

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

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Влияние степени заполнения емкости на динамику процесса десублимации в ней гексафторида урана</b>

УДК 621.039.3:546.791.6'161

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A92	Лейба Е.В.		

Руководитель ВКР

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

Консультант (руководство ВКР на английском языке)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Тимченко С.Н.	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов М.А.	Д.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю.В.	Д.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Селиваникова О.В.			

School of Nuclear Science & Engineering  
Field of training: 14.03.02 Nuclear Science and Technology  
Nuclear Fuel Cycle Division

### BACHELOR WORK

<b>Topic of research work</b> <b>Influence of the filling degree of the container on the dynamics of the process of desublimation of uranium hexafluoride in it</b>
--

UDC 621.039.3:546.791.6'161

Student

Group	Full name	Signature	Date
0A92	Leyba E. V.		

Scientific supervisor

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor	Orlov A.A.	Ph. D, Professor		

Advisers

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor NFGD SNSE TPU	Timchenko S.N.	Ph. D, Associate Professor		

### ADVISERS:

Section “Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving”

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor	Gasanov M.A.	Ph. D, Professor		

Section “Social Responsibility”

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor	Perederin Y.V.	Ph. D, Professor		

### ADMITTED TO DEFENSE:

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Senior Lecturer	Selivanikova O.V.			

Tomsk – 2023

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
<b>Универсальные</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные</b>	
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
<b>Профессиональные</b>	
ПК(У)-1	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы
ПК(У)-2	Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов атомной отрасли с использованием стандартных методов и компьютерных кодов для проектирования и анализа
ПК(У)-3	Готов к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу полученных экспериментальных данных

ПК(У)-4	Способен использовать технические средства для измерения основных параметров объектов исследования
ПК(У)-5	Готов к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
ПК(У)-6	Способен использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования объектов атомной отрасли
ПК(У)-7	Способен к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-8	Готов к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	Способен к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	Готов к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-11	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-12	Готов к эксплуатации современного физического оборудования, приборов и технологий
ПК(У)-13	Способен к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда
ПК(У)-14	Готов разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-15	Способен к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

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

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)                      (Дата)                      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A92	Лейба Евгений Владимирович

Тема работы:

Влияние степени заполнения емкости на динамику процесса десублимации в ней гексафторида урана
---

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 27-76/С от 27.01.2023
---	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники по физико-химическим свойствам UF <sub>6</sub> , основам и особенностям процесса десублимации UF <sub>6</sub> на разделительных предприятиях. Двух и трехмерная математические модели процесса десублимации UF <sub>6</sub> 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 двух и трехмерной математических моделей десублимации UF<sub>6</sub> 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: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Фазовая диаграмма UF<sub>6</sub></li> <li>2. Шнековый реактор</li> <li>3. Реактор псевдооживленного слоя</li> </ol>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Пламенный реактор</li> <li>5. Скребковый десублиматор</li> <li>6. Десублиматор с тепловым сбросом</li> <li>7. Десублиматор с развитой поверхностью</li> <li>8. Многокамерный десублиматор с одной тепловой стенкой</li> <li>9. Многокамерный десублиматор с двумя теплыми стенками</li> <li>10. Десублиматор комбинированного типа</li> <li>11. Вертикальная погружная емкость</li> <li>12. Вертикальная емкость, погруженная в хладагент</li> <li>13. Горизонтальная транспортная емкость</li> <li>14. Вертикальная погружная емкость с вертикальным оребрением для десублимации <math>UF_6</math></li> <li>15. Расчетная область для цилиндрической емкости</li> <li>16. Расчетная область с учетом эллиптичности донной стенки емкости</li> <li>17. Расчетная область с учетом эллиптичности обеих стенок емкости</li> <li>18. Схема разбиения емкости с вертикальным оребрением наподобласти</li> <li>19. Разностная сетка и разбиение расчетной области для емкостей с гладкими внутренними стенками</li> <li>20. Преобразование координат</li> <li>21. Контрольный объем</li> <li>22. Разбиение емкости с вертикальным оребрением и слоя десублимированного в ней <math>UF_6</math> разностной сеткой (вид сбоку)</li> <li>23. Разбиение расчетной области на подобласти разностной сеткой для емкости с вертикальным оребрением (подобласть вид сверху)</li> <li>24. Динамика массы десублимированного <math>UF_6</math> в безреберных емкостях различного объема</li> <li>25. Динамика массы десублимированного <math>UF_6</math> емкостях с оребрением различного объема</li> <li>26. Зависимость площади теплообменной поверхности от объема емкостей</li> <li>27. Зависимость средней производительности от времени процесса десублимации для безреберных емкостей</li> <li>28. Зависимость средней производительности от времени процесса десублимации для емкостей с оребрением</li> <li>29. Зависимость средней производительности безреберных емкостей от степени их загрузки</li> <li>30. Зависимость средней производительности емкостей с оребрением от степени загрузки</li> <li>31. Скриншот программы, демонстрирующий</li> </ol>
--	--

	«перемерзание» на ребрах емкости
--	----------------------------------

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Влияние степени заполнения емкости на динамику процесса десублимации в ней гексафторида урана	Профессор Отделения ядерно-топливного цикла, д.т.н. Орлов Алексей Алексеевич
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Профессор отделения социально-гуманитарных наук, д. э. н. Гасанов Магеррам Али оглы
Социальная ответственность	Доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Юрий Владимирович

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А92	Лейба Е.В.		

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

School of Nuclear Science & Engineering  
Field of training: 14.03.02 Nuclear Science and Technology  
Nuclear Fuel Cycle Division

APPROVE BY:  
 Program Director

\_\_\_\_\_ ( Signature)    \_\_\_\_\_ ( date)    \_\_\_\_\_ (Full name)

**EXERCISE**  
**for graduation qualification work**

In the shape of:

bachelor work
---------------

Student:

<b>Group</b>	<b>Full name</b>
0A92	Leyba Evgeny Vladimirovich

Work theme:

Influence of the filling degree of the container on the dynamics of the process of desublimation of uranium hexafluoride in it	
Approved by the order of the director (date, number)	№ 27-76/C dated January 27, 2023

Deadline for student submission of completed work:	
--	--

**TECHNICAL TASK:**

<b>Initial data for work</b>	Exercise. Literary sources on the physicochemical properties of UF <sub>6</sub> , the basics and features of the UF <sub>6</sub> desublimation process at separation plants. Two and three-dimensional mathematical models of the UF <sub>6</sub> desublimation process in vertical immersion tanks.
<b>List of issues to be researched, designed and developed</b>	1. Review and analysis of literature 2. Description of two and three-dimensional mathematical models of UF <sub>6</sub> desublimation into vertical submersible tanks 3. Results of calculations, their analysis 4. Economic calculation 5. Occupational health and safety 6. Conclusions. Conclusion
<b>List of graphic material</b>	Charts: 1. Phase diagram of UF <sub>6</sub> 2. Screw reactor 3. Fluidized bed reactor 4. Flame Reactor



	<p>5. Scraper desublimator<sup>6</sup>.</p> <p>6. Heat Reset Desublimator</p> <p>7. Desublimator with developed surface</p> <p>8. Multi-chamber desublimator with one thermal wall</p> <p>9. Multi-chamber desublimator with two warm walls</p> <p>10. Combined type desublimator</p> <p>11. Vertical immersion tank</p> <p>12. Vertical tank immersed in refrigerant</p> <p>13. Horizontal transport container</p> <p>14. Vertical immersion tank with vertical fins for UF<sub>6</sub> desublimation</p> <p>15. Calculation area for a cylindrical container</p> <p>Fig. 16. Computational area taking into account the ellipticity of the bottom wall of the tank</p> <p>Fig. 17. Computational area taking into account the ellipticity of both vessel walls</p> <p>18. Scheme of dividing a tank with vertical fins into subdomains</p> <p>19. Difference grid and division of the computational domain for containers with smooth inner walls</p> <p>20. Coordinate transformation</p> <p>21. Control volume</p> <p>Fig. 22. Dividing a container with vertical fins and a layer of UF<sub>6</sub> desublimated in it with a difference grid (side view)</p> <p>Fig. 23. Dividing the computational domain into subdomains by a difference grid for a container with vertical ribs (subdomain top view)</p> <p>24. Dynamics of the mass of desublimated UF<sub>6</sub> in ribless containers of various volumes</p> <p>Fig. 25. Dynamics of the mass of desublimated UF<sub>6</sub> in containers with fins of various volumes</p> <p>26. Dependence of the area of the heat exchange surface on the volume of containers</p> <p>Fig. 27. Dependence of the average productivity on the time of the desublimation process for ribless containers</p> <p>Fig. 28. Dependence of the average productivity on the time of the desublimation process for containers with fins</p> <p>29. Dependence of the average productivity of ribless tanks on the degree of their loading</p> <p>30. Dependence of the average performance of tanks with fins on the degree of loading</p> <p>31. Screenshot of the program demonstrating "freezing" on the ribs of the tank</p>
--	--

<b>Consultants for the sections of the final qualifying work</b>	
<b>Chapter</b>	<b>Consultant</b>
Influence of the filling degree of the container on the dynamics of the process of desublimation of uranium hexafluoride in it	Professor of the Department of Nuclear Fuel Cycle, Grand PhD in Engineering sciences, Orlov Alexey Alekseevich
Data analysis	
Financial management, resource efficiency and resource saving	Professor of the Department of Social Sciences and Humanities, Grand PhD in Economic sciences, Hasanov Maharram Ali
Social responsibility	Associate Professor of the Department of Nuclear Fuel Cycle, Grand PhD in Engineering sciences, Perederin Yuri Vladimirovich

<b>Date of issue of the assignment for graduation qualification work on a linear schedule</b>	
---	--

**The task was given by the leader:**

<b>Position</b>	<b>Full name</b>	<b>Academic degree, academic rank</b>	<b>Signature</b>	<b>Date</b>
Professor	Orlov A.A.	Ph. D, Professor		

**The task was accepted by the student:**

<b>Group</b>	<b>Full name</b>	<b>Signature</b>	<b>date</b>
0A92	Leyba E.V.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0A92	Лейба Евгений Владимирович

<b>Школа</b>	ИЯТШ	<b>Отделение</b>	Отделение информационных технологий
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
Нормы и нормативы расходования ресурсов	
Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

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

Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
Планирование процесса управления НИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ
Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение ресурсоэффективности проекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>2. Матрица SWOT</li> <li>3. График проведения и бюджет НИ</li> <li>4. Расчёт денежного потока</li> <li>5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</li> </ol>	
--	--

<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>
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д. э. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0A92	Лейба Евгений Владимирович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0A92	Лейба Евгению Владимировичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Влияние степени заполнения емкости на динамику процесса десублимации в ней гексафторида урана
---

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: вертикальная погружная емкость с вертикальным без оребрением и с оребрением Область применения: атомная промышленность.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <p>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>– Правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>– Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ:</p> <p>– ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</p>
<p><b>2 Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных излучений;</li> <li>– недостаточная освещенность;</li> <li>– электробезопасность;</li> <li>– психофизиологические факторы;</li> <li>– пожарная и взрывная безопасность</li> </ul>
<p><b>3 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выбор и описание типичной ЧС: пожар;</li> <li>– обоснование мероприятий по предотвращению АС и ЧС;</li> <li>– порядок действий при возникновении АС и ЧС.</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>
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0A92	Лейба Евгений Влидимирович		

## ABSTRACT

Final qualifying work includes: 107 pages, 22 tables, 34 figures, 68 references.

Key words: simulation analysis, desublimation, uranium hexafluoride, refrigerant, non-stationary process.

The object of the study are vertical submersible tanks of various sizes with and without vertical fins.

Purpose of work: numerical study of the process of desublimation of gaseous  $\text{UF}_6$  into vertical submersible tanks with a volume of 2.0 ... 4.0  $\text{m}^3$  without fins and with vertical fins to determine the effect of the degree of filling of containers on the dynamics of the process of desublimation of uranium hexafluoride in them.

In the course of the study, the following was carried out: numerical determination of the effect of the degree of filling of containers on the dynamics of desublimation of dump  $\text{UF}_6$  in vertical submersible tanks without fins and with vertical fins with a volume of 2.0 ... 4.0  $\text{m}^3$ . It is shown that the filling time of tanks with and without fins of the same volume with desublimated  $\text{UF}_6$  is much shorter for tanks with fins (by 1.73–2.15 times), which is explained by the larger area of their heat exchange surface.

It is shown that the desublimation process is non-stationary. With an increase in the thickness of the desublimated layer, its thermal resistance increases, which leads to a slowdown in the desublimation process.

It is shown that the average productivity of tanks without fins decreases much faster than in tanks of the same volume with fins. The average performance of tanks with and without fins at 10% filling of the tanks is almost the same. With a further increase in the degree of filling, the average productivity becomes higher for tanks with vertical fins (1.71–2.06 times) due to the larger area of the heat exchange surface. The calculation showed that for tanks with a volume of 2.0, 2.5, 3.0  $\text{m}^3$  with fins, the maximum degree of filling is not achieved, due to "freezing" on the ribs.

The results can be used to improve the technology of desublimation of

uranium hexafluoride in JSC "PA ECP" and other separating enterprises in the industry.

## **Abbreviations**

NPP - nuclear power plant;

KIU - condensation-evaporation unit;

NFC - nuclear fuel cycle;

R&D - research and development work;

PC - personal electronic computer;

EMF - electromagnetic field;

## Оглавление

Introduction.....	18
1 BASES OF THE PROCESS OF UF <sub>6</sub> DESUBLIMATION AND APPROACHES TO ITS SIMULATION ANALYSIS.....	19
1.1 Physicochemical characteristics UF <sub>6</sub> .....	19
1.1.1 Physical properties UF <sub>6</sub> .....	19
1.1.2 Chemical properties UF <sub>6</sub> .....	21
1.2 Methods for obtaining UF <sub>6</sub> in industries.....	23
1.3 Desublimation of uranium hexafluoride at separation plants.....	31
1.4 Desublimation of uranium hexafluoride into vertical containers.....	33
1.5 Desublimation of uranium hexafluoride into horizontal tanks.....	35
2 SIMULATION ANALYSIS OF THE PROCESS OF UF <sub>6</sub> DESUBLIMATION IN VERTICAL SUBMERSIBLE TANK WITH AND WITHOUT FIN.....	36
2.1 Simulation analysis.....	36
2.2 Object of study.....	38
2.3 Two-dimensional simulation analysis of the UF <sub>6</sub> desublimation process.....	38
2.4 Simplified 3D Model.....	43
2.5 Formulation of the problem.....	44
2.6 Solution Method.....	45
3 INFLUENCE OF THE DEGREE OF CAPACITY LOADING ON THE DYNAMICS OF THE PROCESS OF UF <sub>6</sub> DESUBLITATION.....	54
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	62
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	63
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	63
4.1.2 SWOT-анализ.....	65
4.2 Планирование научно-исследовательского проекта.....	68
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	68
4.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ.....	68
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	69
4.3 Бюджет научно-технического исследования.....	71
4.3.1 Расчёт материальных затрат.....	72



4.3.2	Расчёт затрат на специальное оборудование для научных работ....	72
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей темы .....	73
4.3.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	75
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	75
4.3.6.	Накладные расходы .....	76
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	76
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	77
Вывод по разделу "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение" .....		79
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	80
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	81
5.1.1	Правовые нормы трудового законодательства .....	81
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	82
5.2	Производственная безопасность .....	84
5.2.1	Анализ вредных и опасных факторов .....	84
5.2.2	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов .....	85
5.2.3	Отклонение показателей микроклимата .....	86
5.2.4	Превышение уровня шума .....	87
5.2.5	Повышенный уровень электромагнитного излучения .....	87
5.2.6	Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	88
5.2.7	Электробезопасность .....	92
5.2.8	Психофизиологические факторы .....	94
5.2.9	Пожарная и взрывная безопасность .....	95
5.3	Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях .....	97
Выводы по разделу «социальная ответственность» .....		98
Conclusions .....		100
Reference .....		101

## Introduction

Desublimation is the process of transition of a substance from the gaseous phase to the solid phase, bypassing the liquid state [1].

The desublimation process has found wide application in various fields of human activity, it is used in a number of chemical industries (for example, in the production of iodine, phthalic anhydride, maleic anhydride, anthraquinone, phthalonitrile, aluminum chloride [1], etc.), in metallurgy (for example, in the production of zirconium [2,3], hafnium [3], titanium [3, 4], molybdenum [4], arsenic [5-8] and other metals) to obtain substances and/or separate them. Also, this process is used in light and food industries [9, 10], medicine [11], in the separation of vapor-gas mixtures [12], etc.

In the nuclear fuel cycle, gaseous uranium hexafluoride  $UF_6$  is used as a working substance for the separation of  $^{235}U$  and  $^{238}U$  isotopes by centrifugation [13]. The process of desublimation of uranium hexafluoride is an important step in the production of enriched uranium. At the outlet of the cascade of gas centrifuges, the  $UF_6$  flows enriched and depleted in the  $^{235}U$  isotope are desublimated into transport tanks. In practice, vertical submersible transport tanks without internal finning, with horizontal and vertical finning, as well as horizontal transport tanks without internal finning, which are used mainly for import/export of  $UF_6$  [14, 15], are most widely used.

Construction and commissioning of new nuclear power plants in the world (currently, construction is underway in such countries as Turkey, Belarus, Finland, India, China, Russia). It leads to the fact that an increasing number of countries are striving to master the technology of uranium isotope enrichment (for example, Iran, China), as well as increasing competition between existing nuclear fuel producers for markets for their products.

Such work is important and necessary for the efficient and safe enrichment of uranium. Intensification of the  $UF_6$  desublimation process will increase the productivity of the plants and improve the quality of the resulting product. The design of  $UF_6$  desublimation collectors with increased productivity and the

improvement of tank designs will improve the technological parameters of the process and ensure safer operation of the equipment.

In addition, upgrading separation equipment and increasing its separation capacity also requires increased control over the enrichment process, including control over the quality and safety of the resulting product, as well as waste management and environmental protection measures. All these measures will help ensure the safety and efficiency of the uranium enrichment process in Russia and contribute to the development of nuclear energy in the world.

It is possible to increase the performance of the CIU in the following ways: develop and design the CIU with increased productivity; optimize the operating modes of the plants used, ensuring the maximum rate of desublimation (sublimation) of  $\text{UF}_6$  and the most complete filling of transport containers; improve the design of transport tanks.

The most promising way to solve problems of this kind is to use mathematical modeling of nonstationary processes of heat and mass transfer that occur during the desublimation of  $\text{UF}_6$ , since the experimental approach is expensive and takes a lot of time [1–7].

In this regard, the creation of such models and, with their help, research and optimization of the processes under consideration, as well as improving the design of equipment, become relevant.

## **1 BASES OF THE PROCESS OF $\text{UF}_6$ DESUBLIMATION AND APPROACHES TO ITS SIMULATION ANALYSIS**

### **1.1 Physicochemical characteristics $\text{UF}_6$**

#### **1.1.1 Physical properties $\text{UF}_6$**

$\text{UF}_6$  at nuclear fuel cycle enterprises can be in three states of aggregation, each of which has its own characteristics and requires special storage and transportation conditions.

Gaseous  $\text{UF}_6$  is used in a gas centrifuge cascade to enrich the light isotope. It is compressed and stored in special pressurized containers, which ensures safety during transportation and storage.

Solid  $\text{UF}_6$  enriched in the light isotope is transported between industry enterprises. For storage and transportation, special containers are used that provide protection against radiation and mechanical stress.

Liquid  $\text{UF}_6$  is used in the transfer operation and requires special storage and transportation conditions. For the safe storage and transportation of liquid  $\text{UF}_6$ , stainless steel containers are used, equipped with valves and mechanisms that ensure tightness and safety during transportation.

Thus, proper storage and transportation of  $\text{UF}_6$  is a key element in the safety of nuclear fuel cycle facilities.

Uranium hexafluoride, which is in the solid state, is a colorless crystalline substance, liquid is colorless, gas is colorless. The evaporation process proceeds with the absorption of heat. At  $T = 64.05\text{ }^\circ\text{C}$  (melting point) and a pressure of 1134 mm Hg. Art. Uranium hexafluoride exists in solid, liquid and gaseous states (triple point). [16-18]. The critical point of  $\text{UF}_6$  is characterized by the following parameters: temperature  $245\text{ }^\circ\text{C}$ , pressure 47876.6 mm Hg. Art. (6383 kPa or 45.5 atm.) Density  $1.39\text{ g/cm}^3$ . When the critical temperature is exceeded,  $\text{UF}_6$  decomposes [18].

sublimation of uranium hexafluoride from a solid to a gaseous state can occur over a wide range of pressures. In this case, the reverse process - desublimation of uranium hexafluoride from a gaseous state to a solid crystalline state - occurs with the appropriate maintenance of temperature and pressure. Desublimation makes it possible to transfer uranium hexafluoride from the gaseous state to the solid phase without the participation of the liquid phase, which improves the quality of the resulting product and increases the productivity of the equipment.

For desublimation of uranium hexafluoride from a gaseous state to a solid state, specialized desublimation collectors are used. They are containers with heat

exchange elements, where the condensation of  $UF_6$  vapors and the formation of solid phase crystals take place. When using desublimation collectors, it is possible to completely convert a gaseous product into a solid state.

The reverse process - the transformation of the solid phase of uranium hexafluoride into a gaseous one - occurs by heating at reduced pressure, which makes it possible to transfer the solid phase back to the gaseous state. This process can be used to reprocess enriched uranium.

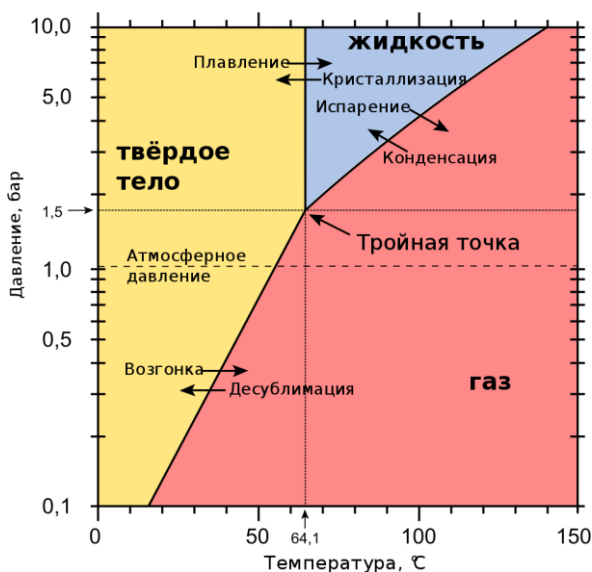


Figure 1.1 -  $UF_6$  phase diagram

It should be noted that the transition from the solid phase to the liquid phase is accompanied by an increase in volume by 1/3.

The physical properties of uranium hexafluoride make it possible to create a simple, convenient, and compact technology for handling it.

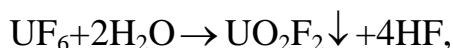
The low vapor pressure of  $UF_6$  at a temperature of 50...60 °C makes it possible to organize its safe and long-term storage in warehouses in sealed containers in the solid state.

### 1.1.2 Chemical properties $UF_6$

Due to such properties of uranium hexafluoride, its use requires special technical solutions and equipment, which makes its industrial application difficult

and makes its production more difficult and expensive, so uranium hexafluoride is mainly used in the nuclear industry.

Uranium hexafluoride is highly reactive. It smokes in air, instantly interacts with water and water vapor, hydrolyzes, forming a non-volatile compound uranyl fluoride ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ) and very aggressive hydrofluoric acid (HF):



Upon further interaction with water, uranyl fluoride ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ) dissociates, forming  $\text{UO}_2^{++}$  и  $\text{F}^-$ :

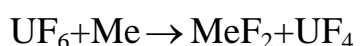


$\text{UF}_6$  interacts with organic compounds, forming non-volatile  $\text{UF}_4$  tetrafluoride and a number of intermediate compounds:



In addition, uranium hexafluoride is highly corrosive, which means that it can attack a variety of materials, including metals, plastics, and ceramics. Thus, to create equipment used in the production and processing of uranium hexafluoride, it is necessary to use materials that can withstand its high aggressiveness and not be subjected to corrosion or other destructive effects.

Losses (corrosion) of  $\text{UF}_6$  when interacting with the surfaces of some metals and their oxides are large, especially with zinc, silicon, lead, tin, iron:



Due to the reactions of  $\text{UF}_6$  with organic compounds, metals and their oxides,  $\text{UF}_4$  is deposited on the walls of process equipment. The resulting losses of the working gas lead to the fact that the target isotopes of uranium are removed from the technological process, which leads to a decrease in the productivity of individual centrifuges, and, consequently, to a decrease in the separation capacity of the entire cascade.

In addition, gaseous uranium hexafluoride reacted with moisture, organic substances and metals, giving up part of its fluorine, turns into a non-volatile

compound (powder) - tetrafluoride and, deposited on the internal cavities of separating machines, is removed from the technological process. The resulting corrosive losses of the working gas disturb its balance, the separating power of individual machines and the plant as a whole decreases. The most stable materials when interacting with  $UF_6$  are nickel, aluminium, magnesium, copper and their alloys. The stability of these metals is explained by the formation of surface films of metal fluorides, and in aluminum, by aluminum oxide [19–20].

In addition, a number of synthetic materials, such as Teflon, fluoride grease, etc., show sufficient stability.

Despite the rather specific physical and chemical properties of  $UF_6$ , exact observance of the requirements for the operation of the equipment makes it possible to avoid their negative impact on the technological process [18].

## **1.2 Methods for obtaining $UF_6$ in industries**

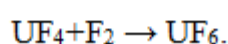
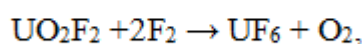
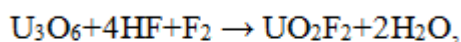
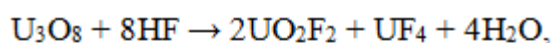
Raw materials obtained at ore factories in the form of  $U_3O_8$  for its further participation in the nuclear fuel cycle (NFC) are converted into  $UF_6$ , which is used as a working substance at separation enterprises. This is explained by the possibility of organizing the process of uranium enrichment in the gas phase and the monoisotopic nature of natural fluorine (the mixture consists of two uranium isotopes) [21, 22].

There are known methods for obtaining  $UF_6$  without the use of fluorine [23, 24], such as the disproportionation of  $UF_5$  and the interaction of dry oxygen with  $UF_4$  at a temperature of 800 °C, which are used only on a laboratory and semi-industrial scale and have not found wide application due to the formation of side compounds of uranium. They need to be removed from the system and recycled [24]. The use of halide fluorides ( $ClF$ ,  $ClF_3$ ,  $BrF_3$ , and others) and metal fluorides ( $AgF_2$ ,  $CoF_3$ ,  $HgF_2$ ), in addition to the above problems with the separation of reaction products from  $UF_6$ , leads to difficulties in the selection of structural materials due to the high corrosivity of the reagents [24].

In connection with the improvement of the process of electrolytic production

of fluorine, the main industrial method for obtaining UF<sub>6</sub> has become the fluorination of uranium in an atmosphere of HF and F<sub>2</sub> gases [23–26].

The fluorination operation can be implemented on apparatuses of several types [25]: in screw reactors (Figure 1.2), which are currently not used due to low productivity, in fluidized bed apparatuses (Figure 1.3) and in flame reactors (Figure 1.5) according to the following reactions:



When obtaining UF<sub>6</sub> in fluidized bed apparatus (Figure 2), UF<sub>4</sub> is used as a feedstock. A permanent fluidized bed is created by the CaF<sub>2</sub> pellets. To reduce the combustion temperature, fluorine is diluted with nitrogen, and at a temperature of 450-500 ° C, as a result of the last given reaction, gaseous UF<sub>6</sub> is formed. Advantages of this type of apparatus: no local overheating, good thermal control of the fluorination reaction. The disadvantages of this method can be considered small losses (1-2%) of uranium, which can not be extracted from the fluidized bed. The requirement for a high degree of uniformity of UF<sub>4</sub> and CaF<sub>2</sub> particles in terms of size and density, as well as the formation of difficult-to-open non-volatile complex compounds such as CaUF<sub>6</sub>, Na<sub>3</sub>UF<sub>7</sub>, etc., which must be extracted from the fluidized bed and reprocessed [26].

The technology for obtaining UF<sub>6</sub> in flame reactors (Figure 1.4) is more sensitive to the morphology and particle size than to the chemical formula of the initial uranium compound, therefore, both uranium oxide compounds and UF<sub>4</sub> can be used as raw materials [26]. The advantage of oxide raw materials is the simplification of the technological scheme for obtaining UF<sub>6</sub> (the stages of reduction of higher oxides to dioxides and hydrofluorination of dioxide to uranium tetrafluoride are excluded), as well as the absence of intermediate uranium fluorides in the system [25, 26]. The use of UF<sub>4</sub> significantly increases the concentration of uranium hexafluoride at the reactor outlet, reduces the amount of



heat released during fluorination, which facilitates reactor cooling, and also reduces the specific consumption of fluorine [25, 26]. Abroad, schemes for obtaining  $UF_6$  using uranium tetrafluoride are more common; in Russia, both types of feedstock are used [25].

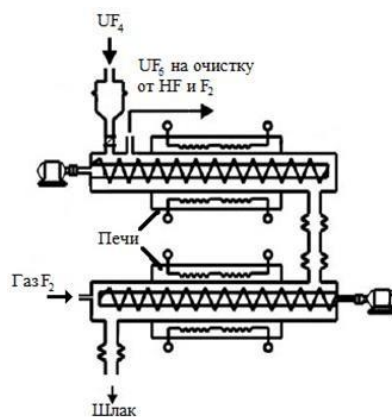


Fig. 1.2. screw reactor

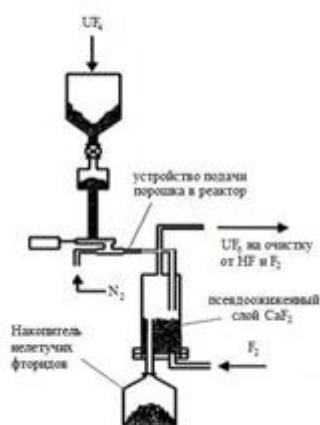


Fig. 1.3. Fluidized bed reacto

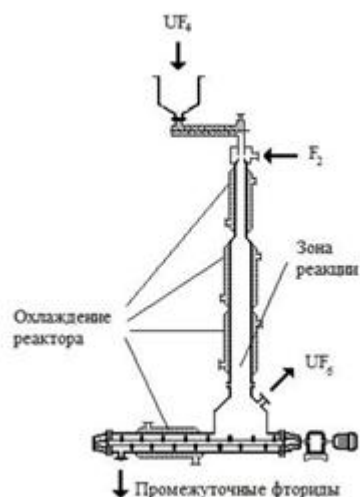


Fig. 1.4. flame reactor

In flame reactors, fluorination is carried out at a temperature of 900-1100 °C, while the temperature of the reactor walls must be maintained in the range of 450-500 °C. A decrease in the temperature of the walls leads to the formation of intermediate fluorides and their sticking to the walls, which is accompanied by a sharp deterioration in the heat transfer conditions, and an increase in the temperature of the walls can lead to the destruction of the reactor. Advantages of flame reactors: the maximum degree of fluorine reaction and high productivity, disadvantages: strict requirements for the purity of raw materials and the need for strict control over process parameters [24, 25].

Depending on the type of feedstock used, the concentration of  $UF_6$  in the composition of fluorination products varies from 45% (when using  $UF_4$ ) to 75% (when using uranium oxides), and the concentration of impurities changes accordingly [24, 25].

The resulting gas-vapor mixture for cleaning from dust and solid particles is filtered and sent to the desublimator in a heated state, where it is cooled and desublimated on the walls of the apparatus, and then placed in transport containers and sent to separation plants. To minimize the effect of volumetric desublimation, devices with a renewing or developed surface are used [27].

The following types of desublimators are known [28]: scraper (with a renewing surface); with thermal reset (with a renewing surface); with a

developed surface (with U-shaped tubes); multi-chamber with one warm wall; multi-chamber with two warm walls; combined type desublimators.

In vertical scraper-type desublimators (Figure 1.5), mechanical renewal of heat exchange surfaces is implemented. Vapor-gas mixture I enters a cooled cylindrical apparatus 1. Gaseous  $\text{UF}_6$  is desublimated on the inner surface of the apparatus, cut off by scrapers 2 located on a continuously rotating shaft, after which  $\text{UF}_6$  and gaseous impurities are removed from the apparatus (flows II and III, respectively). Currently, due to the complexity of ensuring the tightness of the apparatus body and the increased wear of the scrapers and the body, structures of this type are not used in sublimation production of  $\text{UF}_6$ .

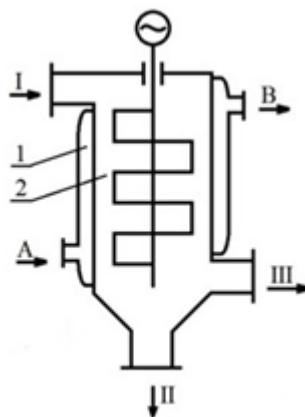


Fig. 1.5. Scraper desublimator

The desublimator with thermal release (Figure 1.6) consists of a cylindrical body 1 heated by a jacket 2. Cooling elements 3 (Field tubes) are mounted in several rows on the cover of the body, into which a refrigerant (streams A, B) or a coolant is supplied. Desublimation of  $\text{UF}_6$  occurs on the outer surface of the tubes when a refrigerant is supplied to them, as the thickness of the desublimated layer increases, a coolant is supplied to one of the rows of tubes instead of a refrigerant, after which  $\text{UF}_6$  is discharged into the transport containers and from the surface of the tubes of this row (flow II). Thus, a continuous renewal of the entire heat exchange surface of the apparatus is gradually carried out. Desublimators with thermal release are used in large-scale production [27, 28]. Their disadvantages are: a high degree of breakthrough of the target product at the time of

desublimation discharge and increased energy consumption due to the frequency of heating and cooling processes.

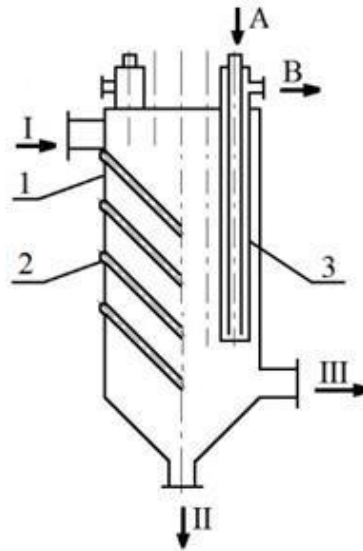


Fig. 1.6. Heat Reset Desublimator

The diagram of a desublimator with a developed surface is shown in Figure 1.7. It can be used in various industrial facilities such as oil and gas wells, gas processing plants, etc. For efficient operation, it is necessary to ensure the supply of refrigerant and the removal of condensate.

The advantages are its mobility and the ability to quickly transport to the desired object. It can also be used for desublimation of various types of vapor-gas mixtures, which makes it a versatile tool for various production tasks.

However, the disadvantage is its limited performance compared to stationary desublimators. It also requires the installation of a cooling system and a condensate removal system, which can further complicate the operation and use of this type of desublimator.

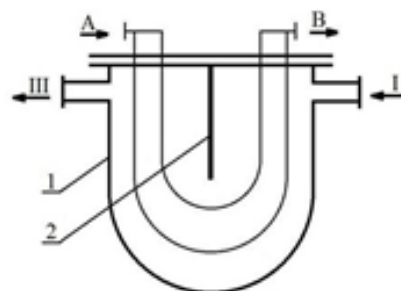


Fig. 1.7. Desublimator with developed surface

A diagram of a vertical multi-chamber desublimator with one warm wall is shown in Figure 1.8. Vapor-gas mixture I is supplied to the refrigerating chamber placed in the housing 1. From the outside, the housing is heated by electric heaters 2 to a temperature exceeding the sublimation temperature of the target product. The refrigerant enters the cooling elements 3 on the outer surface, which are ribs forming desublimation chambers 4 (view E).  $\text{UF}_6$  is desublimated in the chambers sequentially from the inlet of the gas-vapor mixture to the outlet, while the resulting aerosols pass through the gap 5 with a width  $\delta$  between the heated body and the fin, and re-sublimate upon contact with the heated wall, after which the newly formed vapors of the product are desublimated in the next chamber. When the apparatus is filled with desublimite, the supply of the vapor-gas mixture and refrigerant is stopped, the electric heaters increase the temperature in the apparatus to the melting point of  $\text{UF}_6$ , and the molten desublimite is removed from the apparatus through a branch pipe in the bottom part (flow II) [28]. Such desublimators are reliable in operation and make it possible to increase the efficiency of  $\text{UF}_6$  capture due to more complete and uniform filling of the apparatus.

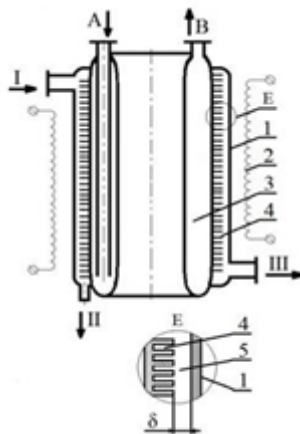


Fig. 1.8. Multi-chamber desublimator with one thermal wall

A multi-chamber apparatus with two warm walls (Figure 1.9) consists of an annular body 1, in which a desublimation chamber 2 is located, inside coaxially

with the body there is an annular cooling chamber 3, divided by partitions 4, which have holes 5 for circulation of the refrigerant. Heaters 6 are located on the inner and outer walls of the annular body.

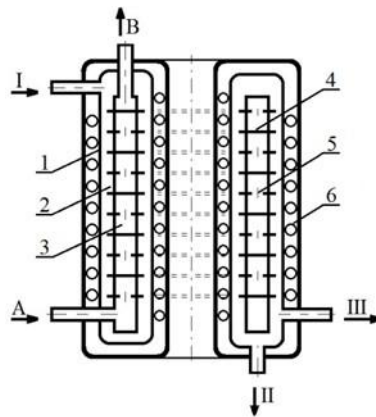


Fig. 1.9. Multi-chamber desublimator with two warm walls

For the separation of  $UF_6$  from the gas-vapor mixture at sublimation plants. Combined type desublimators (Figure 1.10) have found the greatest industrial application, consisting of an apparatus with a thermal release and a vertical submersible transport tank with smooth inner walls connected to the bottom of the desublimator.

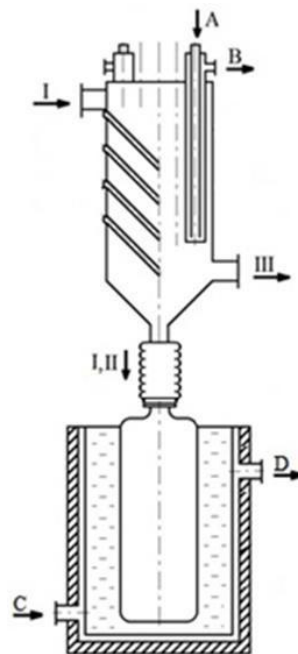


Fig. 1.10. Combined type desublimator

The vertical immersion tank is placed in a thermostat, fixed in it, without the possibility of floating, after which the thermostat is filled with a saturated  $\text{CaCl}_2$  solution with a temperature of minus 20 °C (flows C, D). After filling the tank to 54%, the use of a desublimator with thermal release becomes ineffective, so the supply of refrigerant to the desublimator is stopped and further filling of the tank occurs due to the desublimation of  $\text{UF}_6$  on the inner walls of the immersion tank. Non-desublimated impurities entering the apparatus as part of a gas-vapor mixture are removed from the desublimator.

Combined type desublimators have the same advantages and disadvantages as devices with thermal release. In addition, their disadvantages include the impossibility of filling vertical transport containers only in bulk (using a desublimator with thermal release), as well as the possibility of part of the desublimated  $\text{UF}_6$  getting into the production room when replacing filled transport containers with empty ones.

### **1.3 Desublimation of uranium hexafluoride at separation plants**

Separation plants use a special desublimation system to remove these light impurities from gaseous  $\text{UF}_6$ . In this desublimation system,  $\text{UF}_6$  passes through a series of condensers that cool it down to a temperature at which the impurities desublimates. The resulting solid desublimates and impurities are removed from the system, and pure gaseous  $\text{UF}_6$  is returned to the uranium isotope separation process.

Thus, the specificity of the desublimation process in separation plants is that it is necessary to remove light impurities from gaseous  $\text{UF}_6$ , which can significantly reduce the separation capacity of gas centrifuges. In this case, desublimation is carried out at lower temperatures than in sublimation production, but the principle and operation of the desublimation system are similar: the resulting desublimates is removed from the system, and pure gaseous  $\text{UF}_6$  is used in the further process of separating uranium isotopes.

In the flow of the fraction depleted in the light isotope, the content of light impurities is minimal [29, 30]. Despite this, the waste collector tanks are periodically (2 times per filling cycle) pumped into the suction system to extract light impurities from them.

The flow of the fraction enriched in  $^{235}\text{U}$  at the selective end of the cascade is purified from impurities in purification cascades before desublimation [31]. As a result, the total content of all impurities in the stream enriched in  $^{235}\text{U}$  fraction in accordance with the requirements of the technical specifications does not exceed  $5 \cdot 10^{-3}\%$  vol. [32, 33].

These features greatly simplify the implementation of the desublimation process by transferring  $\text{UF}_6$  from the gaseous phase to the solid phase directly in transport containers (without the use of special desublimators).

Indeed, after the closure of gas diffusion separation plants in the USA and France, the world positions in the enriched uranium market were redistributed. Now the main producers of enriched uranium are Russia, which uses centrifugal separation technology, and the URENCO consortium, which also owns centrifuge plants.

In turn, Japan and China have also become significant players in the enriched uranium market and seek to increase the share of their production in the domestic market as well as in foreign markets.

However, it is worth noting that enriched uranium is a strategic resource, and many countries, including the US and France, maintain their own production facilities. In addition, there are various projects in the field of developing new technologies for uranium enrichment, such as laser technologies, which can change the global positions that Russia and the URENCO consortium currently occupy.

In Russia, there are four enterprises for the separation of uranium isotopes by the gas centrifuge method. The distribution of the total separation capacity of the industry for these enterprises [34] is presented in Table 1.2.

Table 1.2. Distribution of the total separation power of Russian enterprises



Company	Contribution to total power, %
JSC "Ural Electrochemical Plant" (JSC "UEIP"), Novouralsk	49,0
JSC PO Electrochemical Plant (JSC PA ECP), Zelenogorsk	29,0
JSC "Siberian Chemical Combine" (JSC "SKhK"),Seversk	14,0
JSC "Angarsk electrolysis chemical plant" (JSC "AECC"),Angarsk	8,0

#### **1.4 Desublimation of uranium hexafluoride into vertical containers**

At the two largest enterprises JSC Ural Electrochemical Plant, Novouralsk and JSC PO Electrochemical Plant, Zelenogorsk, for desublimation of enriched and depleted  $UF_6$ , vertical submersible transport tanks are used [35, 36], which have a smooth inner surface or an inner horizontal , or vertical finning (Figure 1.11). Vertical ribs of a rectangular shape are used in dump tanks, horizontal ones - in some selective ones. The advantage of this method is the simplicity of the device, the convenience and cost-effectiveness of its operation [37, 38]. The disadvantage of desublimation into vertical submersible tanks is a decrease in its productivity as the tank is filled, which occurs due to the low thermal conductivity of the desublimated  $UF_6$  layer. In this regard, to ensure the necessary performance of the desublimation sections, it is necessary to use several containers connected to a manifold and operating in parallel.

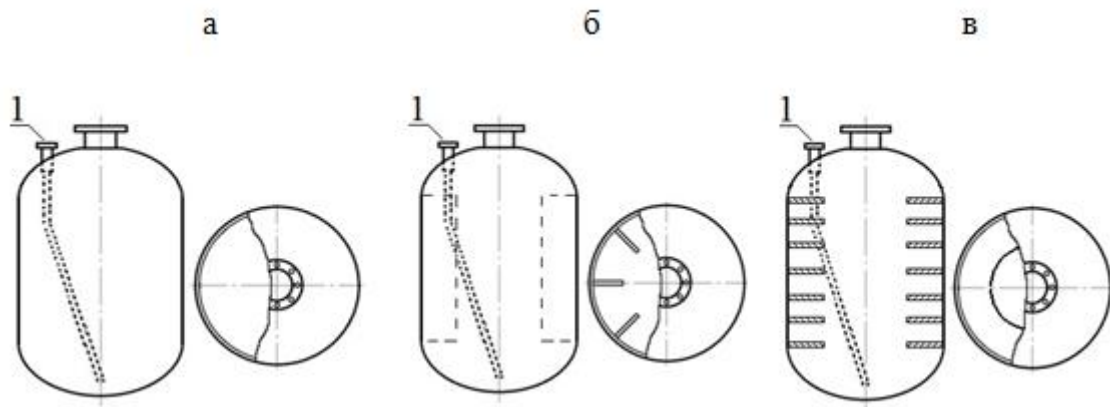


Fig. 1.11. Vertical immersion tank

a - smooth inner walls, b - vertical finning, c - horizontal finning  
(1 - suction pipe)

Vertical submersible transport tanks (Figure 1.11) (1) are placed in a thermostat (2), fixed in it, without the possibility of floating, after which the thermostat is filled with a saturated  $\text{CaCl}_2$  solution (streams I, II), which is cooled with liquid nitrogen (3) to a temperature of minus  $20^\circ\text{C}$ . Then, gaseous  $\text{UF}_6$  (flow A) is fed into the transport tanks, and as a result of heat and mass transfer processes, it is desublimated.

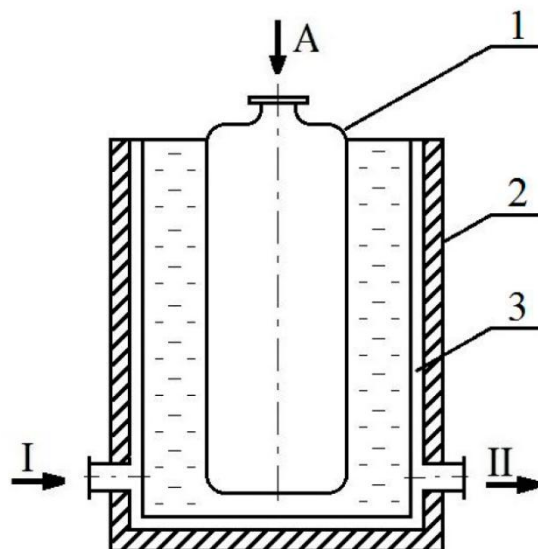


Fig. 1.12. Vertical tank immersed in refrigerant

The advantage of desublimation into vertical submersible containers is the convenience and economy of its operation [37, 38]. The disadvantage is a sharp

decrease in productivity as the tank is filled, due to the relatively low heat transfer coefficient from the tank walls to the refrigerant and the low thermal conductivity of the desublimated  $\text{UF}_6$  layer. In this regard, to ensure the required performance of the desublimation sections, it is necessary to use several containers connected to a manifold and operating in parallel.

### 1.5 Desublimation of uranium hexafluoride into horizontal tanks

At JSC AECC, desublimation of  $\text{UF}_6$  is also carried out in horizontal containers [39]. Gaseous  $\text{UF}_6$  is supplied to the container through pipe 2. The containers are cooled by spraying their outer surface with a refrigerant. Water (temperature  $3^\circ\text{C}$ ) or saturated aqueous solution of  $\text{CaCl}_2$  (temperature minus  $20^\circ\text{C}$ ) can be used as a refrigerant. The refrigerant (stream I) in the form of a thin film is irrigated from the device 1, flows down the side walls of the container, while partially evaporating. As a result of evaporation, the heat transfer coefficient of the tank wall is somewhat higher than that of submersible tanks [30]. A tray (3) is installed under the tank to collect the flowing refrigerant (flow II).

The disadvantage of this method of cooling is the uneven wetting of the outer surface of the side walls of the containers, when the coolant flows over them, and also the fact that the end surfaces of the containers practically do not participate in the heat transfer process [38, 40, 41–44].

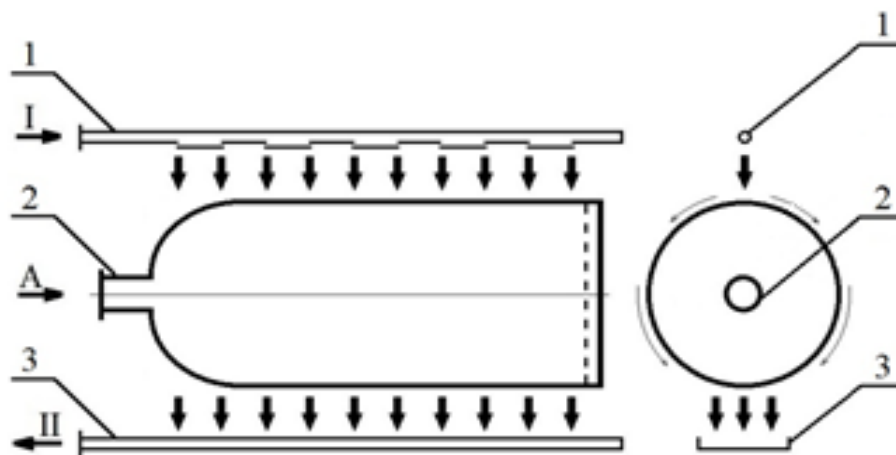


Fig. 1.13. Horizontal transport tank

The use of the  $\text{UF}_6$  desublimation method in horizontal containers is of interest in connection with an increase in the number of foreign-made horizontal containers.

## **2 SIMULATION ANALYSIS OF THE PROCESS OF $\text{UF}_6$ DESUBLIMATION IN VERTICAL SUBMERSIBLE TANK WITH AND WITHOUT FIN**

### **2.1 Simulation analysis**

The  $\text{UF}_6$  desublimation process is non-stationary and its rate depends on several factors. The first of these is the supply of gaseous  $\text{UF}_6$  to the heat exchange surface, which determines the total volume of the treated gas. The second factor is the rate of heat exchange between  $\text{UF}_6$  and the refrigerant. The greater the heat flux, the faster the desublimation occurs.

However, when the container is filled, the thickness of the desublimated layer on the inner surface increases, which worsens the heat transfer conditions and leads to a decrease in the heat flux and desublimation rate. In this case, the decrease in the desublimation rate occurs non-linearly, that is, the rate decreases faster than the thickness of the desublimated layer changes. This is due to the fact that with an increase in the thickness of the desublimated layer, an increase in the resistance to heat transfer occurs, which leads to a slowdown in the desublimation process. Internal finning increases the area of the heat exchange surface, as a result, increases the capacity of the tank.

The model is based on the following assumptions:

1. The process of desublimation of  $\text{UF}_6$  takes place on the cylindrical surface of the vessel cooled by the refrigerant.
2. Desublimated  $\text{UF}_6$  at each moment of time is a cylinder with axial symmetry, which is due to the uniform distribution of the pressure of gaseous  $\text{UF}_6$  inside the container.
3. The temperature of the outer surface of the cylindrical wall of the container is constant and equal to the temperature of the refrigerant at the

considered moment of time. The temperature of the phase boundary is equal to the temperature of the phase transition (desublimation)  $UF_6$  for the current pressure in the vessel.

4. The process of desublimation of  $UF_6$  in the tank is quasi-stationary, i.e. the temperature distribution is linear and practically does not change with time.

When constructing a mathematical model of the  $UF_6$  desublimation process, the following assumptions were made:

1. the process of desublimation occurs only on the side and on the bottom of the tank, the upper part of the tank with a pipe protrudes from the thermostat filled with refrigerant and practically does not participate in heat exchange;

2. the temperature of the side and bottom surfaces of the walls of the container is constant and equal to the temperature of the refrigerant, the temperature of the outer surface of the upper part of the container is equal to the air temperature in the CMU shop;

3. The process of desublimation of the gas phase is determined by heat removal through the container wall and the desublimation layer; the heat released during the phase transition is removed by the refrigerant;

4. the phase transition temperature is equal to the equilibrium temperature and is determined by the pressure above the desublimation layer;

5. the change in the enthalpy of the gas mixture when it is cooled to the phase transition temperature is negligible compared to the heat of desublimation;

6. the hypothesis of local thermodynamic equilibrium is fulfilled within each of the phases;

7. only surface desublimation of  $UF_6$  occurs on the heat exchange walls of the vessel, there is no desublimation in the gas volume;

8. chemical reactions do not occur in the system under consideration;

9. thermal diffusion, barrodiffusion and diffusion thermal effect are second-order effects, their influence on the desublimation process is not taken into account.

## 2.2 Object of study

The object of the study was vertical submersible tanks with vertical fins and without fins (Figure 2.1) with a volume of 2.0–4.0 m<sup>3</sup>. The vertical edge is given by three dimensions: length, width, thickness. The number of ribs is 12. The thickness of all ribs is 4.0 mm. The thickness of the walls of the containers is 8 mm. Tanks are made of steel 16 GS.

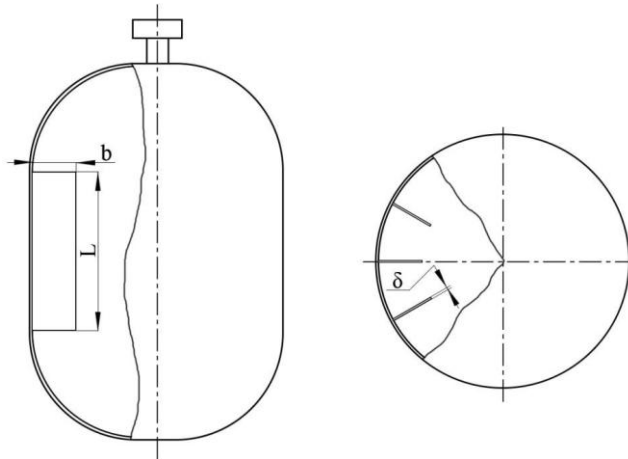


Fig. 2.1. Tank with vertical fins for desublimation of UF<sub>6</sub>

## 2.3 Two-dimensional simulation analysis of the UF<sub>6</sub> desublimation process

Due to the fact that the rate of the UF<sub>6</sub> desublimation process depends not only on the conditions of heat exchange of gaseous UF<sub>6</sub> with the refrigerant, but also on the conditions of mass supply to the heat exchange surface, to take into account the gas-dynamic component, the UF<sub>6</sub> desublimation process was considered in a two-dimensional formulation.

The container was presented as a cylinder, into which gaseous UF<sub>6</sub> enters through the inlet in the upper part. The axis of symmetry of the branch pipe coincides with the axis of symmetry of the cylinder. The calculation was carried out in a cylindrical coordinate system, the origin of which is in the section of the inlet of the container on the axis of symmetry of the cylinder. The computational domain is shown in fig. 2.2.



Fig. 2.2 - Calculation area for a cylindrical container

To take into account the lower elliptical part of the container, it was presented in the form of a cylinder, while the volume of the container remained unchanged, the lower wall has a rounding in the form of an ellipse, made in accordance with GOST 6533-78 (Fig. 2.2). Equations describing the dependences  $z(r)$  and  $r(z)$  were introduced:

$$r = \sqrt{\frac{1 - \frac{z^2}{R_{el}^2}}{R^2}}, \quad z = \sqrt{\frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{R_{el}^2}},$$

where  $R$  is the radius of the tank,  $R_{el}$  is the rounding radius of the bottom of the tank,  $r$ ,  $z$  are the variables of the cylindrical coordinate system.

The computational domain was divided by a non-orthogonal grid into control volumes (CV), which complicated the solution of differential equations on it due to the need to introduce Lamé coefficients into the system of equations to take into account the change in the angle between the normal to the CV and the coordinate lines, as well as the need to take into account mixed derivatives at writing equations of gas dynamics and heat conduction. In order to prevent the transition to a curvilinear coordinate system, discretization of the computational domain was carried out, which was not structured by a rectangular difference grid, which simplified the solution of differential equations.

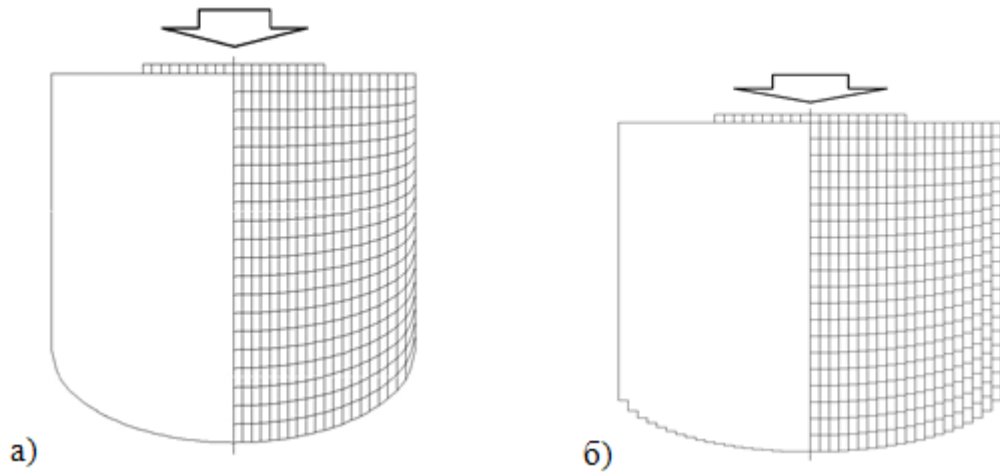


Fig. 2.3 - Calculation area, taking into account the ellipticity of the bottom wall of the tank

- a) the computational domain before the discretization of the computational grid,
- b) computational domain after discretization of the computational grid

Similarly, the ellipticity of both end walls of the container was taken into account. First, the computational domain was divided by a structured uniform grid, after which it was also discretized (Fig. 2.4).

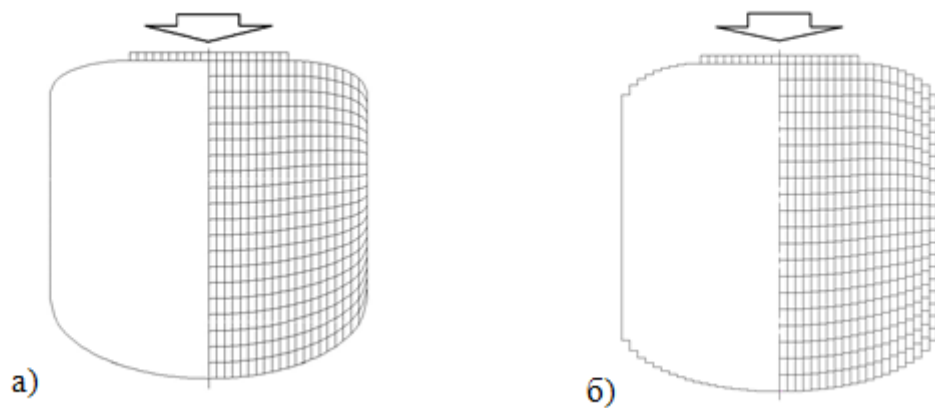


Fig. 2.4 - Calculation area, taking into account the ellipticity of both walls of the tank

- a) the computational domain before the discretization of the computational grid,
- b) computational domain after discretization of the computational grid



The gas was considered inviscid, polytropic, two-component with a constant adiabatic index. At the initial moment of time, it completely fills the container with a pressure equal to the pressure in the collector.

Source terms were introduced into the equations of gas dynamics, taking into account the deposition of  $UF_6$  on the horizontal end surfaces of the fins, as well as the parameter  $f$ , the clearance (the fraction of the area permeable to the gas mixture in the plane perpendicular to the  $r$  axis):

$$\begin{aligned}
\frac{d}{d\tau} \iint_S r \rho f dz dr + \oint_{\Gamma} r c_i (\rho u dr - \rho v f dz) &= \iint_S r m dz dr, \\
\frac{d}{d\tau} \iint_S r \rho c_i f dz dr + \oint_{\Gamma} r c_i (\rho u dr - \rho v f dz) &= \iint_S c_i r m dz dr, \\
\frac{d}{d\tau} \iint_S r \rho u f dz dr + \oint_{\Gamma} r [(\rho v^2 - P) dr - \rho u v f dz] &= 0, \\
\frac{d}{d\tau} \iint_S r \rho v f dz dr + \oint_{\Gamma} r c_i [\rho u v dr - (\rho v^2 - P) dz] &= \iint_S P dz dr, \\
\frac{d}{d\tau} \iint_S r E f dz dr + \oint_{\Gamma} r c_i [(E + P) v dr - (E + P) u f dz] &= \iint_S r e m dz dr,
\end{aligned} \tag{2.1}$$

where  $c_{UF}$  is the mass concentration of  $UF_6$ ,  $e$  is the specific internal energy,  $E$  is the total energy,  $\gamma$ ,  $\gamma_{UF}$ ,  $\gamma_{HF}$ ,  $M_{UF}$ ,  $M_{HF}$  are the adiabatic exponents and molar masses of the mixture of  $UF_6$  and  $HF$ , respectively.

The system of equations (2.1) was solved by the Godunov method [45] using moving grids [46, 47]. In this case, the assumption was made that there are no shock-wave processes; therefore, the acoustic approximation was used to solve the Riemann problem on the decay of an arbitrary discontinuity [45]. This assumption is based on the fact that at the initial time the container was considered to be filled with a  $UF_6$ - $HF$  gas mixture, so the solution of the gas dynamics equations was of a quasi-stationary nature.

The calculation area is limited by the outer surface of the container, the surface of the desublimation layer adjoining gaseous  $UF_6$ , the axis of symmetry of the container, and the upper wall of the container, on which the thermal insulation

condition is met. The pressure and stagnation temperature were set as boundary conditions at the vessel inlet, the symmetry conditions were set on the axis of symmetry of the vessel, and the velocity of the phase transition front on the side and bottom surfaces of the vessel, which was calculated from the solution of the Stefan problem describing the desublimation process.

It was believed that the  $\text{UF}_6$  desublimation process proceeds in an equilibrium mode. The temperatures of the  $\text{UF}_6$ -HF gas mixture in contact with the heat exchange surface and the heat exchange surface are equal to the  $\text{UF}_6$  phase transition temperature determined by the vessel pressure.

At the interface, the Stefan condition is satisfied:

$$v_2(\tau)\rho_U L_{UF} = \lambda_{UF} \frac{\partial l'}{\partial n} - \lambda_{UF} \frac{\partial l'}{\partial n'}, \quad (2.2)$$

$$T_1 = T_2 = T_f(p).$$

Solving the heat conduction equation in the main coordinate system, we determined the heat transfer in the desublimation layer and in the tank wall, taking into account the presence of vertical fins in the tank.

The phase separation surface is not linear, so the formulation of the problem in the general case requires the use of a moving non-orthogonal grid.

There is currently no generally accepted approach to solving such problems [46, 47]. This is due to the fact that the equations written in the moving grid coordinate system contain terms with mixed derivatives. The interface was constructed using the Huygens principle [48]. It was an envelope curve, the movement speed of which obeys equation (2.2).

The process of heat exchange of the  $\text{UF}_6$ -HF gas mixture with the refrigerant through the tank wall and the desublimation layer was described by the heat conduction equation written in a cylindrical coordinate system:

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.3)$$

## 2.4 Simplified 3D Model

To take into account the presence of vertical ribs on the inner walls of vertical submersible tanks in the mathematical model, the unsteady process of  $\text{UF}_6$  desublimation was considered as a simplified three-dimensional problem. The computational domain was presented as an object, which is divided into several subdomains, each of which is considered separately. When partitioning the computational domain with a grid, the multiblock method was used [49–51]. In each subdomain, a joint (taking into account neighboring subdomains) solution of the equations of heat and mass transfer was found. The scheme of dividing the tank with vertical ribbing into sub-regions is shown in Figure 2.5. Subregion I corresponds to the volume of the tank between its upper wall and the upper edge of the vertical rib, subregion II corresponds to the volume of the tank with ribs, subregion III corresponds to the volume between the lower edge of the vertical rib and the bottom wall of the tank.

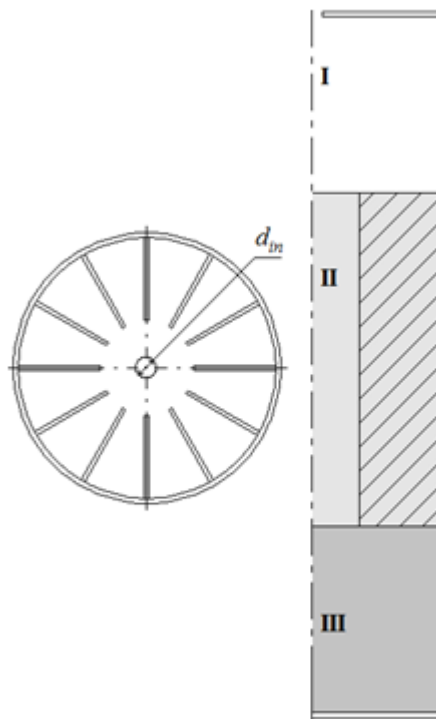


Fig. 2.5. Scheme of dividing a container with vertical ribs into subdomains (the shaded area corresponds to a vertical rib)

$d_{ir}$  - inlet diameter

Thus, a three-dimensional object was represented as a set of subdomains considered in a one-dimensional or two-dimensional formulation with common boundary conditions at the junctions.

## **2.5 Formulation of the problem**

When constructing a simplified three-dimensional mathematical model of the unsteady  $\text{UF}_6$  desublimation process, the following assumptions were made [50–52]:

1. The  $\text{UF}_6$  desublimation process occurs only on the side and bottom parts of the tank. The upper part of the container with a pipe protrudes from the thermostat filled with refrigerant and does not participate in heat exchange.

2. The temperature of the outer surfaces of the side and bottom walls of the container is considered constant and equal to the temperature of the refrigerant. The temperature of the outer surface of the upper part of the tank is equal to the air temperature in the CIU workshop.

3. The  $\text{UF}_6$  desublimation process is determined by heat removal through the container wall and the desublimation layer. All the heat released during the phase transition is removed by the refrigerant.

4. The  $\text{UF}_6$  phase transition temperature is equal to the equilibrium temperature and is determined from the pressure of gaseous  $\text{UF}_6$  above the desublimation layer.

5. The change in the enthalpy of gaseous  $\text{UF}_6$  upon cooling to the phase transition temperature is negligible compared to the heat of desublimation.

6. The hypothesis of local thermodynamic equilibrium is fulfilled within each of the phases.

7. Only surface desublimation of  $\text{UF}_6$  occurs on the side and bottom walls of the container. There is no desublimation in the volume of gaseous  $\text{UF}_6$ .

8. It was considered that the light impurity is gaseous HF, since its concentration, according to the analysis of the composition of light impurities, is

90%. The components of the  $\text{UF}_6$ -HF gas mixture were considered ideal gases. In the process of filling the containers with desublimated  $\text{UF}_6$  HF remains gaseous.

9. In the presence of a light impurity (HF) in  $\text{UF}_6$ , thermal diffusion, barrodiffusion, and diffusion thermal effect were considered second-order effects; their influence on the process of  $\text{UF}_6$  desublimation was not taken into account.

10. Chemical reactions do not occur in the system under consideration..

## 2.6 Solution Method

In order to describe the solution for a tank with vertical fins, we must first describe the solution for a tank with smooth walls. For containers with smooth inner walls, the calculation area, its division into zones, the main coordinate system and the calculation grid are schematically shown in Fig. 2.3.

The moving boundaries of the growing layer of desublimated  $\text{UF}_6$  are marked with a thick line. The arrows show the direction of their movement. Along with moving boundaries, the computational grid moves. The computational domain (the tank wall and the layer of desublimated  $\text{UF}_6$ ) was divided into eight zones, each of which was transformed into a square  $[0, 1] \times [0, 1]$  in new dimensionless coordinates:  $r, z \rightarrow \xi, \eta$ .

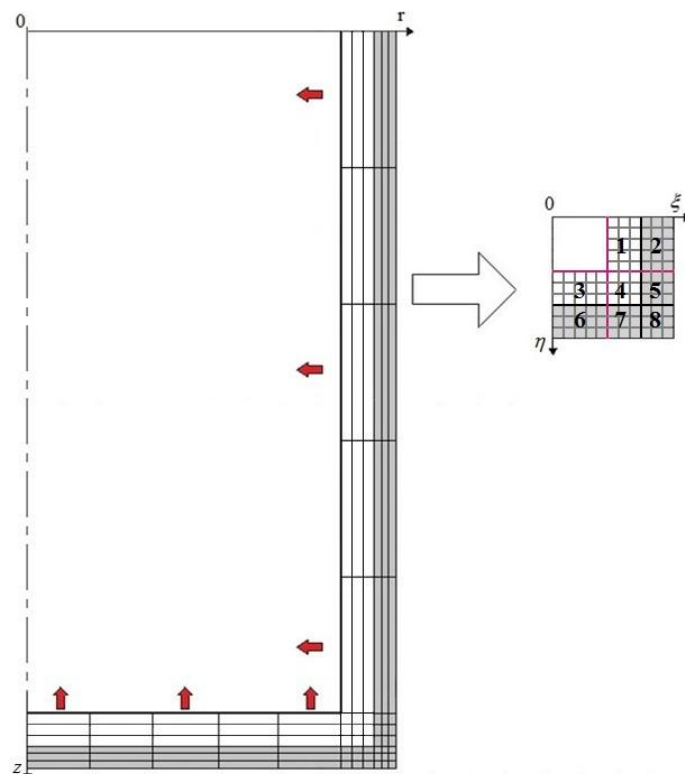


Fig.e 2.6. Difference grid and partitioning of the computational domain for tanks with smooth inner walls

zones 1, 3, 4 - desublimation layer, zones 2, 5, 6, 7, 8 - container wall

Consider the transformation of zone No. 4 with two movable curvilinear boundaries (left and upper) into a square. Let the speeds on the faces  $u_w(\tau)$ ,  $v_w(\tau)$  be constant at each moment of time (Fig. 2.8), then:

$$\begin{aligned}
 z &= Z_w(\tau)\eta, \frac{\partial z}{\partial \tau} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial Z_w(\tau)}{\partial \tau} \eta = w_w \eta, \frac{\partial \phi}{\partial \eta} = Z_w(\tau) \\
 r &= r_w(\tau)\xi, \frac{\partial r}{\partial \tau} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial r_w(\tau)}{\partial \tau} \xi = v_w(\tau)\xi, \frac{\partial \phi}{\partial \xi} = r_w(\tau) \\
 \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{1}{z_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \eta}, \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{r_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi}, \frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{w_w(\tau)\eta}{z_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{v_w(\tau)\xi}{r_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} \\
 \rho c r \frac{\partial T}{\partial \tau} &+ \frac{v_w(\tau)\rho c \xi r}{r_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{w_w(\tau)\rho c \eta r}{z_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \\
 &= \frac{1}{r_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\lambda r}{r_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{z_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\lambda r}{z_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

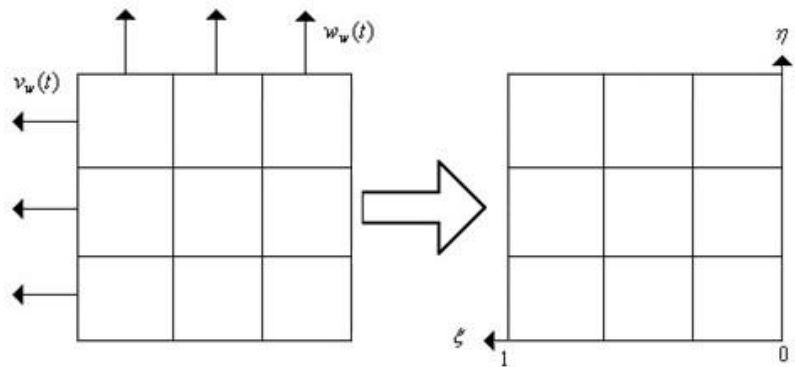


Fig. 2.7. Coordinate transformation

When deriving this equation, we did not take into account the dependence of the change in the speed of movement of the boundaries on the coordinates. In fact, equation (2.7) describes thermal processes in an expanding rectangular region.

Accounting for the curvilinearity of the boundary leads to the appearance in the equation of terms with mixed derivatives responsible for heat transfer in

directions that do not coincide with  $\eta$  and  $\xi$ , which significantly complicates the algorithm. In particular, it is required to use a non-orthogonal grid in the calculation, which entails the solution of nonlinear Laplace equations. Similar approaches are used for problems with a rapidly changing phase boundary (for example, in the problem of laser penetration of a material) [53]. It was considered that these heat fluxes were insignificant, and the nonlinearity of the boundary was taken into account by introducing the dependence for changing the velocity of the boundary movement on the coordinates:

$$\begin{aligned} \rho c r \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{u_w(\xi, \tau) \rho c \xi r}{r_w(\xi, \tau)} \frac{\partial}{\partial} + \frac{v_w(\eta, \tau) \rho c \eta r}{z_w(\eta, \tau)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \\ = \frac{1}{r_w(\xi, \tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\lambda r}{r_w(\xi, \tau)} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{z_w(\eta, \tau)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\lambda r}{z_w(\eta, \tau)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Next, a differential analog was derived. To do this, we integrated equation (2.5) over the control volume, assuming the values of all variables in the control volume (Fig. 2.8) and on its faces to be constant and equal to their average values.

Introduced designations:

$$\begin{aligned} h_\eta = \frac{h_\eta^- - h_\eta^+}{2}, h_\xi = \frac{h_\xi^- - h_\xi^+}{2}, S_{i,j} = h_\xi h_\eta, \delta_\eta^+ = \frac{h_\eta^+}{2}, \delta_\eta^- = \frac{h_\eta^-}{2}, \delta_\xi^+ = \frac{h_\xi^+}{2}, \delta_\xi^- \\ = \frac{h_\xi^-}{2} \end{aligned}$$

$$s_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} = \delta_\eta^+ \delta_\xi^-, s_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} = \delta_\eta^+ \delta_\xi^+, s_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} = \delta_\eta^- \delta_\xi^-, s_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} = \delta_\eta^- \delta_\xi^+$$

$$(\rho c)_{i,j} = \frac{(\rho c S)_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}}}{S_{i,j}}$$

$$(\rho c S)_{i,j} = (\rho c S)_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}}$$

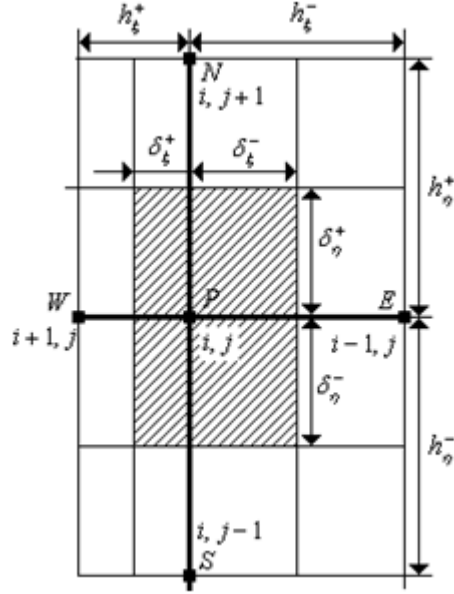


Fig. 2.8. Control volume

Next, the heat balance for the control volume was compiled:

$$\begin{aligned}
 (\rho c S)_{i,j} r_i T^{i,j} &= (\rho c S)_{i,j} r_i T_{i,j} - \\
 &- \tau \left( \begin{array}{l} \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^+ + \\ + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^- \end{array} \right) \frac{r_{i,j} T^{i,j} - r_{i-1,j} T^{i-1,j}}{r_{w,j} h_{\xi}^-} - \delta \tau \left[ \begin{array}{l} (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^+ + \\ + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^- \end{array} \right] \frac{r_i v_j \xi_{i-\frac{1}{2}}}{r_{w,j}} T_{i,j} + \\
 &+ \tau \left( \begin{array}{l} \lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^+ + \\ + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^- \end{array} \right) \frac{r_{i+1,j} T^{i+1,j} - r_{i,j} T^{i,j}}{r_{w,j} h_{\xi}^+} + \delta \tau \left[ \begin{array}{l} (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^+ + \\ + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^- \end{array} \right] \frac{r_i v_j \xi_{i+\frac{1}{2}}}{r_{w,j}} T_{i,j} - \\
 &- \tau \left( \begin{array}{l} \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^+ + \\ + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^- \end{array} \right) \frac{r_{i,j} T^{i,j} - r_{i,j-1} T^{i,j-1}}{z_{w,i} h_{\eta}^+} - \delta \tau \left[ \begin{array}{l} (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^+ + \\ + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^- \end{array} \right] \frac{r_i w_i \eta_{j-\frac{1}{2}}}{z_{w,i}} T_{i,j} + \\
 &+ \tau \left( \begin{array}{l} \lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^+ + \\ + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^- \end{array} \right) \frac{r_{i,j+1} T^{i,j+1} - r_{i,j} T^{i,j}}{z_{w,i} h_{\eta}^+} - \delta \tau \left[ \begin{array}{l} (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^+ + \\ + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^- \end{array} \right] \frac{r_i w_i \eta_{j+\frac{1}{2}}}{z_{w,i}} T_{i,j}.
 \end{aligned}$$

Reducing like terms, we write the difference analogue in the form [54]:

$$a^{i,j} T^{i,j} = a^{i-1,j} T^{i-1,j} + a^{i+1,j} T^{i+1,j} + a^{i,j-1} T^{i,j-1} + a^{i,j+1} T^{i,j+1} + b \quad (2.6)$$

where

$$b = T_{i,j} (\rho c \bar{S})_{i,j} r_{i,j}$$

$$a^{i,j} = a_p = (\rho c \bar{S})_{i,j} r_i + a^{i-1,j} + a^{i+1,j} + a^{i,j-1} + a^{i,j+1} +$$



$$\begin{aligned}
& + \delta\tau \left[ \frac{(\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}\delta_\eta^+ + r_i v_j \xi_{i-\frac{1}{2}}}{r_{w,j}} - \delta\tau \left[ \frac{(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\delta_\eta^+ + r_i v_j \xi_{i+\frac{1}{2}}}{r_{w,j}} \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \delta\tau \left[ \frac{(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}\delta_\xi^+ + r_i w_i \eta_{j-\frac{1}{2}}}{z_{w,i}} \right] \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \delta\tau \left[ \frac{(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\delta_\xi^+ + r_i w_i \eta_{j+\frac{1}{2}}}{z_{w,i}} \right] \right. \right. \\
& \quad \left. \left. a^{i-1,j} = a_w = -\delta\tau \left( \frac{\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} h_\eta^+ +}{+\lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} h_\eta^-} \right) \frac{r_{i-1,j}}{r_{w,j} h_\xi^-}, \right. \right. \\
& \quad \left. \left. a^{i+1,j} = a_E = \delta\tau \left( \frac{\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} h_\eta^+ +}{+\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} h_\eta^-} \right) \frac{r_{i+1,j}}{r_{w,j} h_\xi^+}, \right. \right. \\
& \quad \left. \left. a^{i,j-1} = a_S = \delta\tau \left( \frac{\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} h_\xi^+ +}{+\lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} h_\xi^-} \right) \frac{r_{i,j-1}}{z_{w,i} h_\eta^-}, \right. \right. \\
& \quad \left. \left. a^{i-1,j} = a_w = -\delta\tau \left( \frac{\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} h_\xi^+ +}{+\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} h_\xi^-} \right) \frac{r_{i,j+1}}{z_{w,i} h_\eta^+}, \right. \right.
\end{aligned}$$

Equation (2.6) was solved using the Gauss-Seidel method [55] together with the under-relaxation method [48] (relaxation coefficient  $\alpha=0.8$ ):

$$T_{k+1}^{i,j} = T_k^{i,j} + \alpha \left[ \frac{(a^{i-1,j} T^{i-1,j} + a^{i+1,j} T^{i+1,j} + a^{i,j-1} T^{i,j-1} + a^{i,j+1} T^{i,j+1} + b)}{a^{i,j}} - T_k^{i,j} \right].$$

This approach was used to calculate the parameters of heat and mass transfer processes on the side and bottom walls of the tank.

In the case of calculating tanks with vertical ribs, area II of Fig. 2.2 was also divided into sub-areas, each of which corresponded to a part of the tank volume located between two adjacent ribs. The computational subdomain was similarly divided into zones, each of which was transformed into a square  $[0, 1] \times [0, 1]$  in new dimensionless coordinates:  $r, z \rightarrow \xi, \eta$ . After dividing the calculated regions of the capacitance with a difference grid, equation (2.6) was adapted and written down for all regions and subregions.

To consider thermal processes in the rib and the layer of solid  $\text{UF}_6$  growing

on it, an auxiliary Cartesian coordinate system was used (projections of the vertical rib on the z and r axes are shown in Fig. 2.9, 2.10).

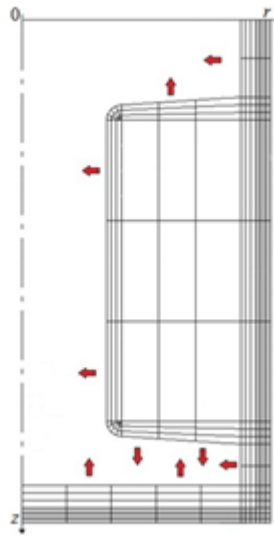


Fig. 2.9. Partitioning of a container with vertical fins and a layer of UF<sub>6</sub> desublimated in it with a difference grid (side view)

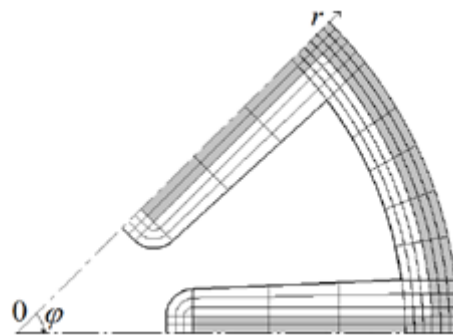


Fig. 2.10. Division of the computational domain into subdomains by a difference grid for a container with vertical ribs (subdomain top view)

The x axis is directed along the rib from the vessel wall to the symmetry axis, the y axis is perpendicular to the rib plane, and the z axis coincides in the main and auxiliary coordinate systems. The three-dimensional heat equation was written as:

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

The transformation formulas and the derivation of the difference analogue are presented below:

$$x, y, z \Rightarrow \xi, \eta, \zeta,$$

$$x = x_w(\tau) \xi, \frac{\partial x}{\partial \tau} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial x_w(\tau)}{\partial \tau} \xi = v_w(\tau) \xi, \frac{\partial \phi}{\partial \xi} = x_w(\tau),$$

$$y = y_w(\tau) \eta, \frac{\partial y}{\partial \tau} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial y_w(\tau)}{\partial \tau} \eta = v_w(\tau) \eta, \frac{\partial \phi}{\partial \eta} = y_w(\tau),$$

$$z = z_w(\tau) \zeta, \frac{\partial z}{\partial \tau} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial z_w(\tau)}{\partial \tau} \zeta = v_w(\tau) \zeta, \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} = z_w(\tau),$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{x_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{y_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{z_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \zeta}$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{v_w(\tau) \xi}{x_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{u_w(\tau) \eta}{y_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{w_w(\tau) \zeta}{z_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \zeta}$$

$$\begin{aligned} & \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{v_w(\tau) \rho c \xi}{x_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{u_w(\tau) \rho c \eta}{y_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \eta} + \frac{w_w(\tau) \rho c \zeta}{z_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \zeta} = \\ & = \frac{1}{x_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\lambda}{x_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{y_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\lambda}{y_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{z_w(\tau)} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \frac{\lambda}{z_w(\tau)} \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right), \end{aligned}$$

$$h_\xi = \frac{h_\xi^- + h_\xi^+}{2}, h_\eta = \frac{h_\eta^- + h_\eta^+}{2}, h_\zeta = \frac{h_\zeta^- + h_\zeta^+}{2}, V_{i,j,k} = h_\xi h_\eta h_\zeta,$$

$$\delta_\xi^+ = \frac{h_\xi^+}{2}, \delta_\xi^- = \frac{h_\xi^-}{2}, \delta_\eta^+ = \frac{h_\eta^+}{2}, \delta_\eta^- = \frac{h_\eta^-}{2}, \delta_\zeta^+ = \frac{h_\zeta^+}{2}, \delta_\zeta^- = \frac{h_\zeta^-}{2},$$

$$V_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} = \delta_\xi^+ \delta_\eta^+ \delta_\zeta^+, V_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} = \delta_\xi^+ \delta_\eta^+ \delta_\zeta^-, V_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} = \delta_\xi^- \delta_\eta^- \delta_\zeta^+$$

$$V_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} = \delta_\xi^- \delta_\eta^- \delta_\zeta^-, V_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} = \delta_\xi^- \delta_\eta^- \delta_\zeta^-, V_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} = \delta_\xi^+ \delta_\eta^+ \delta_\zeta^-$$

$$V_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} = \delta_\xi^+ \delta_\eta^+ \delta_\zeta^-, V_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} = \delta_\xi^+ \delta_\eta^- \delta_\zeta^+$$

$$(\rho c)_{i,j} = \frac{\left\{ \begin{aligned} & (\rho c V)_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} + (\rho c V)_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} + (\rho c V)_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} + (\rho c V)_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} \\ & + (\rho c V)_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} + (\rho c V)_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}} + (\rho c V)_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} + (\rho c V)_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\}}{V_{i,j,k}}.$$

The heat balance was compiled for the control volume:

$$\begin{aligned} & \rho c V \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{v_w(\xi, \tau) \rho c \xi}{x_w(\xi, \tau)} Th_\xi + \frac{u_w(\eta, \tau) \rho c \eta}{y_w(\eta, \tau)} Th_\eta + \frac{w_w(\zeta, \tau) \rho c \zeta}{z_w(\zeta, \tau)} Th_\zeta = \\ & = \frac{1}{x_w(\xi, \tau)} \frac{\partial T}{\partial \xi} h_\xi + (\eta, \tau) \frac{\partial T}{\partial \eta} h_\eta + \frac{1}{z_w(\zeta, \tau)} \frac{\partial T}{\partial \zeta} h_\zeta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\rho c V)_{i,j,k} \frac{T^{i,j,k} - T_{i,j,k}}{\delta \tau} = & \\
& + (\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{T^{i,j,k} - T^{i-1,j,k}}{x_{w,j} h_{\xi}^{-}} - [(\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}] \frac{v_j \xi_i}{x_{w,j}} T_{i,j,k} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{T^{i+1,j,k} - T^{i,j,k}}{x_{w,j} h_{\xi}^{+}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}] \frac{v_j \xi_i}{x_{w,j}} T_{i,j,k} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{T^{i,j,k} - T^{i,j-1,k}}{y_{w,i} h_{\eta}^{-}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}] \frac{u_i \eta_j}{y_{w,i}} T_{i,j,k} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{T^{i,j+1,k} - T^{i,j,k}}{y_{w,i} h_{\eta}^{+}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}] \frac{u_i \eta_j}{y_{w,i}} T_{i,j,k} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{T^{i,j,k} - T^{i,j,k-1}}{z_{w,j} h_{\zeta}^{-}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}} T_{i,j,k} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{T^{i,j,k+1} - T^{i,j,k}}{z_{w,j} h_{\zeta}^{+}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}} T_{i,j,k}.
\end{aligned}$$

After bringing like terms together, we get:

$$\begin{aligned}
(\rho c S)_{i,j} r_i T^{i,j} = & (\rho c S)_{i,j} r_i T_{i,j} + \\
& + \delta \tau (\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{-}) \frac{r_i T^{i,j} - r_{i-1} T^{i-1,j}}{r_{w,j} h_{\xi}^{-}} - \delta \tau [(\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{-}] \frac{r_i v_j \xi_i}{r_{w,j}} T_{i,j} + \\
& + \delta \tau (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{-}) \frac{r_{i+1} T^{i+1,j} - r_i T^{i,j}}{r_{w,j} h_{\xi}^{+}} - \delta \tau [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\eta}^{-}] \frac{r_i v_j \xi_i}{r_{w,j}} T_{i,j} + \\
& + \delta \tau (\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{-}) \frac{r_i T^{i,j} - r_i T^{i,j-1}}{z_{w,i} h_{\eta}^{-}} - \delta \tau [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{-}] \frac{r_i w_i \eta_j}{z_{w,i}} T_{i,j} + \\
& + \delta \tau (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{-}) \frac{r_i T^{i,j+1} - r_i T^{i,j}}{z_{w,i} h_{\eta}^{+}} - \delta \tau [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \delta_{\xi}^{-}] \frac{r_i w_i \eta_j}{z_{w,i}} T_{i,j}. \\
(\rho c V)_{i,j,k} T^{i,j,k} = & (\rho c V)_{i,j,k} T_{i,j,k} + T^{i,j,k} \left\{ (\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{-}} - \right. \\
& - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{+}} + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{-}} - \\
& - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{+}} + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{-}} - \\
& - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{+}} - [(\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}] \frac{v_j \xi_i}{x_{w,j}} - \\
& - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}] \frac{v_j \xi_i}{x_{w,j}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}] \frac{u_i \eta_j}{y_{w,i}} - \\
& - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}] \frac{u_i \eta_j}{y_{w,i}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}} - \\
& \left. - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}} \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\left[ (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-} \right] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}} \left\} - (\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{-}} T^{i-1,j,k} + \right. \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{+}} T^{i+1,j,k} - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{-}} T^{i,j-1,k} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{+}} T^{i,j+1,k} - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{-}} T^{i,j,k-1} + \\
& \left. + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{+}} T^{i,j,k+1}. \right.
\end{aligned}$$

The discrete analogue was finally written in the form:

$$a_P T^{i,j,k} = a_W T_{i-1,j,k} + a_E T_{i+1,j,k} + a_S T_{i,j-1,k} + a_N T_{i,j+1,k} + a_B T_{i,j,k-1} + a_T T_{i,j,k+1} + b,$$

where

$$\begin{aligned}
a_W &= -(\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{-}}; & a_E &= (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{+}} \\
a_S &= -(\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{-}}; & a_N &= (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{+}} \\
a_B &= -(\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{-}}; & a_T &= (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{+}} \\
a_P^0 &= (\rho c V)_{i,j,k}; & b &= a_P^0 T_{i,j,k}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_P &= (\lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{-}} - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}) \frac{\delta \tau}{x_{w,j} h_{\xi}^{+}} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{-}} - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}) \frac{\delta \tau}{y_{w,i} h_{\eta}^{+}} + \\
& + (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{-}} - (\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}) \frac{\delta \tau}{z_{w,j} h_{\zeta}^{+}} - \\
& - [(\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}] \frac{v_j \xi_i}{x_{w,j}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{+} + (\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\eta}^{-}] \frac{v_j \xi_i}{x_{w,j}} - \\
& - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}] \frac{u_i \eta_j}{y_{w,i}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} \delta_{\xi}^{-}] \frac{u_i \eta_j}{y_{w,i}} - \\
& - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}} - [(\rho c)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{+} + (\rho c)_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} \delta_{\zeta}^{-}] \frac{w_j \zeta_i}{z_{w,j}}.
\end{aligned}$$

The developed simplified three-dimensional simulation analysis of the non-stationary process of UF<sub>6</sub> desublimation into vertical immersion tanks for dump uranium hexafluoride was programmatically implemented in the FORTRAN-90

programming language in the Microsoft Developer Visual Studio environment [56].

### 3 INFLUENCE OF THE DEGREE OF CAPACITY LOADING ON THE DYNAMICS OF THE PROCESS OF UF<sub>6</sub> DESUBLIMATION

To calculate the dynamics of the UF<sub>6</sub> desublimation process in vertical submersible tanks without fins with a change in the degree of their loading, a two-dimensional model was used, since the tanks are axisymmetric, and for tanks with fins, a simplified three-dimensional model was used. All tanks with ribs had 12 symmetrically located ribs at an equidistant distance from the bottom and top of the tank.

The calculation was carried out for tanks filled with waste UF<sub>6</sub>, with a volume of 2.0–4.0 m<sup>3</sup>. The dimensions of these containers are presented in Table 3.1.

Table 3.1. Tank sizes with and without fins

Volume	Diameter	Height	Thickness	Rib length	Rib width	Rib height
2,0	1,100	2,122	0,008	—		
2,5	1,200	2,212	0,008			
3,0	1,300	2,280	0,008			
3,5	1,400	2,290	0,008			
4,0	1,500	2,300	0,008			
2,0	1,100	2,122	0,008	1,408	0,352	0,004
2,5	1,200	2,212	0,008	1,444	0,384	0,004
3,0	1,300	2,280	0,008	1,460	0,416	0,004
3,5	1,400	2,290	0,008	1,424	0,447	0,004
4,0	1,500	2,300	0,008	1,388	0,479	0,004

Steel 16GS-4 was chosen as the material for the containers. Its thermophysical properties: thermal conductivity coefficient 49 W/(m\*K), density 7850 kg/m<sup>3</sup>, heat capacity 470 J/(K\*kg).

Thermophysical properties of solid UF<sub>6</sub>: thermal conductivity 0.6643 W/(m K), density 5091.37 kg/m<sup>3</sup>, heat capacity 457.201 J/(K\*kg), desublimation heat 142.596 KJ/kg.

The calculations were carried out at a temperature of the refrigerant (saturated solution of CaCl<sub>2</sub>) of minus 20 °C, and an operating pressure in the

collector of 80 mm Hg. Art., pressure in an empty container 4.0 mm Hg. Art. The degree of filling was changed from 10 % to the maximum possible value.

For vertical immersion tanks, the upper elliptical part is located above the refrigerant level and the desublimation process does not occur in it, therefore, this volume of the tank was not taken into account in our calculations. The free volume of the tanks and the area of their heat exchange surface were calculated taking into account the absence of desublimation in the volume of the upper elliptical cover of the tanks. The calculation results are presented in Table 3.2.

Table 3.2. Calculated free volumes of containers and areas of their heat exchange surface

Volume, m <sup>3</sup>	Tanks without fins		Tanks with fins	
	Heat exchange surface area, m <sup>2</sup>	Free volume, m <sup>3</sup>		Heat exchange surface area, m <sup>2</sup>
2,0	6,602	1,61	18,598	1,586
2,5	7,487	1,983	20,901	1,956
3,0	8,364	2,377	23,051	2,348
3,5	8,959	2,727	24,348	2,696
4,0	9,85	3,095	25,65	3,063

Knowing the free volume of containers, we calculated the maximum possible degree of filling for all types of containers. The calculation results are presented in Table 3.3.

Table 3.3. Maximum possible degree of filling

Volume, m <sup>3</sup>	Maximum possible degree of filling, %	
	Tanks without fins	Tanks with fins
2,0	80,5	79,3
2,5	79,32	78,24
3,0	79,23	77,27
3,5	77,914	77,04
4,0	77,38	76,58

The results of calculations of the dynamics of the mass of desublimated UF<sub>6</sub> in containers without fins and with fins of various sizes are shown in Fig. 3.1 and 3.2.

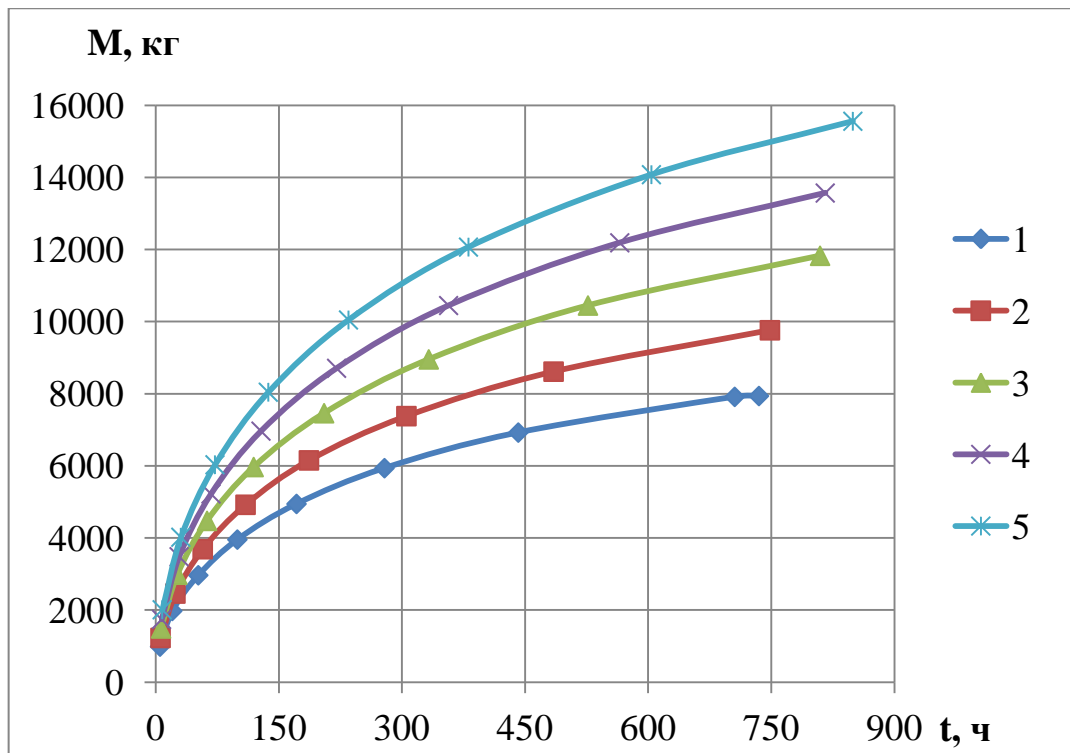


Fig. 3.1. Dynamics of the mass of desublimated  $UF_6$  in tanks without fins of various volumes: 1 –  $2.0 \text{ m}^3$ ; 2 -  $2.5 \text{ m}^3$ ; 3 -  $3.0 \text{ m}^3$ ; 4 -  $3.5 \text{ m}^3$ ; 5 -  $4.0 \text{ m}^3$  (further in the text, the designations of the curves in the figures are the same)

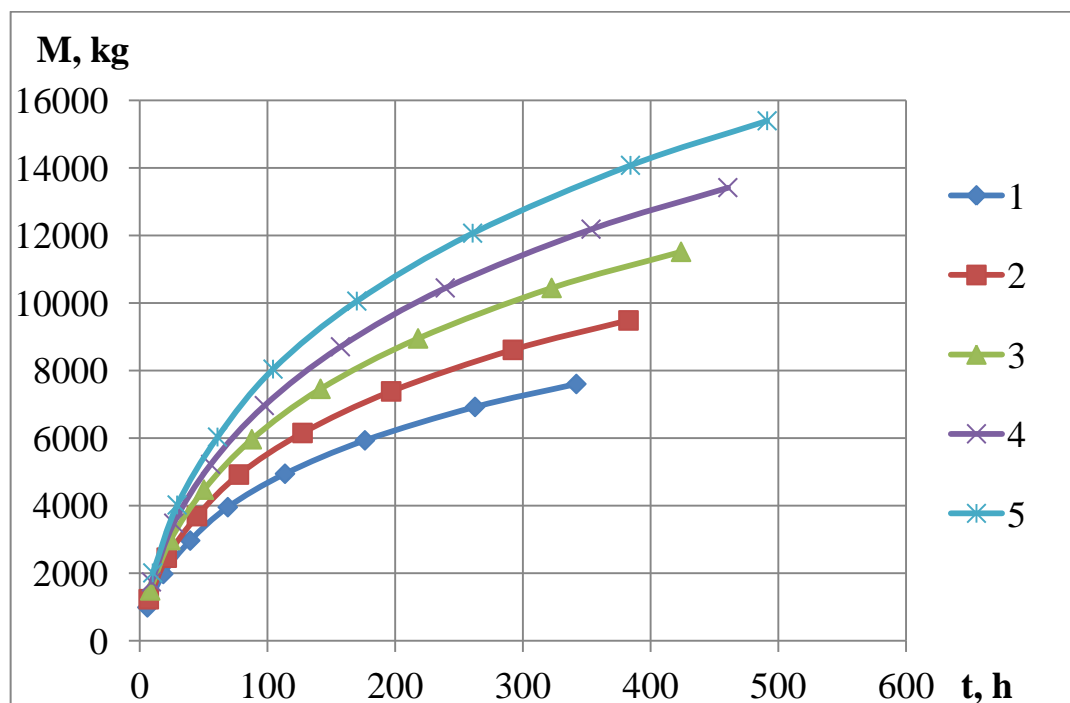


Fig. 3.2. Dynamics of the mass of desublimated  $UF_6$  in containers with fins of various volumes



From Fig. 3.1 and 3.2 it can be seen that the filling time for containers with and without fins of the same volume with desublimated  $\text{UF}_6$  differs significantly. For tanks with fins, it is 1.73–2.15 times less.

To explain this, calculations were made of the dependence of the heat exchange surface area on the volume of tanks with and without fins. The calculation results are shown in Fig. 3.3.

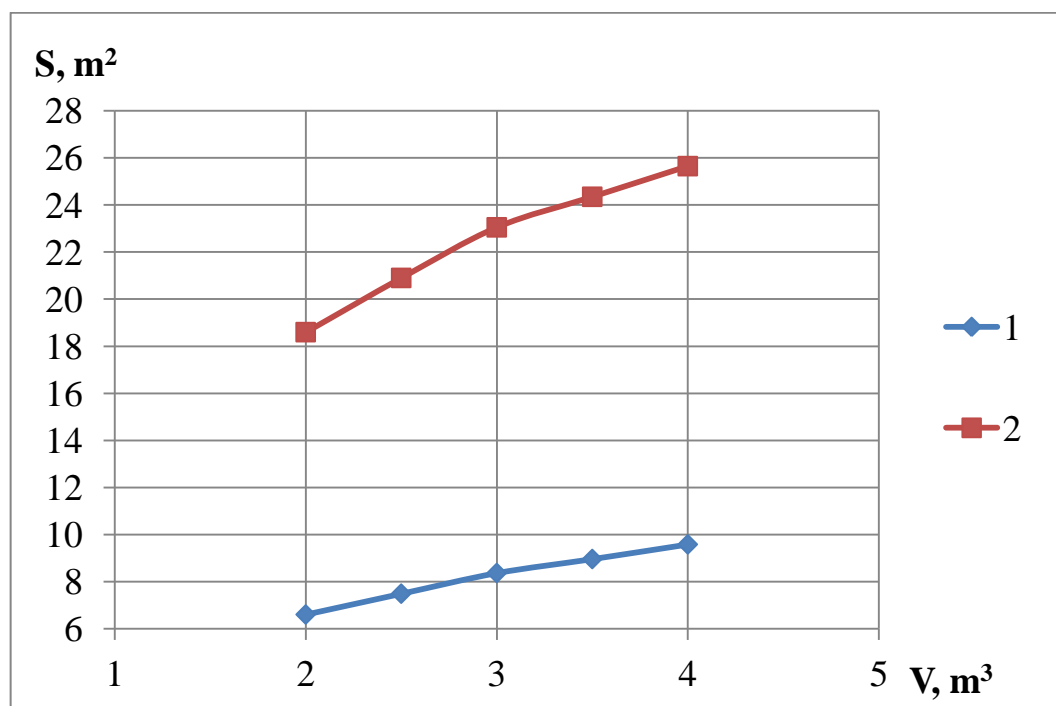


Fig. 3.3. Dependence of the area of the heat exchange surface on the volume of tanks: 1 - without fins, 2 - with fins

Fig. 3.3 shows that the area of the heat exchange surface for tanks with fins is 2.7–2.8 times larger, so the process of  $\text{UF}_6$  desublimation in these tanks proceeds more efficiently and quickly.

Then, the dynamics of the average productivity was calculated for tanks with and without fins. The calculation results are presented in Fig. 3.4 and 3.5.

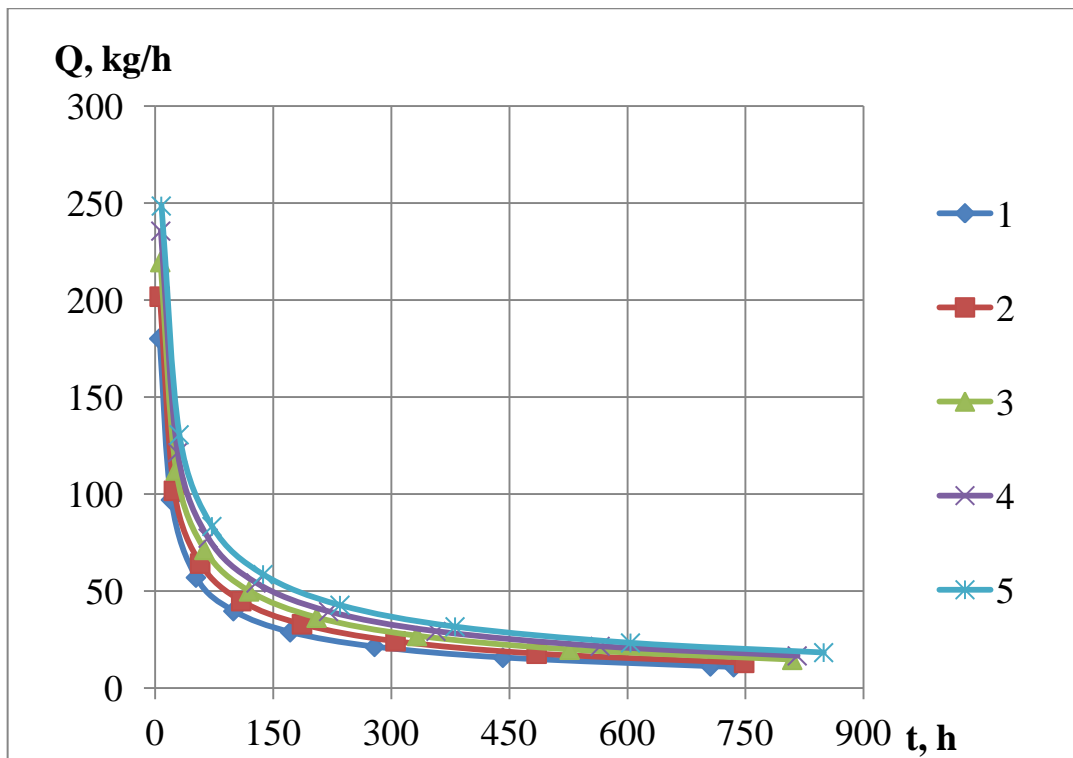


Fig. 3.4. Dynamics of the average performance of the desublimation process for ribless containers

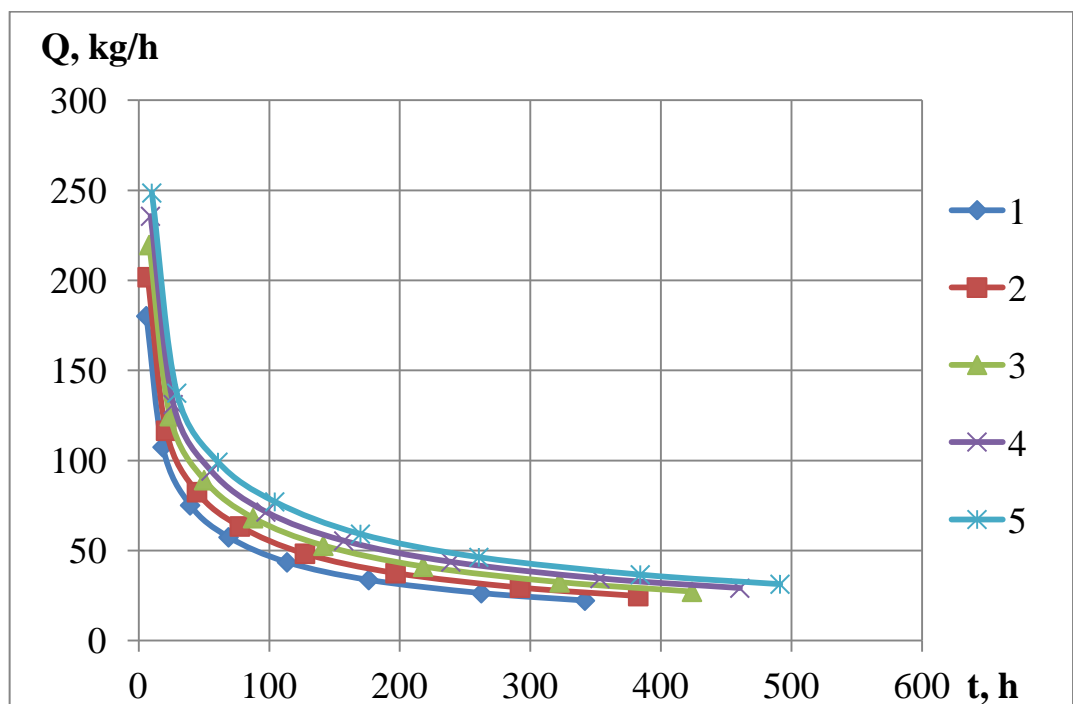


Fig. 3.5. Dynamics of the average productivity of the desublimation process for containers with fins

Fig. 3.4 and 3.5 show that the desublimation process is non-stationary. With an increase in the thickness of the desublimite layer, its thermal resistance increases, which leads to a slowdown in the desublimation process.

In conclusion, the dependence of the average capacity of tanks with and without fins on the degree of their loading was calculated. The results are presented in Fig. 3.6 and 3.7.

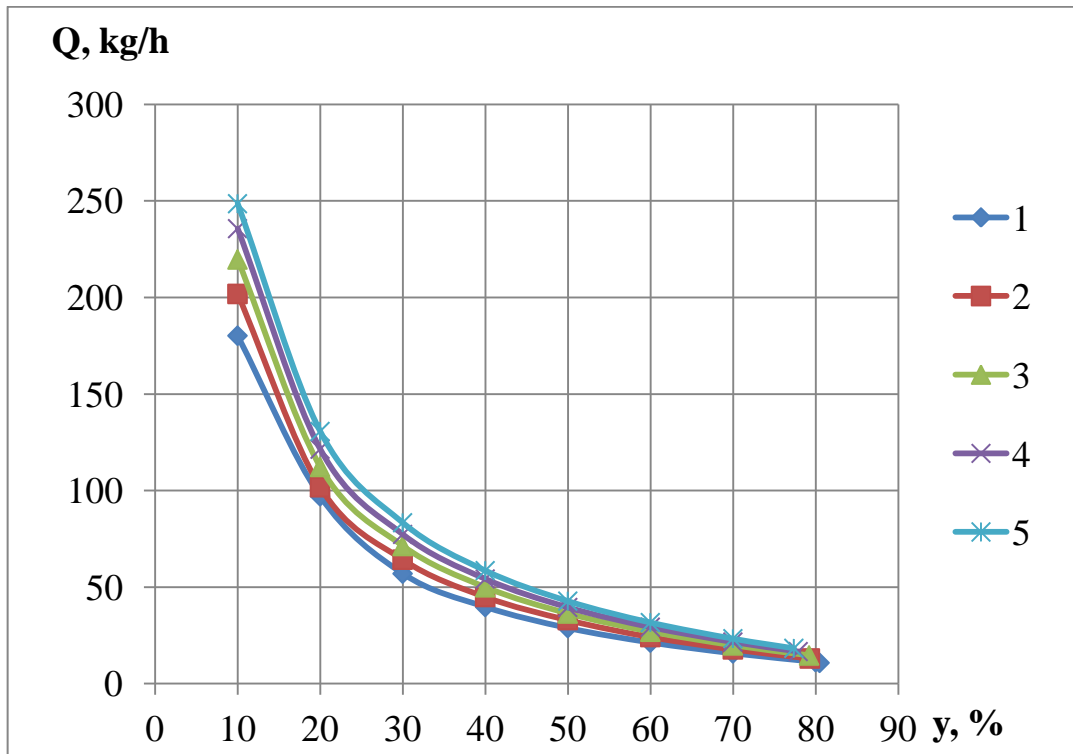


Fig. 3.6. The dependence of the average performance of tanks without fins on the degree of their loading

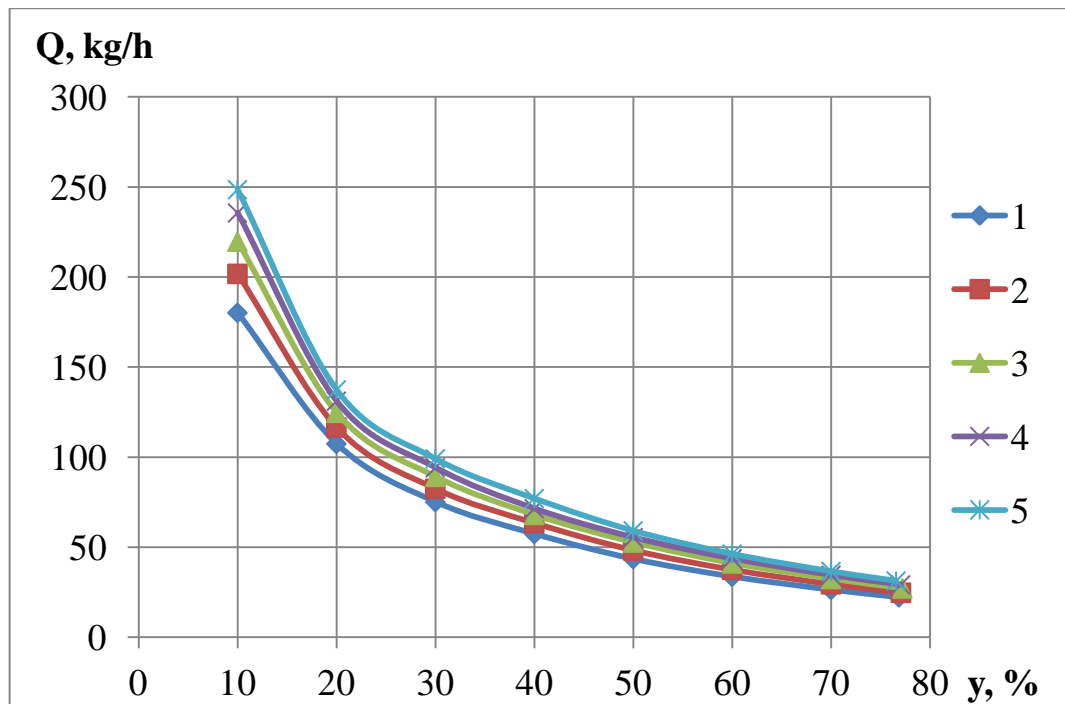


Fig. 3.7. The dependence of the average performance of tanks with fins on the degree of loading

Fig. 3.6 and 3.7 show that the average productivity of tanks without fins decreases much faster than in tanks of the same volume with fins. The average performance of tanks with and without fins at 10% filling of the tanks is almost the same. With a further increase in the degree of filling, the average productivity becomes higher for tanks with vertical fins (by 1.71–2.06 times) due to the larger area of the heat exchange surface. The calculation showed that for tanks with a volume of 2.0, 2.5, 3.0 m<sup>3</sup> with fins, the maximum degree of filling is not achieved, due to "freezing" on the ribs (Fig. 3.8). When touching the desublimation layer formed on the neighboring edges of the container, the calculation was stopped.

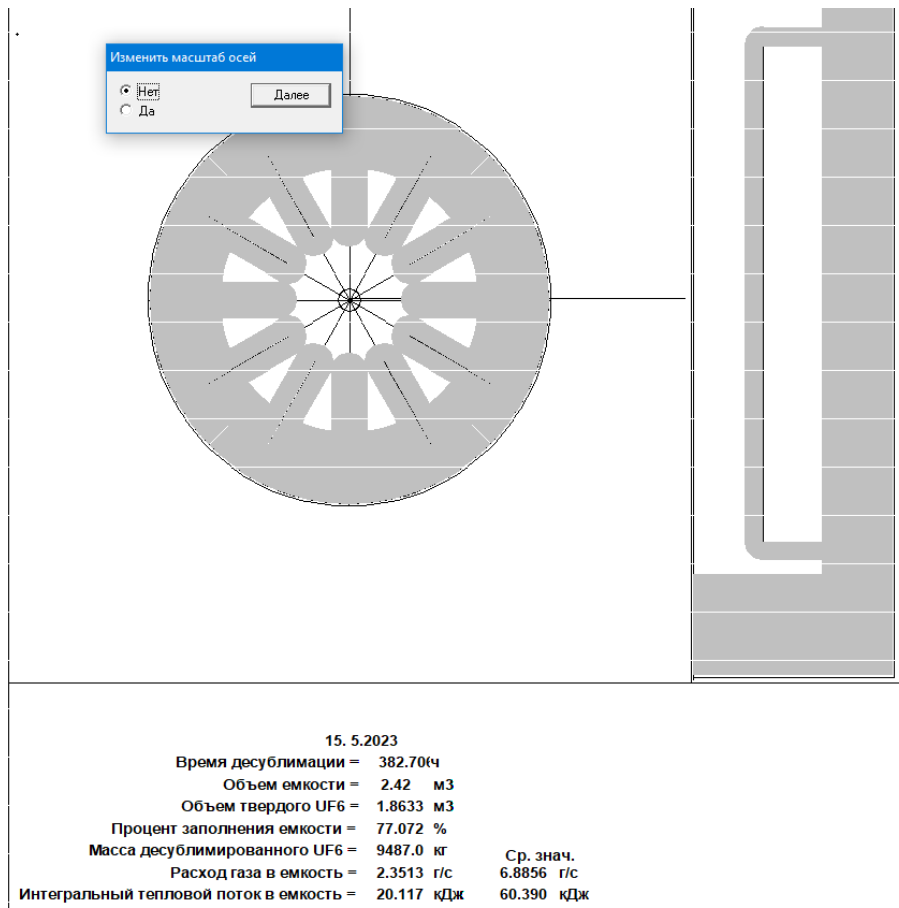


Fig. 3.8 Screenshot of the program demonstrating "freezing" on the ribs of the tank

#### **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Целью данного раздела является определение экономической целесообразности исследования в влияние степени заполнения емкости на динамику процесса десублимации в ней гексафторида урана с помощью ранее разработанной математической модели нестационарного процесса десублимации гексафторида урана в вертикальные погружные емкости с вертикальным оребрением и без оребрения.

В данном разделе необходимо решить следующие задачи:

- Оценить конкурентоспособность технических решений
- Провести SWOT-анализ;
- Выполнить планирование научно-исследовательской работы;
- Провести расчет бюджета научно-исследовательской работы;

Провести расчет и оценку сравнительной финансовой эффективности исследования.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

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

В данной работе разработана расчетная модель динамики процесса десублимации гексафторида урана с учетом геометрии емкостей и наличием в них ребер.

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

Результатом исследования является совершенствование конструкции емкостей различного объема (изменение длины и ширины их ребер), способствующее увеличению их производительности.

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

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

		Расчетная модель динамики десублимации гексафторида урана с учетом геометрии емкости			
		<u>Атомная промышленность</u>	<u>Научная отрасль</u>	<u>Иные производственные отрасли</u>	<u>Экспортный контроль</u>
<u>Потребность</u>	<u>Сильная</u>				
	<u>Слабая</u>				

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

### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Главное преимущество – это определение оптимальных размеров вертикальных ребер вертикальных погружных емкостей различного объема, позволяющих максимально увеличить их производительность. Математическая модель позволяет не проводить многочисленные

эксперименты и избежать крупных финансовых затрат на их реализацию.

Конкурентные методы исследования:

- Экспериментальные исследования динамики десублимации гексафторида урана в зависимости от геометрии вертикальных ребер в вертикальной емкости;
- Теоретический расчет параметров десублимации гексафторида урана в зависимости от геометрии вертикальных ребер в вертикальной емкости.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя [58].

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
4. Надежность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Закрытость получаемых данных	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
7. Стабильность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
8. Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4



Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Финансирование разработанного метода	0,1	5	1	3	0,5	0,1	0,3
Итого	1				5	2,92	3,25

#### 4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [57, 58].

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

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

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

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию,

тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем [58].

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надёжность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.7.

Таблица 4.2 - SWOT-анализ

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

У3. Сложность в продвижении модели. У4. Полное отсутствие спроса. У5. Разработка новейших моделей расчета.	на рынок может стать успешным. 2. Так как существует возможность оптимизации расчетной модели, то это позволит конкурировать с новейшими разработками. 3. Дополнительное финансирование позволит продвинуть расчетную модель на рынок.	расчетной модели, которых нет у конкурентов. 2. Несовершенства разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые параметры
--	--	--

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.3. Интерактивная матрица проекта

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

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

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

## 4.2 Планирование научно-исследовательского проекта

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта и исполнитель - студент. После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Календарное планирование работ	Руководитель, студент
	4	Изучение возможностей расчётной модели	Студент
Освоение методики расчёта на практике	5	Проведение расчётов	Студент
	6	Анализ полученных данных	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	7	Составление пояснительной записки	Студент
	8	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент
	9	Подготовка к защите	Студент

### 4.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоёмкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоёмкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоёмкости  $t_{ожи}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}.$$

Исходя из ожидаемой трудоёмкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}.$$

### 4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{кал}$$

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48;$$

все рассчитанные значения сведены в таблицу ниже.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения НИР

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни		Исп 1	Исп 2	Исп 1	Исп 2
	Ис п 1	Ис п 2	Ис п 1	Ис п 2	Ис п 1	Ис п 2				
Составление и утверждение технического задания	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Подбор и изучение материалов по теме	1	-	3	-	1,8	-	1	-	1	-
Календарное планирование работ	5	5	7	7	5,8	5,8	6	6	9	9
Изучение возможностей расчётной модели	1	-	2	-	1,4	-	1	-	2	-
Проведение расчётов	25	-	40	-	31	-	16	-	23	-
Анализ полученных данных	1	1	3	3	1,8	1,8	2	2	3	3
Составление пояснительной записки	20	-	30	-	24	-	24	-	35	-
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	1	2	2	1,4	1,4	1	1	1	1
Подготовка к защите	7	-	14	-	9,8	-	10	-	14	-

На основе данной таблицы строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 4.5 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работы	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февр		Март			Апрель			Май			Июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель (красный)	1														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент (синий)	9														

3	Календарное планирование работ	Руководитель, студент (желтый)	1														
4	Изучение возможностей расчётной модели	Студент	2														
5	Проведение расчётов	Студент	23														
6	Анализ полученных данных	Руководитель, студент	3														
7	Составление пояснительной записки	Студент	35														
8	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	1														
9	Подготовка к защите	Студент	14														

### 4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования учитывается полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование;
3. амортизационные отчисления;
4. основная заработная плата исполнителей;
5. дополнительная заработная плата исполнителей;
6. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
7. накладные расходы.

### 4.3.1 Расчёт материальных затрат

В данную статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

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

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;  $N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м,  $m^2$  и т.д.);  $C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./ $m^2$  и т.д.);  $k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (3-5% от стоимости материалов) [57, 58].

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчетов по затратам на материалы приведены в таблице 4.7.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

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

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;  $F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2784 рубля.

### 4.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных работ

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.



Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

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

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

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

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Затраты на амортизацию оборудования приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Персональный компьютер	1	4	30	30
<b>Итого</b>		30 тыс. руб.			

Рассчитывается норма амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 4 года:

$$N_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{4} = 0,25.$$

Общая сумма амортизационных отчислений (по формуле 4.7):

$$A = \frac{N_A I}{12} \cdot m = \frac{0,25 \cdot 30000}{12} \cdot 12 = 7500 \text{ руб.}$$

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	66	1118

Потери рабочего времени	56	28
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	219

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

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

стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д. иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессор и степенью доктор наук. Оклад профессора составляет 32566 рублей (без учета РК).

Исполнителем является инженер-исследователь Лейба Е.В., оклад инженера составляет 13786 руб. (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p,$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, составляет примерно 0,2-0,5;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Результаты представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{tc}$	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	32566	0,3	0,2	1,3	63503,7	2717,9	6	16307,4
Лейба Е.В.	13786	-	-	1,3	18070	1191,5	88	104852
Итого по статье								121159,4

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{доп} = 0,14$ );  $Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.10 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Лейба Е.В.
Основная зарплата $Z_{осн}$ , руб.	16307,4	104852
Дополнительная зарплата $Z_{доп}$ , руб.	2283	14679,7
Итого по статье $Z_{зп}$ , руб	18590,4	119531,3
Итого	138121,7	

#### 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot 138121,7 = 41436,5 \text{ руб.}$$

### 4.3.6. Накладные расходы

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

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{мат}} + Z_{\text{внеб}} + Z_{\text{осн}}).$$

Величину коэффициента накладных расходов  $k_{\text{нр}}$  можно взять в размере 16%.

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (1264 + 41436,5 + 121159,4) = 26217,6 \text{ руб.}$$

### 4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.11.

Определенная себестоимость проекта составляет 207039,8 руб., а время, необходимое для ее выполнения 89 календарных дней.

Таблица 4.11 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	1264
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	121159,4
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	16962,3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	41436,5
5. Накладные расходы	26217,6
Общие затраты исполнителя	205775,8
Общий бюджет затрат исследования	207039,8

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

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

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{207039,8}{500000} = 0,41;$$
$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{360565,4}{500000} = 0,72.$$

Исполнение 1 соответствует данной разработке, исполнение 2 – аналогичной. За максимальную стоимость исполнения взята гипотетическая стоимость проекта при максимальных ценах на все составляющие бюджета.

Полученная величина интегрального финансового показателя проекта отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки, т.к. полученное значение для разных исполнителей не превышает единицы.

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $b_i^a, b_i^p$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;  $n$  – число параметров сравнения.

В таблице 4.12 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп. 2
Точность вычислений	0,25	5	4
Скорость произведения расчетов	0,1	4	3
Удобство в эксплуатации	0,15	5	5
Визуализация результатов	0,2	5	5
Экономия средств	0,3	5	5
Итого	1	4,8	4,4

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 = 5;$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 = 4,55.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}}$$

$$I_{исп.1} = \frac{5}{0,41} = 12,2;$$

$$I_{исп.2} = \frac{4,55}{0,72} = 6,32.$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}},$$

где  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{финр}^p$  – интегральный показатель разработки;  $I_{фин}^{ai}$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 4.13 представлена сравнительная эффективность разработки.  
Таблица 4.13 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатель	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,41	0,72
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5	4,55
3	Интегральный показатель эффективности	12,2	6,32
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,93	

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация НИР в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности, т.к в первом исполнении требуется меньше времени для проведения исследования, а следовательно меньше затрат на заработную плату исполнителя.

### **Вывод по разделу "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение"**

На основе проведенного анализа сделаем следующие выводы:

1. Согласно анализу конкурентных технических решений установлено, что конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. Ранее разработанная сотрудниками ОЯТЦ модель позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую точность расчетных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

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

3. Бюджет исследования составил 207039,8 руб. Он состоит из материальных затрат (1264 руб.), затрат на оплаты труда (138121,7 руб.),

отчислений во внебюджетные фонды (41436,5 руб.) и накладных расходов (26217,6 руб.).

4. Произведена сравнительная характеристика эффективности разработки на основании интегрального показателя эффективности. Реализация проекта в первом исполнении является более эффективным вариантом.

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

В работе проводится изучение процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальные погружные емкости с вертикальным оребрением и без. Результаты могут быть использованы для совершенствования технологии десублимации гексафторида урана в АО «ПО ЭХЗ» и на других разделительных предприятия отрасли.

Исследования проводились с помощью двух и трехмерной математических моделей, реализованные в виде программы на языке FORTRAN-90 в среде Microsoft Developer Visual Studio. Исследования проводились в лаборатории № 246 10 корпуса Томского политехнического университета, при этом использовалась персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ).

В разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие



влияние на процесс исследования, рассмотрены воздействия исследуемого объекта на окружающую среду, правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства**

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [59]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий

труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

– внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

– гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В [59] говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником.

### 5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации [60]. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

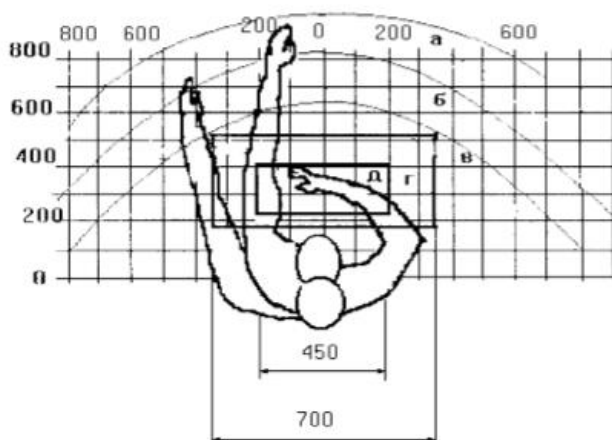


Рисунок 5.1. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

а - зона максимальной досягаемости рук;

б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в - зона легкой досягаемости ладони;

г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: 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:

– в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе;

– в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно [60].

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Предел высоты рабочей поверхности стола 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 подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

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°.

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 её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости  $15^\circ$  [60].

В лаборатории № 246 10 корпуса ТПУ полностью выполняются установленные нормы [60].

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На работника лаборатории, проводящего экспериментальные исследования, могут воздействовать следующие факторы:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические [61].

Опасные и вредные факторы, которые воздействуют на персонал при работе на ПЭВМ, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Опасные и вредные факторы помещения № 246 10 корпуса ТПУ

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с химическими реактивами.	Химические вредные вещества.	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества [62]. МУ 2.6.5.033-2017 Организация вентиляции на радиационно опасных предприятиях (производствах) госкорпорации "Росатом" [67]
Работа на плазменной установке.	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [63], СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотногодиапазона [64].
		Пожарная опасность	ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность[65].
Расчёт данных наЭВМ.	Шум, вибрация, микроклимат; воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [66], ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [63].

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

- умственное напряжение;
- физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы в лаборатории № 246 10 корпуса ТПУ отсутствуют.

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

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ они должны иметь естественное и искусственное

освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup> [63].

### 5.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Оптимальные параметры микроклимата

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений.

Вентиляция – процесс удаления отработанного воздуха из помещения и замена его наружным. Система вентиляции обеспечивает отток и приток воздуха в помещении. Вентиляция обеспечивает санитарно-гигиенические условия (температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха и чистоту воздуха) воздушной среды в помещении, благоприятные для здоровья и самочувствия человека, отвечающие требованиям санитарных норм, технологических процессов, строительных конструкций зданий, технологий хранения и т. д.

Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 ч<sup>-1</sup> [61].

Таким образом, установлено, что микроклимат в используемой лаборатории № 246 10 учебного корпуса ТПУ соответствует оптимальным

условиям работы [61, 67].

#### 5.2.4 Превышение уровня шума

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. В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Шум компрессора высокочастотного генератора используемой установки не превышает 75 дБ, что так же соответствует санитарным нормам [66].

В таблице 5.3 приведены нормы уровня шума при различных видах работ.

Таблица 5.3. Нормативы уровня шума при различных видах работ

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

В лаборатории № 246 10 учебного корпуса ТПУ уровень шума соответствует санитарным нормам [66].

#### 5.2.5 Повышенный уровень электромагнитного излучения

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

– в диапазоне частот 5Гц – 2кГц – 25В/м;

- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 2,5В/м.
- плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц – 2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 25нТл [64].

Существуют следующие способы защиты от действия электромагнитного излучения:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя) [64].

Установлено, что в лаборатории № 246 10 учебного корпуса ТПУ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам [64].

### **5.2.6 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

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

По нормативам освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300–500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [61].

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

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться:

- системой общего равномерного освещения.



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

- комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
- местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [61].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b,$$

где  $A$  – длина, м;  $B$  – ширина, м.

$$S = 4 \text{ м} \cdot 5 \text{ м} = 20 \text{ м}^2,$$

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

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

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

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

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

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

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

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.}$$

Из формулы

$$\Phi_{л} = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta};$$

где коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_3 = 1.5$ , коэффициент неравномерности для светодиодных лент  $Z = 1,1$ ,  $N$  – число светодиодных лент,  $\eta$  – коэффициент использования светового потока,  $\Phi_{л}$  – потребный световой поток светодиодных ламп.

Находим число светодиодных лент  $N$

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_{л} \cdot \eta};$$

$\eta$  определяем через индекс помещения по формуле:

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

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

Тогда

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

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

Потребный световой поток светодиодных ламп:

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

Из условий равномерности освещения определяем расстояния  $L_1$  и  $\frac{L_1}{3}$ ,  $L_2$  и  $\frac{L_2}{3}$  по следующим уравнениям:

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

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

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

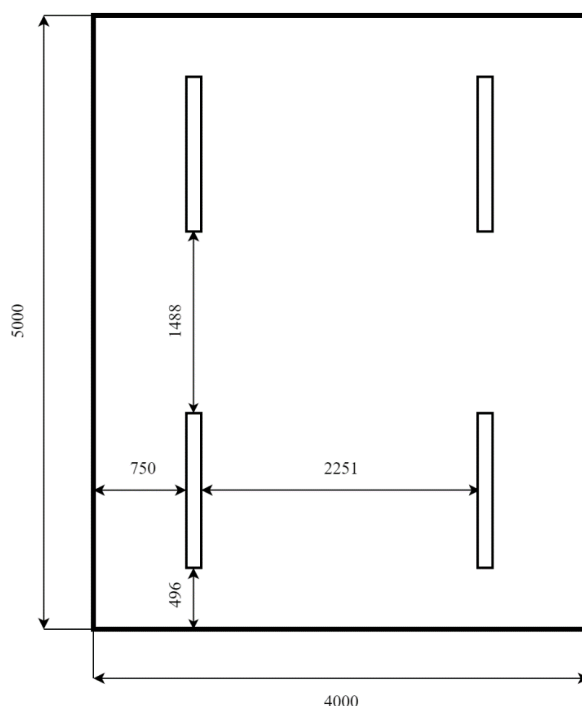


Рисунок 5.2. План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

$$\frac{-10\% \leq (\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{л}})}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%,$$

$$\frac{(\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{л}})}{\Phi_{\text{лд}} \cdot 100\%} = \frac{(2900 - 2750)}{2900} \cdot 100\% = 5,71\%.$$

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

$$P = 8 \cdot 9 = 72 \text{ Вт.}$$

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

### **5.2.7 Электробезопасность**

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции) [63];

Мероприятия по обеспечению электробезопасности установок:

- 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 (заключение в корпус токоведущих и электропоражающих частей) [63].

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

– оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

– изолирующие устройства и покрытия;

– устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

– устройства дистанционного управления;

– предохранительные устройства и др.

Таблица 5.4. Классификация помещений по электробезопасности

Категория	Расшифровка	Критерии
1	Помещения без повышенной опасности	- Влажность не более 75 % - Работающая приточно-вытяжная вентиляция - Температура не выше 35 °С - Материал покрытия пола не проводит электричество
2	Помещения с повышенной опасностью	- Влажность более 75 % - В воздухе возможно наличие токопроводящей пыли - Высокое содержание в воздухе химических

		соединений - Материал пола способен проводить электричество - Высокая температура
3	Особо опасные	- Особо сырые, влажность воздуха 100 % - Помещения с активной химической или органической средой - Наличие сразу двух факторов, относящихся к условиям повышенной опасности
4	Территории с открытыми электроустановками	- Наличие открытого распределительного устройства (ОРУ)

Из таблицы 5.4 можно видеть, что лаборатория № 246 10 учебного корпуса ТПУ относится ко 1-ой категории.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь не электротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [61].

### **5.2.8 Психофизиологические факторы**

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

Трудовая деятельность работников непромышленной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональных на активность центральной нервной системы,

приводит к расстройством в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [61].

В ходе выполнения работа в лаборатории № 246 10 учебного корпуса ТПУ руководителем организованы все необходимые мероприятия для нивелирования психофизических факторов.

### **5.2.9 Пожарная и взрывная безопасность**

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

Возможные причины возгорания [65]:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов.
- Наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности веществом, применяемым в работе, является этанол.

Все работы с этанолом должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования. При отборе проб, проведении анализа и обращении в процессе транспортных и производственных операций с этанолом

применяются индивидуальные средства защиты по нормам выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств защиты, утвержденным в установленном порядке.

Для тушения горящего этанола применяют порошковые огнетушители, средства объемного тушения минимальная огнетушащая концентрация: углекислого газа – 29 % (по объему), азота – 43 % (по объему), дибромтетрафторэтана – 2,1 % (по объему), песок, асбестовое одеяло и пену [65].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [65].

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 [65].

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

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [65]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- 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);
- 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 пожара сообщить руководителю, органам противопожарной безопасности предприятия и приступить к тушению пожара огнетушителем.

При возникновении аварийной ситуации необходимо [65]:

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

### **5.3 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях**

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

Аварийная ситуация (АС) – сочетание условий и обстоятельств, создающих угрозу возникновения аварий и других происшествий, которые

могут привести к взрыву, пожару, отравлению, гибели или травмированию (заболеванию) людей, животных, потерям материальных ценностей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. В таблице 6 рассмотрены возможные аварийные и чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидации их последствий.

Таблица 5.5 – Аварийные и чрезвычайные ситуации, методы предотвращения и ликвидации последствий

№	Чрезвычайная и аварийная ситуация	Методы предотвращения ЧС и АС	Ликвидация последствий ЧС и АС
1	Пожар	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Соблюдение технологических режимов производства; Создание условий для эвакуации персонала	Вызов пожарной службы и спасателей (тел. 112); Вызов скорой медицинской помощи
2	Удар током	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Содержание энергетических сетей в исправном состоянии	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи
3	Травмирование в результате падения с высоты	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Создание систем предупреждения падений; Соблюдать требования безопасности при выполнении работ на высоте	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи

### **Выводы по разделу «социальная ответственность»**

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте в лаборатории № 246 10 корпуса ТПУ при проведении исследований:

- микроклимат [61, 67];
- шум [66];
- электромагнитное излучение [64];

- освещенность [61];
- психофизиологические факторы [61];
- электробезопасность [63];
- пожаро-взрывобезопасность [65].

Помещение № 246 10 корпуса ТПУ отнесено:

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

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

## Conclusions

1. Numerical studies of the influence of the degree of filling of tanks on the dynamics of desublimation of dump  $\text{UF}_6$  in vertical submersible tanks without fins and with vertical fins with a volume of  $2.0\text{--}4.0\text{ m}^3$  were carried out. It is shown that the filling time of tanks with and without fins of the same volume with desublimated  $\text{UF}_6$  is much shorter for tanks with fins (by  $1.73\text{--}2.15$  times), which is explained by the larger area of their heat exchange surface.

2. It is shown that the desublimation process is non-stationary. With an increase in the thickness of the desublimated layer, its thermal resistance increases, which leads to a slowdown in the desublimation process.

3. It is shown that the average productivity of tanks without fins decreases much faster than in tanks of the same volume with fins. The average performance of tanks with and without fins at 10% filling of the tanks is almost the same. With a further increase in the degree of filling, the average productivity becomes higher for tanks with vertical finning (by a factor of  $1.71\text{--}2.06$ ) due to the larger area of the heat exchange surface. The calculation showed that for tanks with a volume of  $2.0, 2.5, 3.0\text{ m}^3$  with fins, the maximum degree of filling is not reached, due to "freezing" on the ribs.

## Reference

1. Osnovy himii i tekhnologii monomerov: uchebnoe posobie / N.A. Plate, E.V. Slivinskij. – M.: Nauka: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2002. – 696 p.
2. Azhazha V.M. Sovershenstvovanie processa i oborudovaniya sublimacii tetraftorida cirkoniya i gafniya / V.M. Azhazha, YU.P. Bobrov, P.N. V'yugov i dr. // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. – 2006. – № 4. – pp. 138 – 143.
3. Ozherel'ev O.A. Primenenie EXAFS-spektroskopii dlya issledovaniya vysokotemperaturnoj sorbcii ftoridov na poverhnosti cirkoniya / O.A. Ozherel'ev, A.S. Fedin, N.K. Mereuca // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2009. – Vol. 315. – № 2. – pp. 79 – 84.
4. Andreev A.A. Aspekty tekhnologii polucheniya dioksida titana pererabotkoj il'menita ftoridami ammoniya / A.A. Andreev, A.N. D'yachenko // VIII Vserossijskaya konferenciya «Himiya ftora»: tez.dokladov. – M.: Interkontakt Nauka, 2009. 114 p.
5. Istomin I.A. Sublimacionnaya ochistka preparata molibdena-99 metodom lazernogo skanirovaniya / I.A. Istomina, A.A. Mal'cev, YU.A. Zanora // XIII nauchno-prakticheskaya konferenciya «Dni nauki - 2013»: tez. dokladov. – Ozersk: OTI NIYAU MIFI, 2013. – Vol. 2. – pp. 19 – 21.
6. Hasanov R.N. Razrabotka i proverka tekhnologicheskogo processa sublimacionnoj ochistki molibdena-99 / R.N. Hasanov, YU.A. Voroshilov // XIII nauchno-prakticheskaya konferenciya «Dni nauki - 2013»: tez. dokladov. – Ozersk: OTI NIYAU MIFI, 2013. – Vol. 2. – pp. 42 – 44.
7. Pishchulin V.P. Ustanovka sublimacionnoj ochistki trioksida molibdena / V.P. Pishchulin, F.V. Makarov, V.A. Tyahonov // Tekhnologiya i avtomatizaciya atomnoj energetiki i promyshlennosti: Materialy Otrasleyvoj nauchno- tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu NIYAU MIFI: tez. dokladov. – Seversk: Izd-vo STI NIYAU MIFI, 2012. 140 p.
8. Makarov F.V. Issledovanie ochistki trioksida molibdena ot oksidov urana metodom sublimacii pri ponizhennom davlenii / F.V. Makarov // Cvetnye metally. – 2010. – № 3. – pp. 83 – 86.

9. Mashiny i apparaty pishchevyh proizvodstv. V 2 kn. Kn. 2: ucheb.dlya vuzov / S.T. Antipov, I.T. Kretov, A.N. Ostrikov i dr. – M.: Vyssh. shk., 2001. – 680 p.
10. Skripnikov YU.G. Innovacionnye tekhnologii sushki rastitel'nogo syr'ya / Skripnikov YU.G., Mitrohin M.A., Radionov YU.V. i dr. // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. – 2012. – № 3 – pp. 371 – 376.
11. Bulkin M.S. Sublimacionnaya sushka syr'ya biologicheskogo proiskhozhdeniya s uchetom fluktuacij v promyshlennyh tekhnologiyah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.12 / Bulkin Maksim Sergeevich. – Moskva, 2010. – 24 p.
12. Vil'nina A.V. Eksperimental'noe issledovanie processa desublimacii ot dlitel'nosti cikla zaholazhivaniya / A.V. Vil'nina, V.F. Dyadik, S.A. Bajdali i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2009. – Vol. 315. - № 2. – pp. 91 – 93.
13. Vil'nina A.V. Adaptivnyj algoritm upravleniya uzlom desublimacii geksaftorida urana / A.V. Vil'nina, S.V. Livencov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2008. – Vol. 312. – № 5 – pp. 133 – 136.
14. Gubanov S.M. CHislennoe modelirovanie ohlazhdeniya emkostej dlya desublimacii parov / S.M. Gubanov, A.YU. Krajnov // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. – 2011. – Vol. 3. – № 4. – pp. 383 – 388.
15. Vesenin I.M. Matematicheskaya model' i rezul'taty chislennyh raschetov pereliva UF6 v prisutstvii mikrokolichestv legkih primesej / I.M. Vasenin, A.YU. Krajnov, A.A. SHahtin i dr. // Izvestiya Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2010. – № 2. – pp. 53 – 59.
16. Obogashcheniya urana / Pod red. S. Villani: Per. s angl. Pod red. I.K. Kikoina. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 320 p.
17. Maslov A.A., Kalyackaya G.V., Amelina G.N., Vodyankin A.YU., Egorov N.B. Tekhnologiya urana i plutoniya: uchebnoe posobie. – 2-e izd. – Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008. – 144 p.
18. Kalyackaya G.V., Strashko A.N. Himiya i analiticheskaya himiya

urana i toriya: uchebnoe posobie. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011 – 80 p.

19. Himiya urana i transuranovyh elementov / V.M. Vdovenko. – M.-L.: Izdatel'stvo AN SSSR, 1960. – 760 p.

20. Tananaev I.V. Himiya ftoridov urana / I.V. Tananaev, N.S. Nikolaev, YU.A. Luk'yanychev i dr. // Uspekhi himii. – 1961. – Vol. HKHKH. – Vyp. 12. – pp. 1490-1552.

21. Bojko V. I. YAdernyj toplivnyj cikl i rezhim nerasprostraneniya/ Bojko V.I., Demyanyuk D.G., Isachenko D.S.// Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2009. – pp. 6 – 7.

22. Borman V.D. Teoriya kaskadov dlya razdeleniya binarnyh i mnogokomponentnyh izotopnyh smesej // Izdatel'stvo MIFI – 2011.

23. Galkin N.P. Himiya i tekhnologiya ftoristyh soedinenij urana. - M.: Gosatomizdat, 1961. - 349 p.

24. Turaev N.S., ZHerin I.I. Himiya i tekhnologiya urana. - M.: Izdatel'skij dom «Ruda i Metally», 2006. - 396 p.

25. Andreev G.G., D'yachenko A.N. Vvedenie v himicheskuyu tekhnologiyu yadernogo topliva. - Tomsk: Izd-vo TPU, 2008. - 150 p.

26. Ezhov V.K. Promyshlennaya rektifikacionnaya ustanovka dlya glubokoj ochistki sublimatnogo geksaftorida urana // Atomnaya energiya. -2007. - T. 103. - № 5. – pp. 314-317.

27. Bajdali S.A., Dyadik V.F., YUrkov A.S. Matematicheskaya model' proizvodstva geksaftorida urana // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. - 2009. - T. 315. - № 2. – pp. 84-90

28. Belozarov B.P., Rusakov I.YU., Andreev G.G. i dr. Analiz processa i apparatury dlya desublimacii geksaftorida urana i drugih letuchih ftoridov // Cvetnye metally. - 2012. - № 1. – pp. 58-61.

29. Smirnov A.YU. Osobennosti massoperenosa promezhutochnyh komponentov v pryamougol'nom kaskade iz gazovyh centrifug dlya razdeleniya mnogokomponentnyh smesej / A.YU. Smirnov, G.A. Sulaberidze // Teoreticheskie

osnovy himicheskoy tekhnologii. – 2014. – Vol. 48, № 5. – pp. 572–579.

30. Smirnov A.YU. Vliyanie profilya potoka pitaniya stupeney kaskada na masoperenos promezhutochnykh komponentov / A.YU. Smirnov, G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. – 2010. – Vol. 44, № 6. – pp. 672–680.

31. Pat. 2344082 RF, MPK V01D 7/00, B01D 3/10, B01D 53/24, C01G 43/06; Sposob vydeleniya geksatorida urana iz mnogokomponentnykh gazovykh smesey / A.V. Saprygin, I.V. Voroh, T.S. Tamanova, V.D. Pirogov, A.YU. Kurkin, V.V. Kozin, A.V. Nalivajko ; zayavl. 20.07.2008 ; opubl. 20.01.2009, Byul. № 2. – 1–7 p.

32. Korotkevich V.M. Realizaciya programmy «VOU–NOU» na SKHK / V.M. Korotkevich, V.V. Lazarchuk // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2003. – Vol. 306, № 1. – pp. 93–100.

33. Razrabotka mass-spektrometricheskoy s induktivno–svyazannoy metodiki analiza geksatorida urana s hromatograficheskim razdeleniem urana i primesej na kolonke so smoloy UTEVA / V.M. Golik, S.L. Ivanov, A.V. Prosviryakova i dr. // Analitika i kontrol'. – 2011. – Vol. 15, № 2. – pp. 174–181.

34. Borisevich V.D. Obogashchenie urana na gazovykh centrifugah: povtorenie proydennogo? / V.D. Borisevich // 6-ya Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya «Fiziko-himicheskie processy pri selekcii atomov i molekul». – Zvenigorod: CNIATOMINFORM, 2002. – pp. 7–11.

35. Opredelenie koefficienta teploprovodnosti tverdoj fazy geksatorida urana / V.V. Raev, A.V. Saprygin, A.P. Cedilkin i dr. // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. – 2011. – Vol. 8, № 4. – pp. 125–130.

36. Opredelenie koefficienta teploprovodnosti tverdoj fazy geksatorida urana / G.S. Solov'ev, A.V. Saprygin, V.M. Golik i dr. // Vserossiyskaya nauchno–prakticheskaya konferenciya “Ftoridnye tekhnologii”: tez. dokladov. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2009. – pp. 68.

37. Golik V.M., Golik S.V., Ivanov S.L. i dr. Razrabotka massspektrometricheskoy s induktivno-svyazannoy metodiki analiza geksatorida



urana s hromatograficheskim razdeleniem urana i primesej na kolonke so smoloy UTEVA // Analitika i kontrol'. - 2011. - T. 15. - № 2. – pp. 174-181.

38. Vinogradov S.N., Tarancev K.V., Vinogradov O.S. Vybor i raschet teploobmennikov. - Penza: Izd-vo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001. - 100 p.

39. Orlov A.A. Methods of uranium hexafluoride purification / A.A. Orlov, R.V. Malyugin // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 43. – P. 46–49.

40. Suhov S.V. Osnovy konstruirovaniya i rascheta teploobmennyyh apparatov / S.V. Suhov, G.M. Kazakov. – Nizhnij Novgorod: Izd-vo NNGASU, 2009.–60 p.

41. Berman S.S. Teploobmennyye apparaty i kondensacionnyye ustrojstva turboustanovok / S.S. Berman – Moskva : MASHGIZ, 1959. – 423 p.

42. Semakina O.K. Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv: uchebnoe posobie / O.K. Semakina – Tomsk : Izd-vo TPU, 2011. – 127 p.

43. Matematicheskoe modelirovanie processa desublimacii UF<sub>6</sub> / A.A. Orlov, S.M. Koshelev, V.I. Vandyshev i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2006. – Vol. 309, № 3. – pp. 89–92.

44. Semilet Z.V. Orositel'nye teploobmenniki himicheskikh proizvodstv / Z.V. Semilet. – Moskva : Gosudarstvennoe nauchno-tekhicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury, 1961. – 113 p.

45. Godunov S.K. Chislennoe reshenie mnogomernyyh zadach gazovoj dinamiki / S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, M.YA. Ivanov i dr. – M.: Nauka, 1976.

46. Mazhukin A.V. Dinamicheskaya adaptaciya v parabolicheskikh uravneniyah / A.V. Mazhukin, V.I. Mazhukin // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki. – 2007. – T. 47. – № 11. – pp. 1913-1936.

47. Breslavskij P.V. Algoritm chislennogo resheniya gidrodinamicheskogo varianta zadachi Stefana pri pomoshchi dinamicheski adaptiruyushchihsya setok / P.V. Breslavskij, V.I. Mazhukin // Matematicheskoe modelirovanie. – 1991. – Vol. 3. – № 10. – pp. 104-114.

48. Sivuhin V.D. Obschij kurs fiziki. Optika. M.: Nauka, 1980.
49. Byun D.Y., Baek S.W., Kim M.Y. Investigation of radiative heat transfer in complex geometries using blocked-off, multiblock, and embedded boundary treatments // Numer. Heat Transfer, Part A. 2003. V. 43. P. 807.
50. Chai J.C., Moder J.P. Spatial-multiblock procedure heat transfer // Numer. Heat Transfer, Part B. 1997. V. 31. P. 277.
51. Consalvi J.I., Porterie B., Loraund J.C. A blocked-off-region strategy to compute fire-spread scenarios involving internal flammable targets // Numer. Heat Transfer, Part B. 2005. V. 47. P. 419.
52. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Leontieva D.A., Kotelnikova A.A. Effect of tank geometry on its average performance // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1938. Article number 020009.
53. Breslavskij P.V. Algoritm chislennogo resheniya gidrodinamicheskogo varianta zadachi Stefana pri pomoshchi dinamicheski adaptiruyushchihsya setok / P.V. Breslavskij, V.I. Mazhukin // Matematicheskoe modelirovanie. – 1991. – Vol. 3. – № 10. – pp. 104-114.
54. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – Washington D.C.: Hemisphere, 1980. – 197 p.
55. Verzhbickij V.M. Osnovy chislennyh metodov. – M.: Vysshaya shkola, 2009. – 840 p.
56. Orlov A.A., Cimbalyuk A.F., Malyugin R.V. Desublimaciya UF<sub>6</sub> v emkostyah s vertikal'nym orebreniem // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. – 2020. – Vol. 54. - № 1. – pp. 52-61.
57. Finansovyj menedzhment, resursoeffektivnost' i resursosberezhenie: uchebno-metodicheskoe posobie / N.A. Gavrikova, L.R. Tuhvatulina, I.G. Vidyaev, G.N. Serikova, N.V. SHapovalova. – Tomsk: NI TPU, 2014. – 73 p.
58. Knyshova E. N. Ekonomika organizacii: uchebnik / E. N. Knyshova, E. E. Panfilova. – Moskva: Forum Infra-M, 2012. – 334 p.: il. – Professional'noe obrazovanie.

59. Trudovoj kodeks Rossijskoj Federacii ot 30.12.2001 № 197-FZ (red. ot 28.03.2021) // Sobranie zakonodatel'stva RF. - 07.01.2002.
60. SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03 «Gigienicheskie trebovaniya k personal'nym elektronno-vychislitel'nym mashinam i organizacii rabot».
61. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya».
62. GOST 12.1.007-76 «SSBT. Vrednye veshchestva».
63. GOST 12.1.038-82 «SSBT. Elektrobezopasnost'».
64. SanPiN 2.2.4/2.1.8.055-96 «Elektromagnitnye izlucheniya radiochastotnogo diapazona».
65. GOST 12.1.004-91 «SSBT. Pozharnaya bezopasnost'».
66. SanPin 2.2.4.3359-16 «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochih mestah».
67. MU 2.6.5.033-2017 Organizaciya ventilyacii na radiacionno opasnyh predpriyatiyah (proizvodstvah) goskorporacii "Rosatom"
68. SP 12.13130.2009 «Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdanij i naruzhnyh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti».