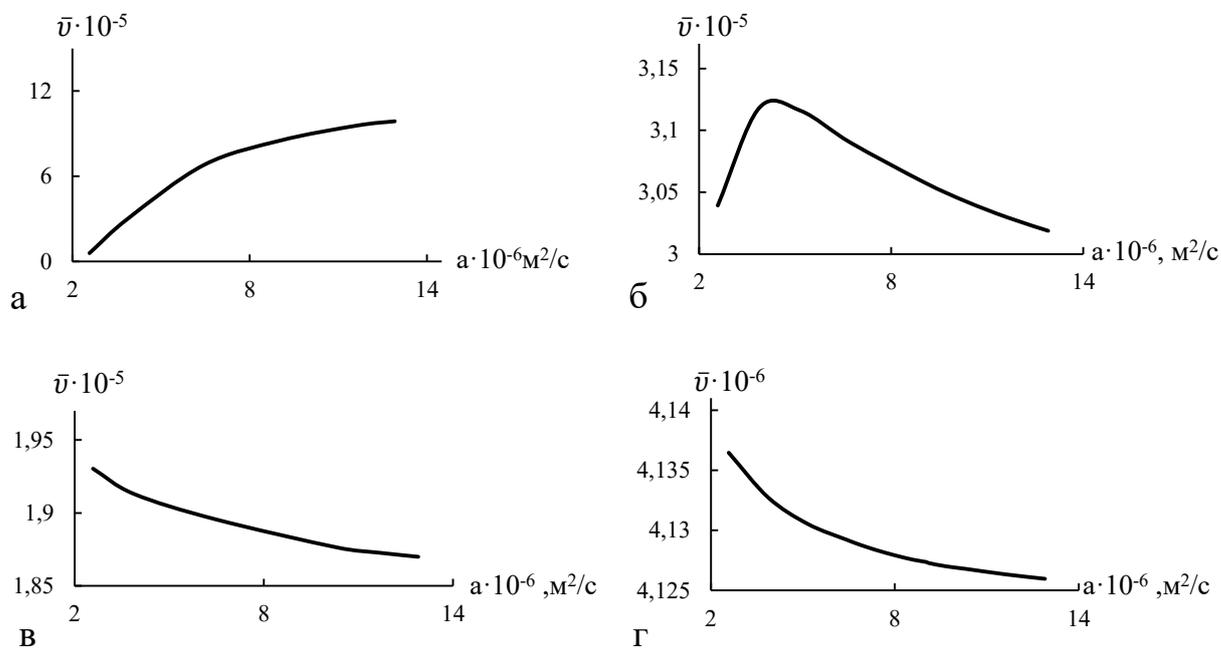


Рисунок 19. Зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от коэффициента температуропроводности материала стенки емкости

а – при  $t = 10$  с; б – при  $t = 20$  с; в – при  $t = 50$  с; г – при  $t = 100$  с.

На начальных этапах процесса (рисунок 19а) скорость десублимации растет при повышении коэффициента температуропроводности, что хорошо согласуется с теорией протекания тепло- и массообменных процессов. При этом, соответственно, растет и слой десублимата, что повышает общее термическое сопротивление системы. После достижения определенной толщины слоя десублимата влияние его термического сопротивления на скорость десублимации  $UF_6$  становится более значительным, чем влияние коэффициента температуропроводности, скорость начинает снижаться (рисунок 19б). Постепенно коэффициент температуропроводности перестает оказывать существенное воздействие на скорость десублимации  $UF_6$  (рисунки

16в и 16г), и после примерно 50 с его влияние на скорость десублимации  $UF_6$  имеет степенной вид.

В связи с тем, что время, в течение которого зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от коэффициента температуропроводности не подчиняется степенному закону существенно меньше времени заполнения емкости, было принято решение не учитывать его, при выводе аппроксимирующей функции.

В результате расчета коэффициентов с помощью формул (3.1.5) – (3.1.6) была получена следующая аппроксимирующая зависимость:

$$v(a) = 5,66 \cdot 10^{-6} \cdot a^{-0,0046}. \quad (3.3.1)$$

Коэффициент корреляции, вычисленный по формуле (3.1.16) равен 0,998, что свидетельствует о большой точности аппроксимации.

На рисунке 20 представлен сравнительный график аппроксимирующей функции и данных программы (при времени заполнения емкости  $t = 1500$  с).

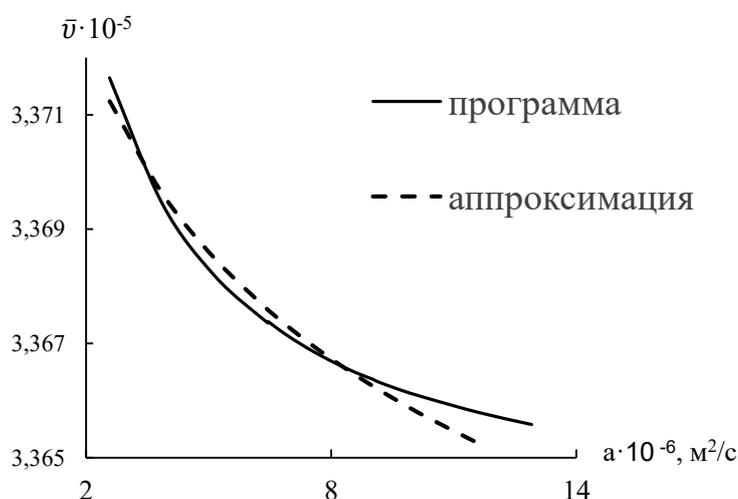


Рисунок 20. Зависимость скорости десублимации  $UF_6$  от коэффициента температуропроводности материала стенки при времени заполнения  $t = 1500$  с

### 3.4 Зависимости скорости десублимации UF<sub>6</sub> от времени и параметров материала стенки емкости

По мере заполнения емкости происходит уменьшение скорости десублимации UF<sub>6</sub>, как уже было сказано ранее данное уменьшение объясняется увеличением слоя десублимата, и, как следствие, увеличением термического сопротивления. Зависимость скорости десублимации UF<sub>6</sub> от времени имеет степенной характер (рисунок 21).

В результате расчета коэффициентов с помощью формул (3.1.5) – (3.1.6) была получена следующая аппроксимирующая зависимость:

$$v(t) = 13,8 \cdot 10^{-8} \cdot t^{-0,6607} \quad (3.4.1)$$

Коэффициент корреляции, вычисленный по формуле (3.1.16) равен 0,941, что свидетельствует о большой точности аппроксимации.

Таким образом, общая зависимость скорости десублимации UF<sub>6</sub> имеет следующий вид:

$$v(h, a, t) = (138 \cdot t^{-0,60717} + 5,66 \cdot a^{-0,0046} - 1,28473 \cdot h + 1,84) \cdot 10^{-6} \quad (3.4.2)$$

На рисунке 21 представлен сравнительный график общей аппроксимирующей функции и данных программы.

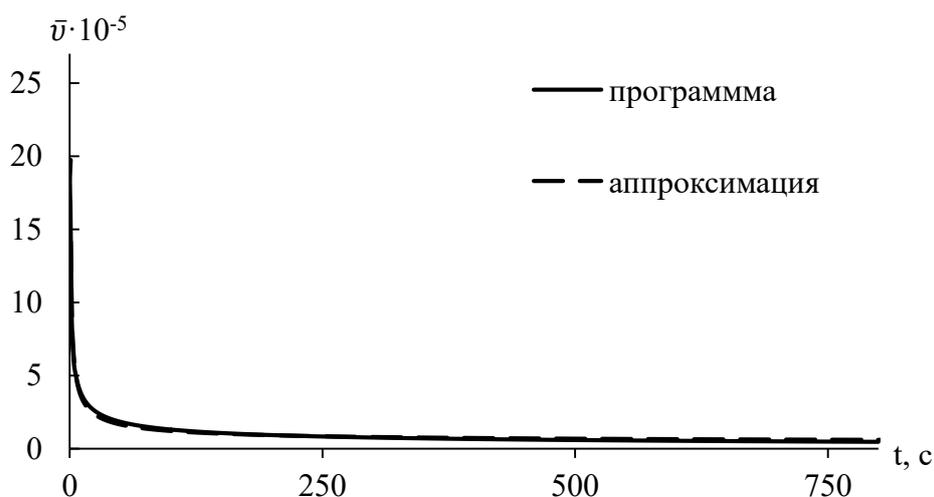


Рисунок 21 – Зависимость скорости десублимации UF<sub>6</sub> от времени, коэффициента температуропроводности, и толщины стенки

## 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование (проект), а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы. Раздел должен быть завершен комплексной оценкой научно-технического уровня ВКР на основе экспертных данных.

### 4.1 Организация и планирование работы

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей редко превышает двух (степень распараллеливания всего комплекса работ незначительна) в большинстве случаев предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные должны быть сведены в таблицу типа приведенной ниже.

Таблица 2. Перечень работ

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%

Таблица 2. Продолжение

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
Расчет функциональной зависимости	И	И – 100%
Изучение результатов	НР, И	И – 100% НР – 10%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

#### 4.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как исполнитель работы зачастую не располагает соответствующими нормативами, то используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя НИР

не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой НИР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов.

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных значений продолжительности работ  $t_{ож}$  применяется по усмотрению исполнителя одна из двух формул.

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (4.1.1)$$

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4t_{prob} + t_{max}}{6}, \quad (4.1.2)$$

где  $t_{min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{prob}$  – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

Вторая формула дает более надежные оценки, но предполагает большую «нагрузку» на экспертов.

Для выполнения перечисленных в таблице 2 работ требуются специалисты:

- 1) инженер – в его роли действует исполнитель ВКР;
- 2) научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д}, \quad (4.1.3)$$

где  $K_{вн}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_d$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_k = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (4.1.4)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 365$ );

$T_{ВД}$  – выходные дни ( $T_{ВД} = 52$ );

$T_{ПД}$  – праздничные дни ( $T_{ПД} = 15$ ).

В таблице 3 приведено определение продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 1, при использовании формулы 2 необходимо вставить в таблицу дополнительный столбец для  $t_{prob}$ . Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента  $K_d = 1,1$ . Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение  $t_{ож} \cdot K_d$ . Столбцы 8 и 9 – трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на  $T_k=1,225$ . Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Величины трудоемкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленного в таблице 4.

Таблица 3. Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	1	3	1,80	1,98	–	2,43	–
Составление и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,64	0,26	3,23	0,32
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	6	8	6,80	2,24	7,48	2,75	9,16
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,54	0,15	1,89	0,19
Обсуждение литературы	НР, И	1	2	1,40	0,46	1,54	0,57	1,89
Выбор исходных параметров	НР, И	2	3	2,40	2,64	1,85	3,23	2,26
Расчет функциональной зависимости	И	8	10	8,80	–	9,68	–	11,86
Изучение результатов	НР, И	4	6	4,80	0,53	5,28	0,65	6,47
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	3	4	3,40	–	3,74	–	4,58
Оформление графического материала	И	1	2	1,40	–	1,54	–	1,89
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,92	1,54	1,13	1,89
Итого:				36,00	12,96	33,07	15,87	40,50

Таблица 4. Линейный график работы

Этап	НР	И	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	
1	2,43	–	■																								
2	3,23	0,32		■	■																						
3	2,75	9,16				■	■	■	■																		
4	1,89	0,19									■																
5	0,57	1,89										■	■														
6	3,23	2,26												■	■	■											
7	–	11,9																									
8	0,65	6,47																									
9	–	4,58																									
10	–	1,89																									
11	1,13	1,89																									

НР – ■ И – ■

#### 4.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (*i*-го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Введем обозначения:

–  $TP_{\text{общ}}$  – общая трудоемкость проекта;

–  $TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоемкость *i*-го (*k*-го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;

–  $TP_i^H$  – накопленная трудоемкость *i*-го этапа проекта по его завершении;

–  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоемкость работ, выполняемых *j*-м участником на *i*-м этапе, здесь  $j = \overline{1, m}$  – индекс исполнителя, в нашем примере  $m = 2$ .

Степень готовности определяется формулой (5):

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}. \quad (4.1.5)$$

Применительно к таблице 3 величины  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) находятся в столбцах (6,  $j = 1$ ) и (7,  $j = 2$ ).  $TP_{\text{общ}}$  равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Расчет  $TP_i$  (%) и  $CG_i$  (%) на основе этих данных приведен в таблице 5.

Таблице 5. Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i$ , %	$CG_i$ , %
Постановка задачи	5,00	5,00
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	6,67	11,67
Подбор и изучение материалов по тематике	18,89	30,56
Разработка календарного плана	3,89	34,44

Таблица 5. Продолжение

Этап	ТР <sub>i</sub> , %	СГ <sub>i</sub> , %
Обсуждение литературы	3,89	38,33
Выбор исходных параметров	6,67	45,00
Расчет функциональной зависимости	24,44	69,44
Изучение результатов	13,33	82,78
Оформление расчетно-пояснительной записки	9,44	92,22
Оформление графического материала	3,89	96,11
Подведение итогов	3,89	100,00

## 4.2 Расчет сметы на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

### 4.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых

непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 6.

Таблица 6. Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	250	1 уп.	250
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Итого:			1800

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $S_{\text{мат}} = 1800 \cdot 1,05 = 1890$  руб.

#### 4.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, в его роли выступает исполнитель проекта, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083}. \quad (4.2.1)$$

где 25,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей недели.

Расчет затрат на полную заработную плату приведены в таблице 7. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{\text{ПР}} = 1,1$ ;  $K_{\text{Доп.ЗП}} = 1,188$ ;  $K_{\text{Р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{Доп.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}}; \quad (4.2.2)$$

$$K_{\text{И}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699.$$

Таблица 7. Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{И}}$	Фон з/п, руб.
НР	26624	1061,44	23	1,699	41477,74
И	15470	616,75	29	1,699	30388,01
Итого:					71865,74

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{ЗП}} \cdot 0,3; \quad (4.2.3)$$

$$C_{\text{соц}} = 71865,74 \cdot 0,3 = 21559,722.$$

### 4.2.3 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (4.2.4)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $C_{\text{э}} = 5,748$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 2 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (4.2.5)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ , определяется исполнителем самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение  $t_{\text{об}}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (4.2.6)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности  $K_c = 1$ .

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 8.

Таблица 8. Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	224	0,3	386,27
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			386,27

#### 4.2.4 Расчет амортизационных расходов

В данной статье представлен расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (4.2.7)$$

где  $H_{\text{А}}$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2019 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне,  $F_{\text{Д}}$  равен:

$$F_{\text{Д}} = 298 \cdot 8 = 2384.$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

$H_{\text{А}}$  определяется как величина обратная  $C_{\text{А}}$ , в данном случае это:

$$H_A = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 224 \cdot 60000 \cdot 1}{2384} = 2255.$$

#### 4.2.5 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ЗП} + C_{СОЦ} + C_{ЭЛ.ОБ} + C_{АМ}) \cdot 0,1. \quad (4.2.8)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{ПРОЧ} = (1890 + 71865,74 + 21559,7 + 386,3 + 2255) \cdot 0,1 = 9795,67.$$

Расчет общей себестоимости разработки.

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта.

Таблица 8 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	1890
Основная заработная плата	$C_{ЗП}$	71865,74
Отчисления в социальные фонды	$C_{СОЦ}$	21559,7
Расходы на электроэнергию	$C_{ЭЛ.ОБ}$	386,3
Амортизационные отчисления	$C_{АМ}$	2255
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	9795,67
Итого:	$C$	107752,414

#### 4.2.6 Расчет прибыли

Ввиду отсутствия данных, прибыль  $G$  рассчитана как 20 % от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0,2; \quad (4.2.9)$$

$$G = 107752,414 \cdot 0,2 = 21550,48.$$

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (G + C) \cdot 0,2; \quad (4.2.10)$$

$$\text{НДС} = (107752,414 + 21550,48) \cdot 0,2 = 25860,58.$$

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (4.2.11)$$

$$C_{\text{НИР}} = 107752,414 + 21550,48 + 25860,58 = 155165,47.$$

#### 4.3 Оценка экономической эффективности проекта

Так как установление зависимости десублимации от толщины стенки и ее теплофизических параметров носит условно-проектный характер, в данном случае оценка экономической эффективности и определение срока окупаемости инвестиций не представляется возможным. Другими словами, установление функциональной зависимости десублимации от параметров стенки не несет в себе финансовой выгоды и представляет лишь научный интерес.

## **5 Социальная ответственность**

Для снижения травматизма и профессиональной заболеваемости повсеместно внедряется комплексная система управления охраной труда. Совместно с внедрением системы охраны труда должно проводиться непрерывное повышение качества и эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты от вредных и опасных факторов, с которыми сталкивается рабочий персонал в течение профессиональной деятельности.

Охрана труда – система обеспечения безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая правовые, социально-экономические, лечебно-профилактические и иные мероприятия.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого может привести к травме или другому резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего может привести к заболеванию или снижению трудоспособности [45].

Сложность обеспечения охраны труда сводится к использованию достижений многих областей человеческой деятельности, связанных с созданием безопасности труда. Так, при разработке требований производственной санитарии используются результаты ряда медико-биологических исследований.

Успешное решение задач по обеспечению безопасности труда во многом зависит от квалификации специалистов в этой области, от их умения оперативно принимать правильные решения в сложных условиях производства.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях профилактики несчастных случаев и являются обязательными для исполнения рабочими, инженерно-техническим и руководящим составом.

## 5.1 Характеристика вредных и опасных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 9.

Таблица 9. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	–	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность
	Ионизирующее излучение (ВЧ,УВЧ,СВЧ и так далее)	–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарноэпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

На работника лаборатории воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещенность; наличие излучения;

– психофизиологические: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ**

### **5.2.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

### **5.2.2 Технические мероприятия**

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 показано на рисунке 22.

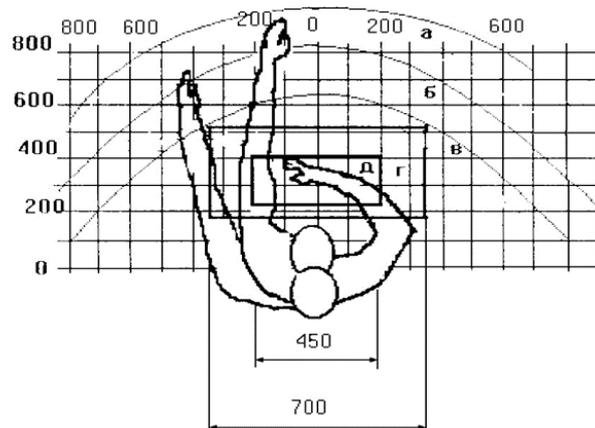


Рисунок 22. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

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:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура - в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа).

Документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева) - литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не

менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 - 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглубленным передним краем.

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° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали; – 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.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической

напряженности, рекомендуются оттенки теплых тонов, которые возбуждают активность человека.

### 5.2.3 Условия безопасной работы с ПЭВМ

Основные параметры, характеризующие условия труда - это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещенность.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [46] и приведены в таблице 2.

Таблица 10 - Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путем. В помещении должны подаваться следующие объемы наружного воздуха: при объеме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека - не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объеме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность - 40%, скорость движения воздуха - 0,1 м/с, температура летом - 20 - 25 °С, зимой - 13 - 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. 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.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока. Согласно [46] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц - 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц - 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц- 2 кГц - 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц - 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с ПЭВМ, источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [46] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

#### **5.2.4 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ПЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

– при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развертки.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие.

Тепловое (термическое) действие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.

Химическое (электролитическое) действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме человека растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма.

Биологическое действие проявляется в опасном возбуждении живых клеток и тканей организма, в результате чего они могут погибнуть.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- параметров электрического тока, протекающего через тело человека (величины напряжения, частоты, рода тока, приложенного к телу);
- пути тока через тело человека (рука-рука, рука-нога, нога-нога, шея-ноги и др.);
- продолжительности воздействия тока через тело человека;
- условий внешней среды (влажности и температуры);
- состояния организма человека (толщины и влажности кожного покрова, состояния здоровья и возраста).

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока проявляется в виде электрических ударов и электротравм.

Электрическим ударом называется такое действие электрического тока на организм человека, в результате которого мышцы тела (например, рук, ног и т.д.) начинают судорожно сокращаться.

Электрической травмой называется такое действие электрического тока на организм человека, при котором повреждаются ткани и внутренние органы человека (кожа, мышцы, кости и т.п.).

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих частей) [47].

### **5.2.5 Пожарная безопасность**

Согласно [48], 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. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

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.

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

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:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС - тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## Вывод

С использованием численного моделирования установлены следующие закономерности нестационарного процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальную емкость с гладкими внутренними стенками объемом  $1 \text{ м}^3$ :

1. Определено влияние толщины стенки емкости на изменение ее средней производительности, показано что изменение толщины стенки с  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $20 \cdot 10^{-3}$  м приводит к уменьшению средней производительности емкости на 0,2%.

2. Определено влияние теплофизических свойств материала стенки на скорость десублимации  $UF_6$ , показано, что изменение коэффициента температуропроводности емкости с  $2,8 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^2/\text{с}$  до  $12,9 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^2/\text{с}$  приводит к увеличению средней производительности на 0,1%.

3. Получены аппроксимирующие зависимости скорости десублимации  $UF_6$  от времени, толщины стенки емкости и ее теплофизических свойств.

В результате проведенных исследований показано, что влияние толщины стенки емкости и ее теплофизических свойств сказывается только на начальном этапе заполнения емкости, после чего основным фактором, влияющим на скорость десублимации  $UF_6$ , является толщина слоя десублимата и его термическое сопротивление.

Таким образом, полученные результаты вносят определенный вклад в теоретическое исследование процесса десублимации  $UF_6$  и показывают, что при выборе толщины стенки емкостей, предназначенных для десублимации  $UF_6$ , и материала, для их изготовления, необходимо учитывать исключительно прочностные и конструкционные особенностями их эксплуатации.

## Список используемой литературы

- 1) Основы химии и технологии мономеров: учеб.пособие / Н.А. Платэ, Е.В. Сливинский. – М.: Наука: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2002. – 696 с.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Истомин 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) Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 2: учеб. для вузов / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др. – М.: Высш. шк., 2001. – 680 с.

10) 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.

11) 11. 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.

12) 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) Губанов С.М. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3. – № 4. – С. 383 – 388.

15) Весенин И.М. Математическая модель и результаты численных расчетов перелива UF<sub>6</sub> в присутствии микроколичеств легких примесей / И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, А.А. Шахтин и др. // Известия Томского государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 53 – 59.

- 16) Бойко В. И. Ядерный топливный цикл и режим нераспространения/ Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Исаченко Д.С.// Издательство Томского политехнического университета. – 2009. – С. 6 – 7.
- 17) Борман В.Д. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей // Издательство МИФИ – 2011.
- 18) Галкин Н.П. Химия и технология фтористых соединений урана. - М.: Госатомиздат, 1961. - 349 с.
- 19) . Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана. - М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. - 396 с
- 20) Андреев Г.Г., Дьяченко А.Н. Введение в химическую технологию ядерного топлива. - Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 150 с.
- 21) 24. Ежов В.К. Промышленная ректификационная установка для глубокой очистки сублиматного гексафторида урана // Атомная энергия. - 2007. - Т. 103. - № 5. - С. 314-317
- 22) Байдали С.А., Дядик В.Ф., Юрков А.С. Математическая модель производства гексафторида урана // Известия Томского политехнического университета. - 2009. - Т. 315. - № 2. - С. 84-90.
- 23) Белозеров Б.П., Русаков И.Ю., Андреев Г.Г. и др. Анализ процесса и аппаратуры для десублимации гексафторида урана и других летучих фторидов // Цветные металлы. - 2012. - № 1. - С. 58-61.
- 24) Голик В.М., Голик С.В., Иванов С.Л. и др. Разработка массспектрометрической с индуктивно-связанной методики анализа гексафторида урана с хроматографическим разделением урана и примесей на колонке со смолой UTEVA // Аналитика и контроль. - 2011. - Т. 15. - № 2. - С. 174-181.
- 25) Виноградов С.Н., Таранцев К.В., Виноградов О.С. Выбор и расчет теплообменников. - Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2001. - 100 с.
- 26) Обогащения урана / Под ред. С. Виллани: Пер. с англ. Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

27) Маслов А.А., Каляцкая Г.В., Амелина Г.Н., Водянкин А.Ю., Егоров Н.Б. Технология урана и плутония: учебное пособие. – 2-е изд. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 144 с.

28) Каляцкая Г.В., Страшко А.Н. Химия и аналитическая химия урана и тория: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 – 80 с.

29) Malyugin, R.V. Desublimation for purification and transporting UF<sub>6</sub>: process description and modeling / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin // Separation & Purification Reviews. - 2017 - Vol. 46. - № 1. - P. 81-89.

30) Задача Стефана / А.М. Мейрманов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 240 с.

31) Katz J.J., Rabinowiych E. The chemistry of uranium. Part I. The element, its binary and related compounds. McGraw-Hill (Ed). New York. 1961.

32) Llewellyn D.R. Some physical properties of uranium hexafluoride // J. Chem. Soc. (Resumed). 1953. P. 28–36.

33) Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А.Н., Якимов А.С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2004.

34) Котельникова А. А. Влияние отношения высоты к радиусу емкости на динамику ее заполнения десублимированным UF<sub>6</sub> / А. А. Котельникова, А. Ф. Цимбалюк, Р. В. Малюгин, А. А. Орлов // Изотопы: технологии, материалы и применение: материалы IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 30 октября - 3 ноября 2017 г. - Томск: Изд-во Графика, 2017 - [С. 15].

35) Крицкий О. Л., А. А. Михальчук, А. Ю. Трифонов, М.Л. Шинкеев Теория вероятности и математическая статистика Томск: Изд-во Томский ТПУ, 2010.

36) Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965.

- 37) Исаченко В. П. Теплопередача / Исаченко В.П., В.А. Осипова, А.С. Сукомел – 3-е издание // «Энергия» – Москва 1974
- 38) Кнышова Е. Н. Экономика организации: учебник / Е. Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форум Инфра-М, 2012. – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.
- 39) Бочаров В. В. Инвестиции: учебник для вузов / В. В. Бочаров. – 2-е изд. – СПб: Питер, 2009. – 381 с. – Учебник для вузов.
- 40) Староверова Г. С. Экономическая оценка инвестиций: учебное пособие / Г. С. Староверова, А. Ю. Медведев, И. В. Сорокина. – 2-е изд., стер. – Москва: КноРус, 2009. – 312 с
- 41) Несветаев Ю. А. Экономическая оценка инвестиций: учебное пособие / Ю. А. Несветаев; Московский Государственный индустриальный университет; Институт дистанционного образования. – 3-е изд., стер. – Москва: Изд-во МГИУ, 2006. – 162 с.
- 42) Шульмин В. А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В. А. Шульмин, Т. С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с.
- 43) Голосовский С. И. Эффективность научных исследований в промышленности / С. И. Голосовский. – Москва: Экономика, 1986. – 159 с.
- 44) Мигуренко Р. А. Научно-исследовательская работа: учебно-методическое пособие / Р. А. Мигуренко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования (ИДО). – 2-е изд., стер. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 184 с
- 45) Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.
- 46) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».
- 47) ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
- 48) Пожаро- взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность