

Школа Инженерная Школа Ядерных Технологий  
 Направление подготовки 03.04.02 «Физика»  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение Экспериментальной Физики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Разработка универсальной криогенной поверхности с температурой криостатирования 80 – 300 К.</b>

УДК 621.793-046.47:661.938-911.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Д.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2022 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий.
<b>УК(У)-2</b>	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
<b>УК(У)-3</b>	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
<b>УК(У) -4</b>	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
<b>УК(У)-5</b>	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
<b>УК(У)-6</b>	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-3</b>	Способностью к активной социальной мобильности, организации научно-исследовательских и инновационных работ;
<b>ОПК(У)-4</b>	Способностью адаптироваться к изменению научного профиля своей профессиональной деятельности, социокультурных и социальных условий деятельности;
<b>ОПК(У)-5</b>	Способностью использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки;
<b>ОПК(У)-6</b>	Способностью использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе;
<b>ОПК(У)-7</b>	Способностью демонстрировать знания в области философских вопросов естествознания, истории и методологии физики.

<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-2</b>	Способностью свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.
<b>ПК(У) -3</b>	Способностью принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности.
<b>ПК(У)-6</b>	Способностью методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы учебных дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики.
<b>ПК(У)-7</b>	Способностью руководить научно-исследовательской деятельностью в области физики обучающихся по программам бакалавриата.
<b>ДПК(У)-1</b>	Способностью планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел и критически оценивать полученные результаты.
<b>ДПК(У)-2</b>	Способностью обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.

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

Школа \_\_\_\_\_ Инженерная школа ядерных технологий \_\_\_\_\_  
 Направление подготовки 03.04.02 «Физика»  
 Отделение школы (НОЦ) \_\_\_\_\_ Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Лидер А.М. \_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

<b>Магистерской диссертации</b> (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
---

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна

Тема работы:

<b>Разработка универсальной криогенной поверхности с температурой криостатирования 80 – 300 К.</b>
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект исследования: Универсальная криогенная поверхность
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Обзор литературы. Компьютерная модель теплофизических процессов в модели УКП распределение температуры в 3-Д модели УКП
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Кафедра теплофизики и технической физики	Соколов Д.Ю.
Социальная ответственность	
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
ГЛАВА 2. Объект и методы исследования	
2.1. Охлаждённые поверхности	
2.2. Свойства металлов	
2.3. Свойство веществ при низких температурах	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Таженова М.С.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение</b>	<b>Отделение экспериментальной физики</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	03.04.02 Физика

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
Разработка универсальной криогенной поверхности с температурой криостатирования 80 – 300 К.	Работа с научной литературой, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив разработки проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Планирование и формирование бюджета разработки	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение бюджета научного исследования
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности разработки	Проведение оценки экономической эффективности, ресурсоэффективности и сравнительной эффективности различных вариантов исполнения
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет проекта 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности разработки	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.03.2022
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	Кандидат экономических наук		01.03.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна		01.03.2022

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение автоматизации и робототехники</b>
Уровень образования	Магистр	03.04.02 Физика	Отделение экспериментальной физики

**Тема дипломной работы: «Разработка универсальной криогенной поверхности с температурой криостатирования 80 – 300 К»**

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Разработка крио поверхности для охлаждения и дальнейшей работы с образцами, в том числе активными различного состава в диапазоне температур поверхности 80 К – 300 К.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Природа воздействия</li> <li>• Действие на организм человека</li> <li>• Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов)</li> <li>• СИЗ коллективные и индивидуальные</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Термические источники опасности</li> <li>• Электробезопасность</li> <li>• Пожаробезопасности</li> </ul>	<p>Вредные факторы: Недостаточная освещенность;</p> <p>Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры;</p> <p>Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</p> <p>Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</p> <p>Наличие токсикантов, (запыленность, загазованность), ПДК, класс опасности, СКЗ, СИЗ;</p> <p>Радиоактивность, ПДД, критические органы, СКЗ, СИЗ;</p> <p>Лазерное излучение, классы лазеров, СКЗ, СИЗ.</p> <p>Опасные факторы:</p> <p>Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R<sub>заземления</sub>, СКЗ, СИЗ;</p> <p>Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ;</p>

	Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.
<b>4. Перечень нормативно-технической документации.</b>	– ГОСТы, СанПиНы, СНиПы

<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 ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна		



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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.04.02 «Физика»  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение Экспериментальной физики  
 Период выполнения \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

Магистерская работа
---------------------

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.08.2020	<i>Обзор литературы</i>	10
10.12.2020	<i>Объект и методы исследования; Расчеты и аналитика</i>	40
01.02.2021	<i>Результаты проведенного исследования</i>	30
01.05.2021	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
01.05.2021	<i>Социальная ответственность</i>	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой – руководитель отделения направах кафедры	Лидер Андрей Маркович	Д.Т.Н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 134 с, 19 рисунка, 96 источника.

**Ключевые слова:** крио поверхность, фризер, термостат, криостат, крио панель, низкие температуры, крио насос, морозильник, жидкий азот.

**Объектом** исследования являются охлаждённые поверхности, свойства металлов при низких температурах.

**Цель работы** - разработка крио поверхности для охлаждения и дальнейшей работы с образцами, в том числе активными различного состава в диапазоне температур поверхности 80 К – 300 К. Для достижения конечной цели сложнейшей и актуальной попутной задачей является создание насоса с регулируемым расходом для жидкого азота и других крио жидкостей.

В процессе работы использовались методы и формы научного исследования, проведение взаимосогласованного комплекса расчетно-теоретических исследований с использованием современных компьютерных программ и экспериментальных исследований на специализированных установках и сопоставление результатов расчетов и экспериментов. Системы измерения полей температуры и скоростей, потерь тепла обеспечат сведение материального и теплового балансов процесса, на основании которых будут определены интегральные показатели для производства крио поверхности.

В результате исследования были проведены маркетинговые исследования, изучение требований для различных областей использования разработки в науке (при измерении теплопроводности относительным методом, определение вязкости нефтепродуктов, космические исследования и низкотемпературные измерения), в медицине (производство лекарств, изучение биологических образцов и кристаллизации белковых соединений), в промышленности (производство мороженого и карамели) и для ремонта дисплеев. Это необходимо для предпочтений спроса и подбора комплектации изобретения без изменения общей конструкции, и значительной экономии средств для потребителя. Результатом будет система, обладающая компактностью, универсальностью, автономностью.

Достигнутые технико-эксплуатационные показатели: высокая экономичность расхода жидкого азота, высокая точность поддержания температуры рабочей поверхности.

Степень внедрения: не внедрено.

Эффективность установки определяется техникой экономическими показателями.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 7.0 и AutoCAD представлена на дискете 3,5" (в конверте на обороте обложки).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>15</b>
<b>ГЛАВА I. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КРИОГЕННОЙ ЛИНИИ</b> .....	<b>17</b>
1.1. Исследование режима теплообмена.....	17
1.2. Физика жидкости в криогенных условиях .....	21
1.3. Критический тепловой поток при кипении в потоке (CHF).....	26
1.4. Исследование критического теплового потока в криогенных жидкостях....	30
<b>ГЛАВА II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА</b> .....	<b>33</b>
2.1. Теория метода конечных элементов .....	35
2.2. Метод моделирования .....	40
<b>ГЛАВА III. СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ</b> ...	<b>43</b>
3.1. Экспериментальное исследование теплопередачи струйного охлаждения LN <sub>2</sub> .....	47
3.2. Анализ эксперимента.....	50
3.3. Конечно-элементное моделирование и анализ .....	51
3.4. Расчет поверхностного коэффициента теплопередачи (КТК) .....	53
3.5. Анализ механизма охлаждения струи LN <sub>2</sub> .....	55
3.6. Влияние азотной фазы .....	57
3.7. Свойства криогенных жидкостей.....	58
3.8. Результаты моделирования крио поверхности .....	65
3.9. Разработка рабочего чертежа.....	67
3.10. Материалы, используемые в численном анализе .....	68
<b>ГЛАВА IV. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ</b> .....	<b>74</b>
4.1. Предпроектный анализ .....	74
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования .....	74
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	75

4.1.3. SWOT-анализ .....	77
4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	80
4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования .....	82
4.2. Инициация проекта .....	82
4.3. Планирование управления научно-техническим проектом .....	84
4.3.1. План проект .....	85
4.4. Бюджет научного проекта .....	87
4.5. Операционные затраты .....	94
4.5.1. Организационная структура проекта .....	94
4.5.2. План управления коммуникациями проекта .....	95
4.5.3. Реестр рисков проекта .....	95
4.6. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности .....	96
4.6.1. Оценка абсолютной эффективности исследования .....	96
4.6.2. Оценка сравнительной эффективности исследования .....	96
<b>ГЛАВА V. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ</b> .....	<b>105</b>
Введение .....	105
5.1. Производственная безопасность .....	105
5.1.1. Отклонение показателей микроклимата .....	105
5.1.2. Превышение уровня шума .....	107
5.1.3. Повышенный уровень электромагнитных излучений .....	107
5.1.4. Поражение электрическим током .....	111
5.1.5. Освещенность .....	114
5.1.6. Пожарная опасность .....	11
5.2. Экологическая безопасность .....	116
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	118
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>118</b>
Приложение А PROPERTIES OF CRYOGENIC LIQUIDS .....	120

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>127</b>
--------------------------------	------------

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка крио поверхности для охлаждения и дальнейшей работы с образцами, в том числе активными различного состава в диапазоне температур поверхности 80 К – 300 К. Для достижения конечной цели сложнейшей и актуальной попутной задачей является создание насоса с регулируемым расходом для жидкого азота и других крио жидкостей.

В тех практических задачах, где возникает потребность в создании низких температур, обычно используется один из принципов получения низких температур: охлаждение за счет фазовых превращений (сублимация, испарение, кипение); дросселирование (эффект Джоуля — Томпсона); расширение с совершением внешней работы; вихревой эффект (эффект Ранка — Хильша); термоэлектрический эффект (эффект Пельтье). Но использование крио жидкости как жидкий азот помогает не использовать эти методы. В настоящее время у жидкого азота немало сфер применения, он не взрывоопасен и не ядовит. А при разделении газов из воздуха он является побочным продуктом, что значительно привлекает для использования как энергоноситель по относительно низкой цене.

Метод компьютерного моделирования протекания быстротечных процессов в экспериментальной установке для определения термодинамических и физических характеристики теплообмена;

Методы измерения расхода криожидкости;

Методы измерения низких температур;

Метод равномерного нагрева металлических материалов;

Используемые методы и формы научного исследования имеют целью проведение взаимосогласованного комплекса расчетно-теоретических исследований с использованием современных компьютерных программ и экспериментальных исследований на специализированных установках и сопоставление результатов расчетов и экспериментов. Системы измерения полей температуры и скоростей, потерь тепла обеспечат сведение материального и

теплового балансов процесса, на основании которых будут определены интегральные показатели для производства крио поверхности.



## ГЛАВА I. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КРИОГЕННОЙ ЛИНИИ

Охлаждение криогенной линии - это процесс охлаждения линии перекачки криогенных жидкостей, обычно от комнатной температуры до криогенной температуры, чтобы гарантировать, что криогенные жидкости достигают места назначения в жидком состоянии. Этот процесс привлек внимание, поскольку криогенные жидкости играют все более важную роль в современных отраслях промышленности и академических областях [1,2]. Во время процесса охлаждения линии неизбежно образуется большое количество газа (BOG), и это часто сопровождается феноменом скачка давления, который может нанести большой ущерб системе. Следовательно, он становится неотъемлемой частью управления криогенной жидкостью, что является критическим предварительным условием для обеспечения устойчивой и безопасной рабочей среды для криогенной системы. Самая большая проблема при охлаждении криогенной линии - понять переходные характеристики теплопередачи и спрогнозировать процесс охлаждения [3].

Теплофизические характеристики в процессе охлаждения криогенной линии активно изучаются с 1960-х годов. Исследования по охлаждению криогенной линии в прошлом веке в основном были сосредоточены на влиянии давления и массового расхода на время охлаждения. Также были предприняты некоторые попытки численно предсказать время охлаждения; однако была сделана лишь краткая оценка с некоторыми нереалистичными предположениями, такими как усреднение свойств жидкости и коэффициента теплопередачи (КТ) для упрощения или с использованием единой корреляции для всего процесса охлаждения. Проведены некоторые углубленные исследования ВТК криогенного охлаждения по режимам теплообмена [4–6].

За последние два десятилетия был достигнут быстрый прогресс. В 2007 году Юань и др. проанализировали экспериментальные данные о тепловом потоке на основе измеренной температуры стенки в горизонтальной трубе. Они

четко показали переход режима кипения в процесс охлаждения, анализируя данные теплового потока и визуализируя его картины [7]. В 2012 году аналогичное исследование было проведено в работе [8] в вертикальной трубе. Они визуализировали структуру потока, вывели историю теплового потока и обсудили влияние направлений потока, нисходящего и восходящего потоков на характеристики теплопередачи [8]. После этого исследования по охлаждению криогенной линии были сосредоточены на расширении базы данных по охлаждению, выявлению влияния различных параметров и разработке новых корреляций КТ для различных режимов теплопередачи с целью более точного моделирования процесса охлаждения. В 2015 Дж. Джонсон и С. Шайн провели эксперименты по охлаждению линии жидкого азота ( $LN_2$ ) в горизонтальных и наклонных трубах [9]. Было исследовано влияние длины трубы и потока массы на время охлаждения и тепловой поток. В 2015 году д. Дарр провели линейные эксперименты по охлаждению с помощью  $LN_2$  в вертикальной трубе длиной примерно 0,5 м и смоделировали процесс охлаждения с помощью одномерной гомогенной модели [10]. В 2016 г. они дополнительно расширили диапазон массового потока в экспериментах и усовершенствовали корреляции КТ пленочного кипения с учетом направлений потоков [11,12]. Исследования д. Дарр предоставил много значимых обновлений для расследования криогенного охлаждения линии. Однако применимость предложенных корреляций требует изучения, особенно для трубы, которая намного длиннее исследуемой трубы.

### **1.1. Исследование режима теплообмена**

Режим теплопередачи в каждой точке линии передачи меняется со временем, так как картина потока изменяется в зависимости от температуры стенки и качества жидкости (Рис. 1). Однако устройства визуализации трудно реализовать при криогенных температурах. Как упоминалось выше, изменение режимов теплопередачи во время процесса охлаждения криогенной линии часто идентифицируется на основе данных теплового потока, полученных из данных измеренной температуры стенки.

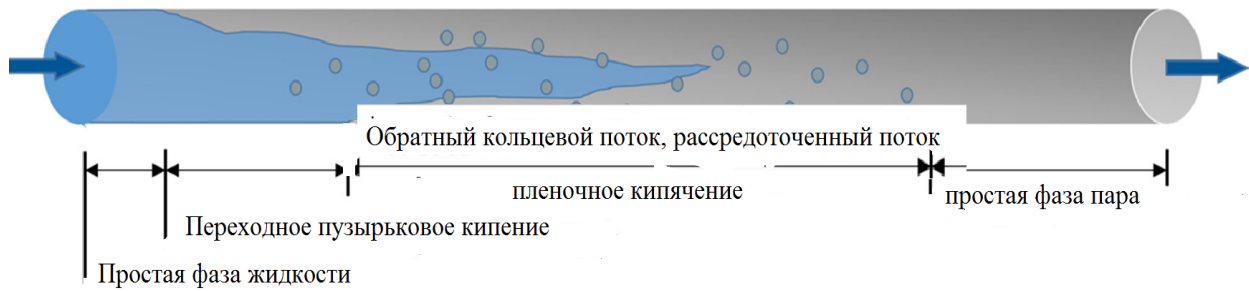


Рис. 1. Типовые схемы течения и режимы теплопередачи в процессе охлаждения криогенной линии.

На рис. 2 показано типичное изменение теплового потока и режима теплопередачи при изменении температуры стенки. Как показано на рис.2, пока стенка охлаждается потоком криогенной жидкости, режимы теплопередачи происходят в следующем порядке: однофазная конвекция газа, пленочное кипение, переходное кипение, пузырьковое кипение и однофазная конвекция жидкости. , что является противоположным порядком на типичной кривой кипения [13]. Параметры, такие как критический тепловой поток (CHF),  $q''_{CHF}$ , температура CHF,  $T_{CHF}$ , минимальный тепловой поток (MHF),  $q''_{MHF}$  и температура MHF,  $T_{MHF}$ , которые являются граничными условиями двух режимов кипения, обычно используются для определения мгновенных режимов кипения.

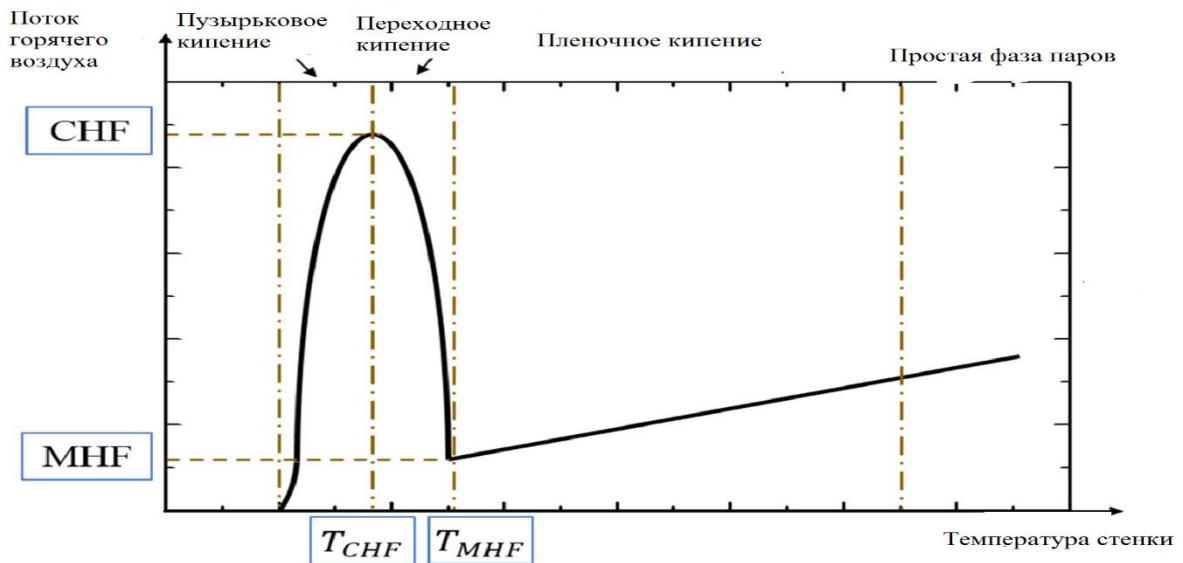


Рис. 2. Изменение теплового потока в зависимости от температуры стенки

Однако некоторые режимы теплопередачи могут отсутствовать из-за состояния трубопровода и свойств жидкости. Например, однофазная газовая конвекция наблюдается в относительно длинной транспортной линии, так как испаренный поток из верхнего потока, который все еще холоднее, чем стенка трубы, медленно охлаждается вниз по передающей линии [14]. Напротив, пленочное кипение часто рассматривается как начало процесса охлаждения на короткой транспортной линии. Жидкий водород ( $LH_2$ ) охлаждение было обнаружено, начиная с переходного режима кипения при условии очень высокого числа Рейнольдса, что вызвано особыми свойствами  $LH_2$  [8,9,12,15].

Таким образом, корреляции не только КТ каждого режима теплопередачи, но и вышеуказанные параметры важны для точного определения режима теплопередачи и прогнозирования процесса охлаждения.

Самая большая проблема в текущем состоянии исследований по охлаждению криогенной линии - это отсутствие универсальных эмпирических корреляций для НТС и параметров для определения режимов теплопередачи. В работе [16] были рассмотрены всесторонне проанализированы существующие корреляции для двухфазного НТС и СНФ. Большинство существующих корреляций НТС и СНФ, которые были получены для жидкостей при комнатной температуре и в установившемся режиме теплопередачи, были обнаружены с переоценкой данных об охлаждении криогенной линии, и они утверждали, что разработка точных корреляций НТС является обязательным условием для прогнозирования переходный процесс теплопередачи. Есть несколько причин, по которым трудно установить универсальные эмпирические корреляции; Во-первых, физические и термические свойства криогенных жидкостей существенно различаются в зависимости от температуры; Во-вторых, на процесс влияет слишком много параметров, таких как давление, массовый расход, направление потока, состояние жидкости на входе и т.д.; В-третьих, по-прежнему существует ограниченное количество опубликованных экспериментальных данных, которые можно использовать для построения эмпирических корреляций [17–19].

## 1.2. Физика жидкости в криогенных условиях

Криогенные жидкости представляют собой уникальный класс жидкостей, которые четко отличаются от воды и хладагентов благодаря их низким температурам насыщения, как показано на рис. 2 (рассчитано с использованием ПО REFPROP [20,21]). Но помимо низких температур насыщения криогенные жидкости также демонстрируют общие тенденции теплофизических свойств, включая (а) низкое поверхностное натяжение,  $\sigma$ , (б) низкую скрытую теплоту испарения,  $h_{fg}$ , (с) низкую вязкость жидкости,  $\mu_f$  и, в меньшей степени, (д) низкая разница плотностей жидкости и пара,  $\rho_f - \rho_g$  (также рассчитанная с использованием REFPROP). Эти тенденции четко отражены в Рис. 3, где значения свойств насыщенной жидкости для обычно используемых криогенных жидкостей нанесены на график в зависимости от пониженного давления в диапазоне от 0 до 1, а разница плотностей нормализована с помощью числа Атвуда  $At$ .

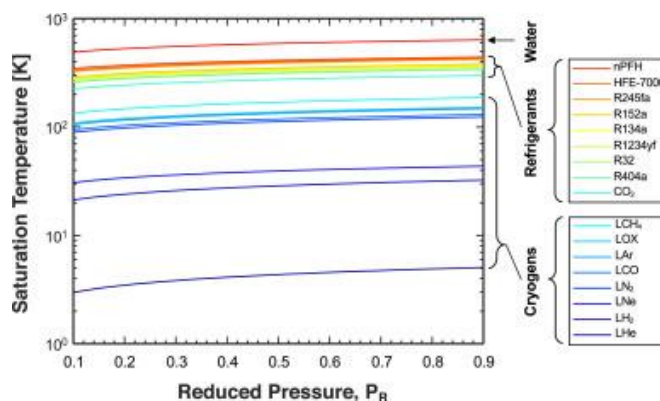


Рис. 3. Классификация охлаждающих жидкостей на воду, хладагенты и криогенные жидкости на основе изменения температуры насыщения при пониженном давлении

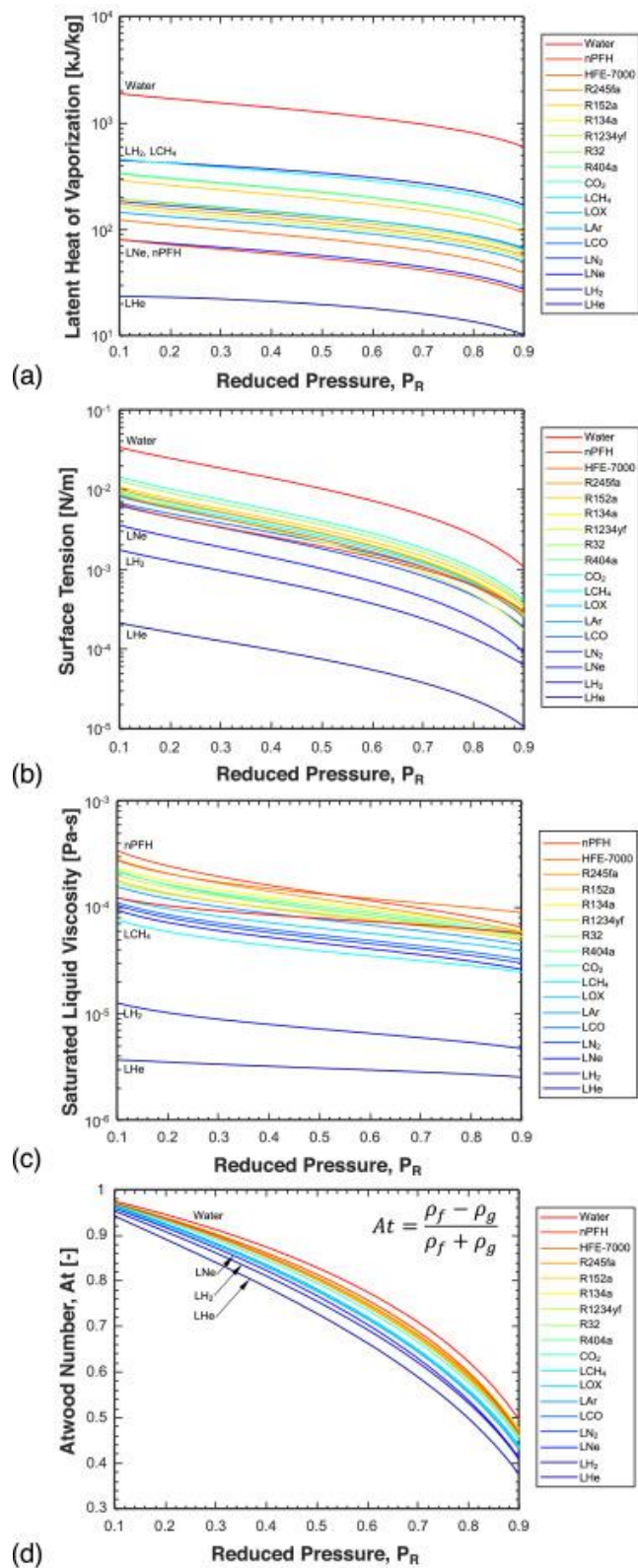


Рис. 4 . Вариации (а) скрытой теплоты парообразования, (б) поверхностного натяжения, (с) вязкости насыщенной жидкости и (д) числа Атвуда при пониженном давлении для криогенов по сравнению с другими классами жидкостей.

Последствия этих тенденций теплофизических свойств отражаются в физике как потока жидкости, так и теплопередачи для криогенных жидкостей. На рисунке 4 показано влияние этих тенденций свойств с точки зрения величин трех безразмерных параметров: (а) число Рейнольдса, основанное на вязкости насыщенной жидкости и диаметре трубки,  $Re_{fo,D}$ , (b) число Вебера, также основанное на плотности насыщенной жидкости и диаметр трубки  $We_{fo,D}$ , и (с) модифицированное число Фруда,  $Fr^*$ . Как показано на рис. 4 (а), очень низкая вязкость приводит к тому, что криогены приобретают гораздо более высокие числа Рейнольдса, особенно для LHe и LH<sub>2</sub>, по сравнению с другими классами жидкостей, что приводит к преимущественно турбулентным потокам криогенного вещества и, следовательно, к усилению принудительной конвекции однофазной жидкости, хотя и за счет более высокого падения давления. Точно так же на рис. 4 (b) показано, как очень низкое поверхностное натяжение приводит к тому, что криогенные жидкости приобретают гораздо более высокие числа Вебера по сравнению с таковыми для воды и хладагентов, что вызывает инициирование пузырькового кипения и критического теплового потока (CHF) при более низких перегревах стенки для криогенных жидкостей. Что касается гравитационных эффектов, на рис. 4 (с) показаны значения модифицированного числа Фруда  $Fr$ , в результате чего поток жидкости и теплопередача для криогенных жидкостей в основном не зависят от ориентации потока относительно силы тяжести Земли; этот вопрос будет рассмотрен далее в следующем разделе. Три важных тенденции, представленные на рис. 4, предполагают, что корреляции для криогенных жидкой лучше всего проводить отдельно от корреляций для других классов флюидов [22].

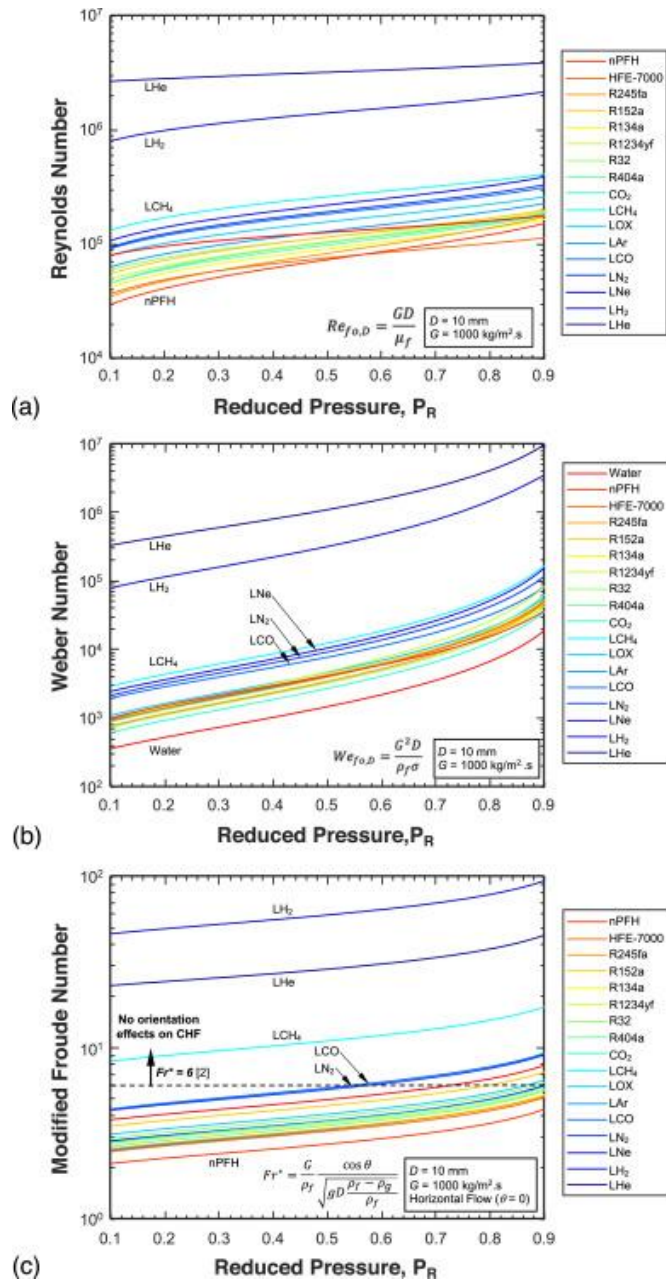


Рис. 5. Вариации (а) числа Рейнольдса, (б) числа Вебера и (с) модифицированного числа Фруда (также критерия Холла и Мудавара для пренебрежения эффектами ориентации) с пониженным давлением для криогенов наряду с другими классами жидкостей для  $D = 10 \text{ мм}$  и  $G = 1000 \text{ кг / м}^2 \cdot \text{с}$ .

Помимо уникальной физики жидкости, криогены создают серьезные проблемы при экспериментальном измерении температуры. Это особенно характерно для значений перегрева стенки,  $T_w - T_{\text{sat}}$ , или разницы температур между стенкой и жидкостью,  $T_w - T_f$ , приближающейся или ниже 0,5 К (что чаще



встречается с криогенами, чем с водой или хладагентами. ). В этих ситуациях число Нуссельта может показывать ошибочные тенденции в виде больших искусственных всплесков или даже нефизических значений ниже нуля. Обоснование этого вывода можно объяснить следующим образом.

Предполагая неопределенность измерения температуры стенки  $dT_w$ , экспериментально определенное число Нуссельта может быть выражено как

$$N_u = \frac{hD}{k_j} = \frac{q}{T_w + dT_w - T_f} \frac{D}{k_f} = \frac{1}{1 + \frac{dT_w}{T_w - T_f}} \frac{q}{T_w - T_f} \frac{D}{k_f}$$

(1)

Следовательно, в ситуациях, когда  $dT_w \gg (T_w - T_f)$ , вычисленное число Нуссельта будет демонстрировать очень высокую погрешность измерения, которая увеличивается с увеличением  $dT_w$  и / или уменьшением  $T_w - T_f$ . Это особенно применимо для таких жидкостей, как LHe, докритические рабочие температуры которых составляют всего 2,17 К (лямбда-температура,  $T_\lambda$ , соответствующая переходу от LHe I к LHe II).

Два важных вывода относительно этих проблем измерения температуры:

- (1) Исследователи всегда должны помнить о возможности высокой неопределенности при использовании криогенных данных.
- (2) Эти высокие погрешности, несомненно, приведут к значительному разбросу при стремлении разработать криогенную корреляцию на основе экспериментальных данных.

### 1.3. Критический тепловой поток при кипении в потоке (CHF)

Критический тепловой поток (CHF), возможно, является наиболее важным параметром конструкции для систем, использующих кипение для охлаждения поверхностей. Это особенно актуально для приложений, связанных с подводом тепла, контролируемым тепловым потоком, где CHF может вызвать быстрое неустойчивое повышение температуры поверхности, часто приводящее к повреждению, перегреву или выгоранию поверхности. Общая стратегия проектирования заключается в установке рабочих условий для достижения пузырькового кипения при поддержании теплового потока в пределах безопасного диапазона ниже CHF. Достижение этой цели требует точного определения CHF всеми возможными способами: теоретическими, эмпирическими или вычислительными.

Понимание межфазного поведения, решение проблемы удаления сильного теплового потока с поверхностей и определение CHF были краеугольными камнями исследований в лаборатории кипения и двухфазного потока Университета Пердью (PU-BTPFL), начиная с середины 1980-х годов [23]. Эти усилия охватывают все возможные схемы двухфазного охлаждения, включая кипение в ванне [24–27], падающую пленку [28–30], кипение в потоке в макроканале [31–33], кипение в потоке в мини/микроканале, соударение струи [34,35] и охлаждение распылением [36,37]. Читателю рекомендуется обратиться к интерпретациям межфазной физики, представленным в этих исследованиях, особенно в отношении определения CHF.

При проточном кипении в трубках обычно встречаются два основных типа CHF: сушка и выход из пузырькового кипения (DNB) [38]. Как показано на рис. 5, высыхание обычно встречается в каналах, где хладагент подается с низким переохлаждением и с низкой массовой скоростью и подвергается воздействию небольшого теплового потока через стенки. Если предположить, что канал достаточно длинный, эти условия приводят к постепенному увеличению паросодержания вдоль канала, включая пузырьковый, пробковый и кольцевой

режимы потока. Здесь CHF связан с возможным высыханием кольцевой пленки жидкости. Из-за комбинации низкого теплового потока стенки и осевой проводимости в стене высыхания является сравнительно мягкой формой CHF. Из-за низкой скрытой теплоты парообразования и низкого поверхностного натяжения область пузырькового кипения криогенов в конечном итоге занимает сравнительно меньшую часть всей нагретой длины по сравнению с водой и хладагентами. По тем же причинам криогены достигают гораздо более высоких выходных качеств.

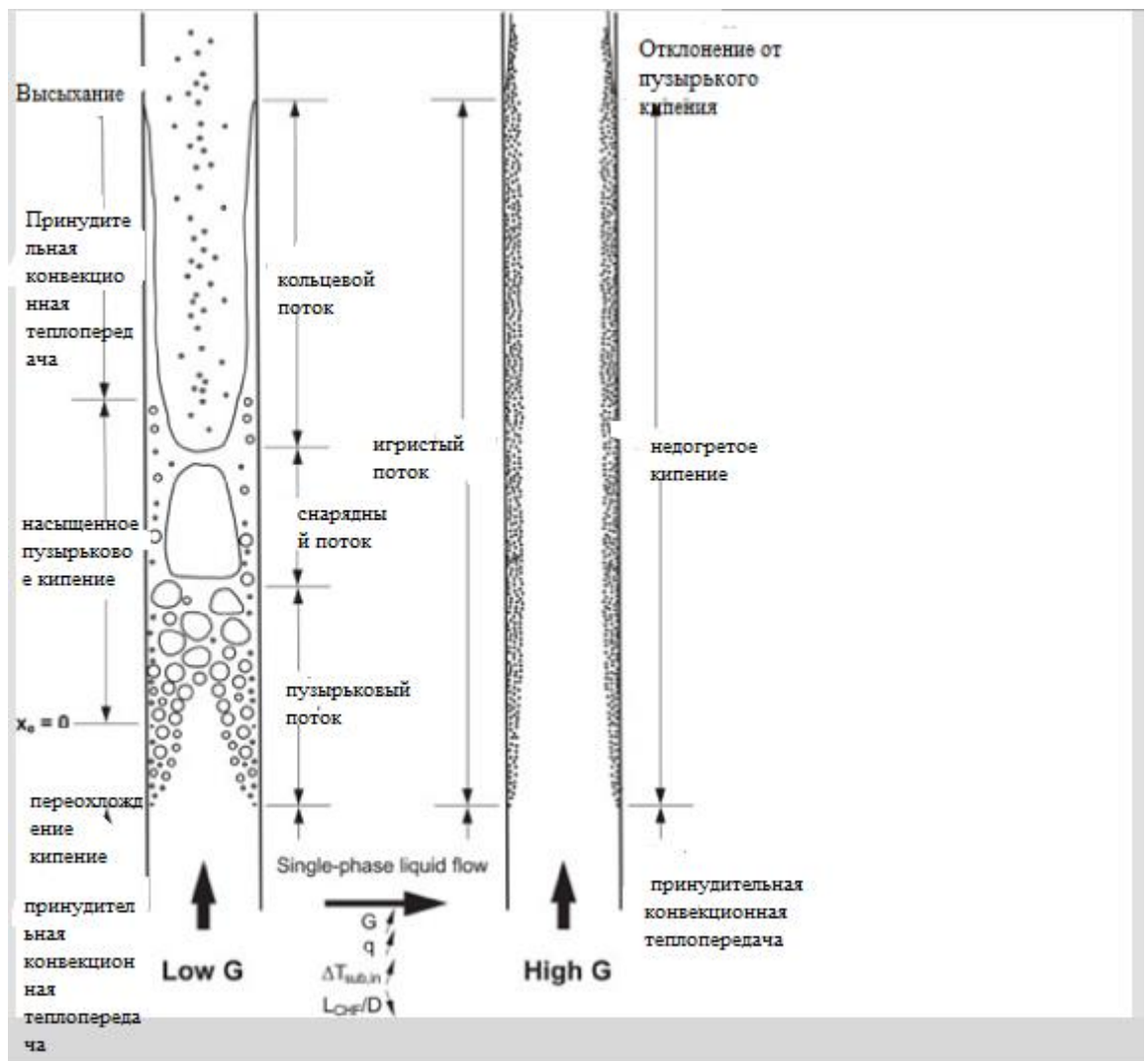


Рис. 6. Модели потока теплопередачи, связанные с условиями потока, ведущими к CHF из-за высыхания и выхода из пузырькового кипения (DNB) в равномерно нагретой трубе. По материалам Mudawar and Bowers [21] .

С другой стороны, DNB, также изображенный на рис., обычно встречается, когда хладагент подается в канал, сильно переохлажденном состоянии и с высокой массовой скоростью и подвергается сильному тепловому потоку через стенки. Здесь пузырьки не могут проникнуть в жидкость из-за сильных эффектов конденсации в активной зоне. CHF запускается вдоль стенки из-за локализованного слияния пузырьков пара в продолговатую паровую подушку даже в осевых местах с обильным потоком жидкости в активной зоне. Паровая оболочка служит для предотвращения доступа жидкости из сердечника к стенке и из-за высокого теплового потока стенок вызывает быстрое нестабильное повышение температуры стенки. Вот почему DNB часто ассоциируется с высокой вероятностью физического повреждения стены отопления по сравнению с высыханием. Однако можно утверждать, что, поскольку криогены, в отличие от других классов жидкостей, рисунок 5 где ясно показано, как CHF в обеих его формах зависит от массовой скорости теплоносителя,  $G$ , переохлаждения на входе,  $\Delta T_{sub}$ , дюйм, диаметра трубы,  $D$ , и длины нагрева,  $L$ , в дополнение, конечно, к теплофизическим свойствам теплоносителя, что в свою очередь диктует рабочее давление,  $P$ . Для корреляции данных по ХСН рекомендованы разные функциональные формы [39]. Первый включает связь швейцарского франка с местными (или торговыми) условиями, в которых встречается швейцарский франк,

$$q_{CHF} = f(D, G, P, h_{CHF})$$

(2)

Другой основан на условиях на входе и осевом положении для возникновения CHF,  $L_{CHF}$ ,

$$q_{CHF} = f(D, L_{CHF}, G, P, h_m)$$

(3)

Тем не менее, третья форма, аналогичная второй, за исключением того, что предполагается, что СНФ возникает на выходе нагретой длины (т. е.  $L_{CHF} = L_H$ ):

$$q_{CHF} = f(D, L_H, G, P, h_{in})$$

(4)

В безразмерной форме уравнения (2) и (3) могут быть записаны соответственно как [39]

$$B_0 = \frac{q_{CHF}}{Gh_{fq}} = f(We_{fo,D}, \frac{P_f}{P_q}, \chi_{e,CHF})$$

(5)

$$B_0 = \frac{q_{CHF}}{Gh_{fq}} = f(We_{fo,D}, \frac{P_f}{P_q}, \chi_{e,in}, \frac{L_{CHF}}{D})$$

(6)

Большинство основополагающих корреляций, описанных в литературе (см. [40]), действительно подчиняются функциональным формам уравнений (5) и (6). При внимательном рассмотрении можно увидеть, что корреляция СНФ обычно зависит от числа Вебера, либо от отношения плотностей, либо от пониженного давления (которое также определяет значения теплофизических свойств для насыщенной жидкости и насыщенного пара), а также от качества на выходе (или переохлаждения на выходе) или от сочетания качества на входе (или переохлаждение на входе) и геометрии трубы.

Поскольку физика потока и механизм СНФ фундаментально различаются для двух типов СНФ, необходимо проводить различие между ними при использовании любых данных для разработки корреляции СНФ. Это понятие будет подробно рассмотрено в следующем разделе.

#### **1.4. Исследование критического теплового потока в криогенных жидкостях**

В настоящее время существует острая потребность в точных средствах прогнозирования двухфазного потока криогенного вещества и теплопередачи в трубах во многих вышеупомянутых космических приложениях. Преобладание двухфазного потока в этих приложениях можно легко объяснить на примере  $\text{LN}_2$ .  $\text{LN}_2$  с низкой температурой кипения, используемый как в качестве топлива, так и в качестве охлаждающей жидкости, хранится в жидком состоянии, но его необходимо передавать в различные системы в газообразной форме. Это означает, что  $\text{LN}_2$  будет кипеть в потоке во время процесса переноса.

Как для воды, так и для хладагентов, основной целью экспериментальных исследований является определение механизма CHF (высыхание по сравнению с DNB), а также получение количественных измерений межфазного поведения в условиях, непосредственно предшествующих возникновению CHF. Помимо измерений теплопередачи, визуализация потока играет жизненно важную роль с точки зрения захвата доминирующих структур потока и четкого отличия CHF типа DNB от высыхания. К сожалению, визуализация потока в криогенных экспериментах крайне ограничена, что делает какое-либо систематическое подтверждение типа CHF весьма неуловимым. Однако существует несколько исключений, когда визуализация потока проводится одновременно с измерениями теплопередачи, чтобы помочь в определении типа CHF.

Важность получения точных инструментов для прогнозирования криогенов очевидна из согласованных усилий Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) (также Национального института стандартов и технологий (NIST)), предусматривающих использование криогенов для различных применений в различных условиях. от докритического до сверхкритического и от кипения в ванне (коэффициент теплопередачи пузырькового кипения и CHF) до кипения в

потоке (двухфазный перепад давления, двухфазный коэффициент теплопередачи и CHF [16,41]).

В целом, класс жидкости очень сильно влияет на величину CHF в условиях кипения в потоке. Для воды измеренные значения CHF варьируются от  $\sim 1$  до более  $200 \text{ МВт/м}^2$  [37]. С другой стороны, CHF для хладагентов, особенно для приложений, связанных с регулированием температуры электронных устройств в таких приложениях, как суперкомпьютеры, силовая электроника гибридных транспортных средств, а также коммерческая и военная Авионика, составляет от  $\sim 1$  до  $10 \text{ МВт/м}^2$  [22]. Однако криогенные жидкости, которые существуют в жидком состоянии при чрезвычайно низких температурах, из-за их слабых теплофизических свойств (как показано ранее на рис. 4), показывают сравнительно более низкие значения CHF. Примеры включают (как будет обсуждено позже в настоящем исследовании)  $\sim 10 \text{ кВт/м}^2$  для LHe  $\sim 100 \text{ кВт/м}^2$  для LN<sub>2</sub>,  $\sim 100 - 1000 \text{ кВт/м}^2$  для LN<sub>2</sub> и  $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$  для LCH<sub>4</sub>. Эти низкие значения CHF ограничивают применение криогенов в уникальном наборе приложений.

Как для воды, так и для хладагентов, основной целью экспериментальных исследований является определение механизма CHF, а также получение количественных измерений межфазного поведения в условиях, непосредственно предшествующих возникновению CHF. Помимо измерений теплопередачи, визуализация потока играет жизненно важную роль с точки зрения захвата доминирующих структур потока и четкого отличия CHF типа DNB от высыхания. К сожалению, визуализация потока в криогенных экспериментах крайне ограничена, что делает какое-либо систематическое подтверждение типа CHF весьма неуловимым. Однако существует несколько исключений, когда визуализация потока проводится одновременно с измерениями теплопередачи, чтобы помочь в определении типа CHF.

Механизм DNB связан с несколькими взаимосвязанными процессами, включая детальную эволюцию двухфазного потока вдоль канала, начальное образование локализованных паровых blankets и, что наиболее важно, гидродинамическую неустойчивость (типа Гельмгольца), определяющую, когда

поверхность раздела паровых blankets переключается. из нестабильного состояния (состояние, позволяющее объемной жидкости контактировать с нагретой стенкой и, следовательно, избегать DNB) в стабильное состояние (состояние, при котором жидкость больше не может получить доступ к нагретой стенке, что приводит к CHF). Однако очевидно, что каждый аспект двухфазного потока, который достигает кульминации в DNB, зависит от теплофизических свойств жидкости, которые фиксируются в соответствующих безразмерных группах. Следовательно, хотя механизм DNB может быть схожим для разных типов флюидов, тенденции и детали DNB совершенно разные. Это особенно актуально для криогенов, поскольку их значения свойств заметно отличаются от свойств других типов жидкостей.

Прогнозирование двухфазного потока и теплопередачи для криогенов может быть достигнуто с использованием экспериментальных корреляций, аналитических моделей и моделей вычислительной гидродинамики (CFD). В то время как исследователи двухфазного потока успешно разработали как аналитические модели [18,42–47], так и модели CFD [18,44,48–50]. Как для кипения потока, так и для конденсации потока (все они относятся к тепловому менеджменту космических систем), эти усилия требовали очень систематической и исчерпывающей проверки с использованием различных методов визуализации потока и измерения потока, которые чрезвычайно ограничены для криогенов, особенно с точки зрения определения типа CFD. Это оставляет экспериментальные корреляции в качестве основного рационального средства для предсказания поведения двухфазного переноса криогенов.



## ГЛАВА II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

Большинство исследований механизма критического теплового потока (CHF) были рассмотрены в многочисленных исследованиях [26,51–53]. Кроме того, была проведена обширная исследовательская работа по моделированию или экспериментальному описанию соответствующих физических процессов, ведущих к кризису кипения [54,55]. Большинство моделей CHF основано на описании ограничивающего процесса, который ограничивает поток к нагретой поверхности во время интенсивного кипения. В работе [55] классифицировали исследования по моделированию CHF на три общие категории: модели разделения пограничного слоя, модели скопления пузырьков и модели высыхания подслоя. Все три типа моделей основаны на условиях, способствующих высыханию поверхности нагрева, но различаются физическим описанием механизма срабатывания CHF.

В работе [56] проанализировали текущее состояние моделирования CHF и выделили ряд областей, на которых следует сосредоточить внимание в будущих экспериментах с CHF, и подчеркнули необходимость новых экспериментов для дальнейшего понимания кризиса кипения и механизмов запуска CHF. В работе было показано, что две основные школы мысли, которые возникли в отношении механизма управления CHF, были основаны на концепции гидродинамической неустойчивости, и основное различие между этими двумя подходами заключается в расположении неустойчивости по отношению к поверхности нагрева. Модель гидродинамической неустойчивости, также называемая «моделью дальнего поля», была первоначально представлена в фундаментальной работе [57]. В этом подходе CHF вызывается неустойчивостью на границе раздела пар-жидкость паровых столбов, возникающих от поверхности нагрева в процессе пузырькового кипения. Здесь возникновение гидродинамической неустойчивости приводит к сбою в процессе отвода пара от поверхности нагрева, что в конечном итоге приводит к полному покрытию паром

поверхности. В с регулируемым тепловым потоком это вызывает резкое повышение температуры поверхности, тогда как в системе с регулируемой температурой это вызывает небольшое снижение теплового потока. В работе [58] утверждал, что из-за самой природы этой модели температура поверхности нагрева не играет роли; CHF является исключительно функцией гидродинамики потока пара в паровых столбах над поверхностью нагрева. В работе [59,60] также сообщили, что на основе модели Зубера на поток пара от поверхности нагрева влияют два основных фактора: образование пара на поверхности нагрева в результате теплового потока и путь или схема выхода пара от нагревающей поверхности. Здесь геометрия поверхности нагрева связана с CHF через ее зону кипения и гидродинамическую картину потока, которую создает данная геометрическая конфигурация.

Модель Зубера (Zuber) была впервые использована для прогнозирования CHF в насыщенном бассейне, кипящем над горизонтальными поверхностями, такими как бесконечная плоская пластина. Затем модель использовалась для оценки CHF в различных ситуациях кипения бассейна в зависимости от соответствующих модификаций, связанных с конфигурацией. Например, в работе [61] дальнейшее развитие модели Zuber и использовали его для прогнозирования CHF по проводам, лента и т.д. В работе [62] рассмотрены исследования, которые обеспечили понимание механизмов, включая модель Зубера, теплопередачи при пузырьковом и переходном кипении в условиях кипения в бассейне и во внешнем потоке. В работе [51,53] представил обширный обзор экспериментальных и теоретических исследований явления CHF при различных геометрических конфигурациях и условиях кипения, включая обзор ряда фундаментальных моделей CHF и переходного кипения, таких как модель Zuber.

Для постановки вычислительного эксперимента по оптимизации технологии универсальной криогенной поверхности (УКП) и выбору оптимальных конструктивных решений для кабины УКР был использован программный продукт COMSOL Multiphysics. Основой вычислительного эксперимента является описание нестационарного процесса переноса тепла от покровного слоя объекта УКП в условиях внешнего естественно конвективного и вынужденного переноса теплоты с помощью метода конечных элементов (FEM).

## **2.1. Теория метода конечных элементов**

Метод конечных элементов (FEM) – это решение задач численным методом, которые могут быть как минимизация функции или описываются уравнениями в частных производных. Заинтересованность представлена как совокупность конечных элементов. У конечных элементов такие же свойства, свойства, которые определяют и уменьшают количество неизвестных. Приближение функции в конечных элементах определяются в терминах ключевых значения указанного физического поля. Непрерывная физическая задача преобразуется в дискретизированную задачу конечных элементов с неизвестными ключевыми значениями. Для линейных алгебраических уравнений задача должна быть решена линейной. С использованием ключевых значений, значения внутри конечных элементов могут быть восстановлены.

Элементы, состоящие из ребер и узлов, которые являются точками перехвата и связями между элементами, являются результатом разделения. Решение дифференциальных уравнений относительно физической задачи может быть решено приближенными функциями, которые удовлетворяют условиям, описываемыми интегральными уравнениями в области задач. Такие приближенные функции являются полиномиальными функциями.

Особенности FEM:

- 1) При использовании простых аппроксимирующих элементов, мы можем достичь любой точности кусочной аппроксимации физических полей на конечных элементах.
- 2) Локальность аппроксимации приводит к системам разреженных уравнений для дискретизированной задачи. Это помогает решить проблемы с очень большим количеством узловых неизвестных.

Благодаря своим преимуществам, кусочная аппроксимация физических полей наиболее используемая форма решения поставленной задачи при решении сложной геометрии

Основные этапы метода конечных элементов описаны ниже.

Программа препроцессора генерирует сетку конечных элементов. Описание сетки состоит из нескольких массивов, основными из которых являются узловые координаты и связности элементов.

Интерполяцию можно определить с помощью узловых значений элемента. В большинстве распространёнными функциями являются линейные, квадратичные и кубические полиномы. Уровень полинома варьируется в зависимости от количества и характера узлов элементов и неизвестных в каждом узле.

Чтобы решить глобальную систему уравнений для всей области решения, нужно объединить уравнения локальных элементов. Связи элементов используются для процесса сборки. Перед решением должны быть введены граничные условия (которые не учитываются в уравнениях элементов). Перед решением системы уравнений необходимо указать граничные условия.

Если задача известна как дифференциальное уравнение, то популярным методом ее постановки является метод Галеркина. Если физическая задача может быть сформулирована как минимизация функционала, то обычно используется вариационная формулировка уравнений конечных элементов.

Сетка является одним из важнейших элементов для точного решения. Для практического анализа модели конечных элементов, могут содержать десятки

тысяч или даже сотни тысяч степеней свободы. Вручную такие сетки невозможно создать. Программным инструментом является генератор сетки, который делит область решения на множество поддоменов - конечных элементов. Генераторы сетки могут быть разных типов. Генераторы блочной сетки требуют некоторой начальной формы грубого разбиения. Область решения разделена на несколько относительно небольшое количество блоков. Стандартную форму должен иметь каждый блок. И сетка внутри каждого блока будут генерироваться техникой отображения. Триангуляторы обычно генерируют нерегулярную сетку внутри произвольных доменов. Для создания сетки используются полигоны. Треугольная сетка, состоящая из четырехугольных элементов, преобразовывается позднее.

Принципом сохранения энергии является уравнения теплопередачи в сплошных средах из первого закона термодинамики. Настоящая часть устанавливает уравнение теплового баланса в его интегральной и локализованной формах, которые служат основой для получения различных уравнений теплопередачи, решаемых в COMSOL Multiphysics.

Интегральная форма.

Первый закон термодинамики гласит, что изменения макроскопической кинетической энергии  $K_\Omega$  и внутренней энергии  $E_\Omega$  области  $\Omega$  вызваны либо механической силой сил, приложенных к системе  $P_{ext}$ , либо обменной скоростью нагрева,  $Q_{exch}$  (уравнение (1)).

$$\frac{dE_\Omega}{dt} + \frac{dK_\Omega}{dt} = P_{ext} + Q_{exch}. \quad (1.11)$$

Для завершения описания системы необходим баланс массы и импульс.

Как для твердых тел, так и для жидкостей, механические законы генерируют следующие уравнение баланса между изменением кинетической энергии  $K_\Omega$ , силой напряжения  $P_{str}$  и силой приложенных сил  $P_{ext}$  (уравнение (1.1))

$$\frac{dE_\Omega}{dt} = P_{str} + P_{ext}. \quad (1.1)$$

Уравнение для величины макроскопического уровня, где изменение кинетической энергии отражает смещение за счет приложенных к нему сил.

Для завершения системы, нужен баланс массы и импульса. Из уравнений (1.1) и (1.2) дает называемое уравнение теплового баланса (1.3):

$$\frac{dE_{\Omega}}{dt} = -P_{str} + Q_{exch}$$

(1.3)

Отвод теплоты с поверхности объекта универсальной криогенной поверхности (УКР) обеспечивается конвекцией движения потока газообразного теплоносителя и описывается посредством уравнения Навье – Стокса (уравнение 1.4-1.6)

$$\frac{\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho u) = 0,$$

(1.4)

$$\rho \frac{u}{dt} + \rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-\rho I + \tau] + F,$$

(1.5)

$$\rho C_p \left( \frac{dT}{dt} + (u \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \frac{dp}{dT} \left( \frac{dp}{dt} + (u \cdot \nabla) p \right) + Q,$$

(1.6)

где  $\rho$  - плотность,  $u$  - вектор скорости,  $p$  - давление,  $\tau$  - тензор вязкого напряжения,  $F$  - вектор объемной силы,  $C_p$  - удельная теплоемкость,  $T$  - абсолютная температура,  $q$  - вектор теплового потока,  $Q$  содержит источники тепла,  $S$  - тензор скорости деформации (уравнение (1.7)):

$$S = \frac{1}{2} ( \nabla u + (\nabla u)^T )$$

(1.7)

Уравнение (1.4) называется уравнением неразрывности или сплошности потока, оно представляет собой алгебраическую запись схожую с сохранением массы. Уравнение (1.5) векторное уравнение, которое представляет сохранение импульса. Уравнение (1.6) описывает сохранение энергии, сформулированное в температуры. Чтобы закрыть систему уравнений, уравнение (1.5) через уравнение (1.6), где  $\tau$  описывается с помощью уравнения (1.8):

$$\tau = 2\mu S - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I, \quad (1.8)$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость, остальные члены уравнения были расшифрованы ранее.

Допущения возможны о том, что на границе газовой среды и объекта УКР нет вязкостного взаимодействия. Математически может сформулировано в виде уравнения 1.9 и 1.10:

$$u \cdot n = 0, \quad (1.9)$$

$$(-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T))n = 0 \quad (1.10)$$

Как видим, выражения (уравнения 1.9 и 1.10) эквивалентны выражениям (уравнения 1.11—1.13):

$$u \cdot n = 0 \quad (1.11)$$

$$K - (K \cdot n)n = 0, \quad (1.12)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)n, \quad (1.13)$$

где  $K$  – множители Лагранжа, нужны для граничного условия. В этих выражениях видно, что нет никакого патока через границу и нет вязкого напряжения в тангенциальном направлении.

Впрочем, для турбулентного потока переменные турбулентности как известно подчиняются однородным условиям Неймана, например, для турбулентной модели  $k$ - $\varepsilon$  (уравнения 1.14 и 1.15):

$$\nabla k \cdot n = 0, \quad (1.14)$$

$$\nabla \varepsilon \cdot n = 0, \quad (1.15)$$

## 2.2. Метод моделирования

Создание универсальной крио поверхности с авто поддержанием заданной температуры в диапазоне от 80 К до 300 К включая компьютерную модель для эффективного производства с учетом всех возможных пожеланий пользователя системы и решения широкого круга задач. Таких как измерение теплопроводности относительным методом, определение вязкости нефтепродуктов, космические исследования и низкотемпературные измерения, производство лекарств, изучение биологических образцов и кристаллизации белковых соединений, производство мороженого и карамели. При разработке будут решены проблемы инновационных технологий обработки материалов при создании теплообменника и подложки, создания эффективного насоса для крио жидкости, а также созданы системы поддержания температур различной точности. Результатом будет система, обладающая компактностью, универсальностью, автономностью.

На развитие научно-технического прогресса влияют различные отрасли. Основными являются машиностроение - строительство зданий, сельское хозяйство, пищевая промышленность, медицинская промышленность и т. д. Развиваются высокими темпами, отвечая высоким требованиям населения, проживающего на нашей планете. Интенсивный рост производства товаров народного потребления и промышленности, в свою очередь, приводит к увеличению потребности в низкотемпературных технологиях. Из огромного числа промышленных предприятий в только немногие могут позволить использование температур ниже 25 0С, это связано не только с дороговизной, но и с отсутствием отечественных разработок и достаточного количества квалифицированного персонала. Но стоит также отметить количество использования криогенных жидкостей значительно увеличилось за последнее десятилетие, производя все больший спрос на развитие криогенных технологий в Казахстане.



Чтобы обеспечить комфортное качество жизни и идти в ногу с преобладающими в обществе изменениями в образе жизни, стало нормой использовать холодильное оборудование для изготовления, поддержания свежести продуктов и продления срока их годности. Холодильное оборудование может сделать жизнь удобной; однако это также значительно увеличивает потребление энергии. Вследствие экологических изменений и повышение экологической осведомленности, экономия энергии для сокращения выбросов стала важным вопросом. Следовательно, крайне важно разрабатывать технологии, которые могут повысить эффективность работы холодильного оборудования. Большинство современного холодильного оборудования состоит из холодильных систем с парокомпрессионным циклом (VCRS). Эксплуатационная эффективность VCRS может быть улучшена многими способами, такими как использование инвертора и регулятора потока хладагента, высокоэффективных хладагентов и смазок, улучшенного охлаждения компонентов и интеллектуальные системы управления, и операционные стратегии. Существующие VCRS с фиксированной частотой необходимо преобразовать в управление с переменной частотой или добавить интеллектуальные системы управления для повышения эффективности, что потребует замены компрессора, измерительного устройства и новых контроллеров. Кроме того, для улучшения характеристик VCRS путем замены высокоэффективных хладагентов или смазок необходимо выполнить обработку системы, оценить объем заполнения и оценить долговечность работы. Вышеупомянутые методы обычно требуют более высоких технических пороговых значений и затрат на установку. Следовательно, усиление эффекта рассеивания тепла охлаждаемыми компонентами является простым подходом, который не требует значительных изменений в оборудовании. Наиболее часто охлаждаемым элементом в ВКРС является конденсатор. Кроме того, компрессор - это компонент, который потребляет больше всего энергии во всей системе VCRS, в системе представленной в этом проекте нет компонентов с большим потреблением энергии и в качестве источника и передачи энергии используется

экологически чистый и возобновляемый источник в виде жидкого азота. Использование холодильных систем с парокомпрессионным циклом ограничивает диапазон температур до 223-300 К. Использование системы данного проекта увеличивает диапазон до 80-300 К без увеличения стоимости оборудования, а в некоторых случаях с большой экономией энергетических затрат в процессе работы.

### ГЛАВА III. СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Поскольку управление струйным охлаждением жидким азотом (LN<sub>2</sub>) играет важную роль при криогенной обработке, особенно для метода охлаждения через инструмент, характеристики поверхностного теплообмена между потоком струи LN<sub>2</sub> и поверхностью заготовки становятся особенно важными. В данной работе была создана экспериментальная платформа с использованием струйного охлаждения. Была введена и модифицирована обратная теория теплопроводности для расчета зависящего от температуры коэффициента теплопередачи поверхности (T-SHTC), который играет важную роль в моделировании механической обработки и термическом анализе резки. Был выяснен механизм охлаждения струи LN<sub>2</sub> соударением, и установлено, что режим пленочного кипения в центральной области соударения LN<sub>2</sub> затруднен, поскольку образовавшаяся пленка газообразного азота будет вымываться каплями струи, что сводит к минимуму эффект Лейденфроста.

Как типичный метод чистой резки, криогенная обработка [63] является эффективным подходом к улучшению производительности резки труднообрабатываемых материалов, таких как титановый сплав алюминиевый сплав [64], закаленная легированная сталь [65], металлический сотовый материал и композитный материал [66]. Из-за преимуществ подавления износа инструмента, повышения эффективности обработки, улучшения качества поверхности заготовки и защиты окружающей среды криогенная обработка широко изучалась учеными в последние десятилетия [67].

Криогенная обработка определяется как метод, при котором заготовка, инструмент или зона резания охлаждаются криогенной средой с температурой ниже -150 °C для выполнения резки, такой как воздух, жидкий азот, жидкий CO<sub>2</sub> или жидкий гелий. Среди них жидкий азот (LN<sub>2</sub>) является наиболее широко используемой криогенной средой из-за его химической инертности, изобилия ресурсов и низкой стоимости. В настоящее время существует четыре группы подходов криогенного охлаждения: предварительное криогенное охлаждение

заготовки, не прямое криогенное охлаждение, криогенная обработка и криогенное струйное охлаждение. Среди них криогенное струйное охлаждение заключается в охлаждении зоны резания непосредственно путем общего затопления или охлаждения кромок режущего инструмента, поверхностей, поверхностей раздела инструмент-стружка и инструмент-заготовка с помощью микрофорсунок. Тепло резания можно быстро отвести и продемонстрировать наилучшие характеристики охлаждения. Кроме того, это может быть самый экономичный метод за счет точного управления потоком струи LN<sub>2</sub>.

Однако управление подачей и впрыском LN<sub>2</sub> действительно затруднено из-за нестабильности жидкого азота при температуре окружающей среды и в атмосферном давлении. Механизм охлаждения с LN<sub>2</sub> при транспортировке внутри трубопровода и в процессе струйного охлаждения сильно отличается от других вариантов выбора хладагента. В процессе струйного охлаждения, когда насыщенный LN<sub>2</sub> контактирует с металлической поверхностью, основным механизмом теплопередачи является смачивание поверхности жидкой фазы и принудительное конвективное кипение [68], а не только принудительная конвекция, как в большинстве других сценариев теплоносителя [69]. Параметры струи, такие как массовый расход, расстояние струи, угол выброса, диаметр сопла и давление на входе, будут влиять на эффективность охлаждения и характеристики резки, такие как температура резки, целостность поверхности заготовки [70] износ инструмента [71], что действительно важно для криогенной обработки. Кроме того, эффективное использование струйного охлаждения LN<sub>2</sub> позволит сэкономить жидкий азот и избежать ненужной термической деформации из-за теплового расширения и сжатия, как и первоначальное намерение метода сквозного охлаждения инструмента [72]. Таким образом, выяснение механизма охлаждения поверхности и исследование факторов влияния на поверхностный теплообмен между жидким азотом и поверхностью металла в процессе криогенной обработки является весьма актуальным. При криогенном охлаждении обеспечение надежного и постоянного потока, который может гарантировать достаточную эффективность охлаждения, является

ключевым аспектом индустриализации криогенной обработки. На эту тему в последние годы было проведено несколько исследований. П. Лекьен и соавт. [73] проанализировали тепловые явления, происходящие на границе раздела струи LN<sub>2</sub>/детали, на основе гибридного метода эксперимента/моделирования и обнаружили, что пропорция жидкой/газовой фазы азота оказывает значительное влияние на теплопередачу. Были исследованы четыре важных параметра: давление LN<sub>2</sub>, диаметр сопла, угол проекции и расстояние проекции, и было обнаружено, что диаметр сопла является первым параметром, влияющим на криогенную эффективность. Была создана математическая модель, связанная с параметрами DoE и коэффициентом конвективной теплопередачи (НТС). Ф. Пусавец и соавт. [74] исследовали влияние фазы азотной жидкости на НТС поверхности при криогенной обработке Inconel 718. Было обнаружено, что достаточный расход охлаждающей жидкости является ключом к достижению действительно устойчивой криогенной обработки. Кроме того, Franci Pušavec et al. [75] сравнили охлаждающую способность LN<sub>2</sub> и жидкого диоксида углерода, используя охлаждение контролируемого источника тепла со встроенным датчиком температуры. Эхсан Тахмасеби и др. изучали поведение LN<sub>2</sub> внутри системы подачи СОЖ и взаимодействие струи СОЖ с зоной резания. Результаты показали, что использование LN<sub>2</sub> с более низким давлением в диапазоне 2–4 бар и повышение качества жидкости в охлаждающей смеси вблизи фрезерной головки может поддерживать надежный и постоянный поток для криогенного охлаждения.

Однако имеющиеся исследования по криогенному охлаждению редко бывают тщательными и совершенными. Например, при обработке с криогенным охлаждением легко может возникнуть явление Лейденфроста, которое приведет к значительному снижению эффективности теплопередачи в зоне резания. Но механизм охлаждения, ориентированный на поверхностный теплообмен LN<sub>2</sub>, не был систематически выяснен, особенно эффект Лейденфроста, на который обращают внимание технические специалисты. Во-вторых, SHTC является важным параметром для численного и теоретического исследования, но,

насколько мне известно, не опубликовано применимое значение SHTC в зависимости от температуры для струйного охлаждения LN<sub>2</sub>. Наконец, влияние параметров струи, о которых заботился технический специалист, неясно или неприменимо. Например, исследовано расстояние струи 50 мм и 100 мм. не охватывают фактический диапазон расстояний струи в таких сценариях, как инструменты для сквозного охлаждения инструмента. А влияние массового расхода, связанного с расходом жидкого азота и затратами на индустриализацию, пока не задействовано.

Хотя исследования, посвященные теплопередаче при струйном охлаждении LN<sub>2</sub>, ограничены, сообщалось о множестве исследований теплопередачи в кипящем бассейне, распылительном охлаждении и струйном охлаждении. На основе полученной температуры была рассчитана температура кипения блока из нержавеющей стали, погруженного в ванну с LN<sub>2</sub>, с помощью теории обратной теплопроводности [76]. Сосредоточьтесь на механизме охлаждения распылением и температурно-зависимом межфазном НТС между горячей заготовкой и жидкой средой в процессе горячей штамповки, Ying et al. [77] провели серию экспериментов и моделирования, и была разработана и применена решающая программа, основанная на обратной теории теплопроводности, названная методом нелинейной оценки Бека. По сравнению с конвекционным теплообменом, струйное охлаждение и аэрозольное охлаждение признаны наиболее многообещающими методами охлаждения в управлении температурным режимом из-за их высокой эффективности переноса. Различия между струйным и распылительным охлаждением были выявлены Эстесом и Мудаваром и др. [78]. Вышеупомянутые исследования предоставили нам достаточный исследовательский идеал и эталон для эксперимента и теории, которые можно эффективно использовать для решения проблемы теплопередачи при криогенной обработке. При криогенной обработке эффективность отвода тепла в зоне резания зависит как от положения струи, так и от эффективности охлаждения одной струи LN<sub>2</sub>, что позже будет подробно исследовано с использованием коэффициента поверхностной теплопередачи (SHTC) в качестве

показателя оценки в этом исследовании [79]. Кроме того, полученное значение SHTC при криогенном охлаждении имеет важное значение для численного анализа резки при криогенном охлаждении и создания модели прогнозирования тепловыделения при резке в области режущей кромки. Различные характеристики охлаждения могут быть достигнуты путем изменения формы сопла, диаметра сопла, массового расхода или скорости жидкого азота, давления впрыска, длины струи, доли жидкого азота, температуры жидкости и т. д. вышеуказанные параметры можно регулировать [80]. Таким образом, в этой статье учитываются только массовый расход LN2, расстояние струи, азотную фазу исследовали на основе собственной экспериментальной платформы. Также был введен и модифицирован нелинейный метод оценки, метод Бека, для расчета SHTC при струйном охлаждении LN2. Кроме того, были уточнены процесс струйного охлаждения и механизм струйно-ударного охлаждения в сочетании с кривой теплопередачи при кипении.

### **3.1. Экспериментальное исследование теплопередачи струйного охлаждения LN2**

Экспериментальным материалом является титановый сплав Ti-6Al-4V (TC4), полученный элементный состав. Пластина TC4 превращается в круглую пластину с радиусом  $R = 50$  мм и толщиной  $t = 8$  мм с помощью электроэрозионной обработки (EDM), как отмечено оранжевым цветом на рис.7 и показано на. Глубокой электроэрозионной обработкой были обработаны три измерительных отверстия в радиальном направлении к центру глубиной 50 мм на 2 мм, 4 мм, 6 мм ниже поверхности соответственно. Три отверстия используются для встраивания термопар OKAZAKI Ni-CrNi типа K (диаметр 0,5 мм, максимальный допуск измерения  $\pm 1,1$  °C) для точного измерения температурного отклика на разных глубинах путем подключения к 8-канальной системе сбора данных YOKOGAWA. MX100. MX100 оснащен запаздывающим

фильтром первого порядка, а частота установлена на 100 Гц, а время отклика измерения составляет всего 1,67 мс.

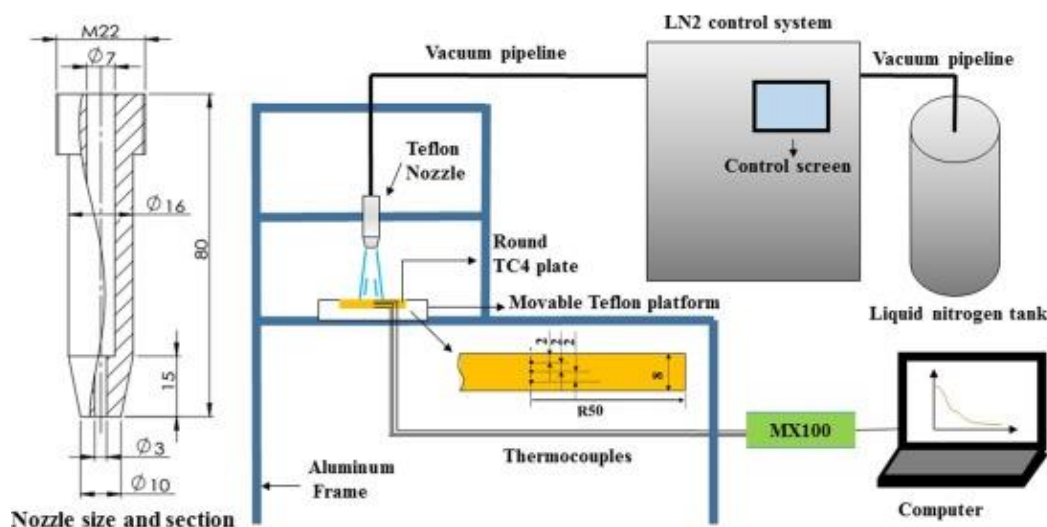


Рис. 7. Принципиальная схема экспериментальной платформы криогенного струйного охлаждения LN2.

Эксперимент по охлаждению струи криогенного LN2 [81] был реализован с использованием экспериментальной платформы, как показано на рис.7. Он состоит из вакуумного бака LN2, системы управления трансмиссией LN2, алюминиевой рамы, тefлонового сопла и подвижной тefлоновой платформы. Алюминиевая рама была разработана для фиксации сопла, поддержки вакуумного трубопровода, обеспечения рельса для подвижной тefлоновой платформы и, наконец, обеспечения потока струи жидкого азота только в центр круглой пластины TC4. Путем регулировки балки, на которой закреплено сопло, можно регулировать расстояние струи между соплом и верхней поверхностью пластины TC4 от 0 до 200 мм. Подвижная тefлоновая платформа с отверстием R51 мм × 8 мм, используемая для размещения и фиксации положения пластины TC4, размещалась на балке и может плавно и быстро перемещаться вдоль балки. И сопло, и платформа были изготовлены из тefлона, чтобы обеспечить теплоизоляцию и уменьшить потери тепла, который был собственной разработки и специально разработан для криогенной обработки LN2. Он может эффективно регулировать массовый расход жидкого азота в диапазоне 15–80 кг/ч.



Процедуру эксперимента можно описать следующим образом. Во-первых, отрегулируйте положение сопла, чтобы гарантировать расстояние струи, убедитесь, что в баке LN2 достаточно жидкого азота, и подключите его к экспериментальной платформе. Отодвиньте подвижную тефлоновую платформу в сторону, откройте систему управления LN2 и отрегулируйте массовый расход до максимального значения, чтобы позволить LN2 выходить и охлаждать систему передачи, включая систему управления и вакуумные трубопроводы, до тех пор, пока струйный поток LN2 не станет стабильным. Во-вторых, отрегулируйте массовый расход LN2 до установленного значения. Как только кривая массового расхода, показанная на контрольном экране, стабилизировалась на заданном значении, тефлоновая платформа с круглой пластиной TC4, удерживаемой внутри, была подтянута к предельной точке под соплом, где струйный поток жидкого азота как раз направляется к центру пластины. Между тем, температура пластины TC4 на трех глубинах 2 мм, 4 мм, 6 мм регистрировались MX100 в режиме реального времени через три термопары, которые встраиваются в центр. Когда измеренная самая низкая температура ниже -155 С, над поверхностью центра пластины TC4 помещали четвертую термопару для определения температуры потока струи LN2 до окончания испытания. После криогенного охлаждения пластина TC4 нагревалась огневой пушкой до начальной температуры до тех пор, пока три температуры не становились стабильными. В данном исследовании расстояние струи варьируется от 8,3 до 100 мм, а величина массового расхода изменяется в пределах 10–55 кг/ч. Для повторяемости каждый эксперимент повторяли 3 раза. четвертая термопара устанавливалась над поверхностью центра пластины ТК4 для определения температуры потока струи жидкого азота до окончания испытаний. После криогенного охлаждения пластина TC4 нагревалась огневой пушкой до начальной температуры до тех пор, пока три температуры не становились стабильными. В данном исследовании расстояние струи варьируется от 8,3 до 100 мм, а величина массового расхода изменяется в пределах 10–55 кг/ч. Для повторяемости каждый эксперимент повторяли 3 раза.

четвертая термопара устанавливалась над поверхностью центра пластины ТК4 для определения температуры потока струи жидкого азота до окончания испытаний. После криогенного охлаждения пластина ТК4 нагревалась огневой пушкой до начальной температуры до тех пор, пока три температуры не становились стабильными. В данном исследовании расстояние струи варьируется от 8,3 до 100 мм, а величина массового расхода изменяется в пределах 10–55 кг/ч. Для повторяемости каждый эксперимент повторяли 3 раза.

### 3.2. Анализ эксперимента

В моей работе будет исследовано и рассчитано SHTC между струйным потоком LN2 и пластиной ТК4 на основе зарегистрированных температур, поэтому эффективность экспериментальной платформы очень важна. Во-первых, алюминиевая рама была установлена для обеспечения высокой точности позиционирования и повторяемости, что также удобно для регулировки расстояния струи. Во-вторых, пластине ТК4 была придана круглая форма, и она была заделана в тефлоновую платформу, чтобы уменьшить ее конвекционную теплопередачу с воздухом, с целью создания приблизительно одномерной модели теплопередачи в предположении игнорирования радиальной теплопроводности. Кроме того, шероховатость поверхности пластины ТК4, которая контактирует с LN2, также была проанализирована следующим образом, чтобы помочь исследовать механизм охлаждения. По сути, теплообмен между струей LN2 и поверхностью ТК4 является своего рода теплообменом при кипении жидкости, для возникновения которого необходимы два необходимых условия: одно — температура перегрева, другое — активный очаг зародышеобразования, особенно при пузырьковом кипении. Когда поверхность смачивается, поверхностное натяжение предотвращает попадание жидкости в эти отверстия, поэтому образуются небольшие паровые или газовые карманы. Как видно на типичная металлическая поверхность сильно увеличена и зачерчена, и большинство операций по обработке металла оставляют на

поверхности крошечные бороздки. Эти маленькие карманы являются местами, в которых происходит зарождение пузырьков.

### 3.3. Конечно-элементное моделирование и анализ

Чтобы опровергнуть рациональность одномерного упрощения в центре круглой пластины ТС4 в этом исследовании, процесс струйного охлаждения LN2 был проанализирован в коммерческом программном обеспечении FLUENT на основе упрощенной одно четвертной трехмерной модели CFD. В этой модели струйный поток упрощен как двухфазный поток смеси жидкого и газообразного азота без учета воздушной фазы, и используется модель VOF (объем жидкости). Чтобы реализовать полную шестигранную сетку, модель строится методом многозонной сетки в ANSYS, основанном на модуле ICEM CFD. Сетка локально уточняется, чтобы избежать больших различий в размере сетки и получить более высокую точность расчета. В процессе интегрирования стандартный  $k-\varepsilon$  используется модель турбулентности, а константы модели описаны. Для пластины ТС4 удельная теплоемкость и теплопроводность определены в зависимости от температуры в диапазоне температур 143,15~1273,15 К, как представлено вместе с теплофизическими параметрами LN2 и N2. Шероховатость поверхности пластины ТС4 установлена равной 5,26 мкм, что соответствует результатам эксперимента. На входе установлена скорость 2,0 м/с, доля LN2 0,9, температура 77,15 К и начальное манометрическое давление 0,3 Мпа. Граничное условие выхода давления принимается с объемной долей обратного потока LN2, равной 0, что указывает на то, что обратный поток LN2 не будет. Жидкая область исправлена с долей LN2 0 и температурой 300 К на начальном этапе анализа.

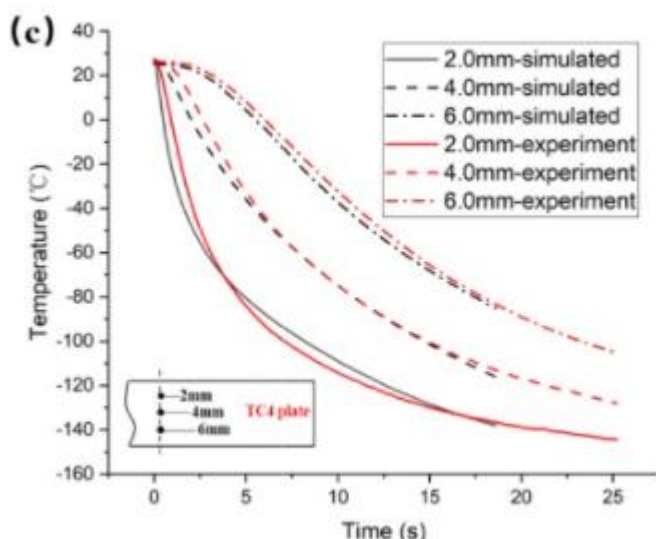
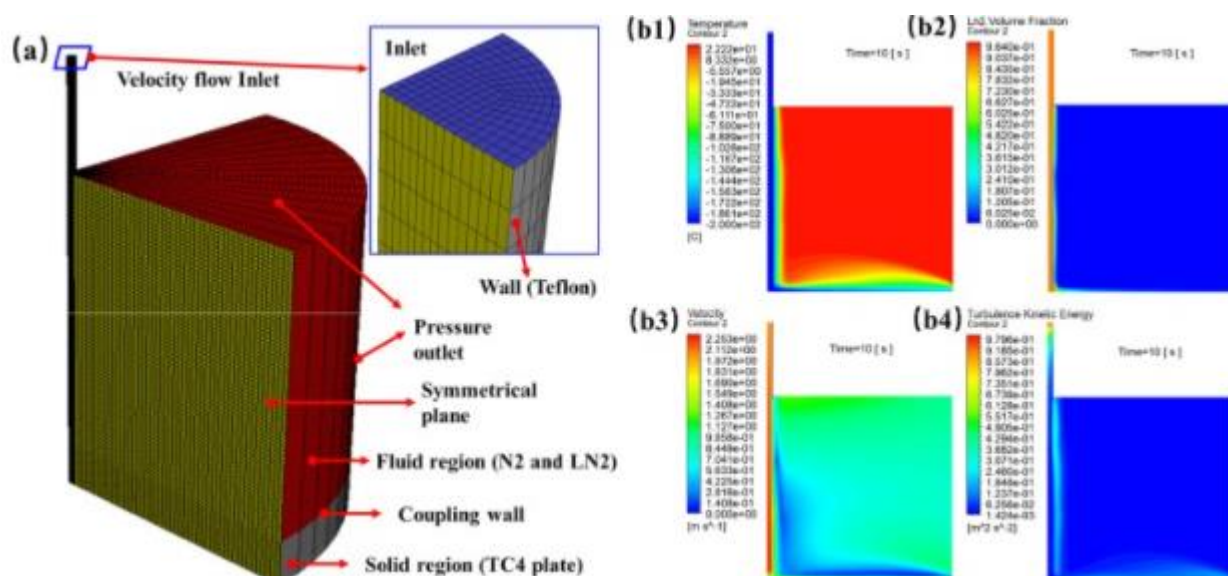


Рис. 8. Анализ двухфазного потока для струйного процесса LN2: (а) CFD-модель поля распыленного потока; (б) Контур результатов моделирования; (с) Сравнение смоделированной и экспериментальной температурной истории трех точек измерения.

Когда криогенный жидкий азот выбрасывается, область жидкости между соплом струи и пластиной TC4 достигнет относительного устойчивого состояния в течение примерно 0,3 с, а контуры температуры, объемной доли жидкого азота, скорости и кинетической энергии турбулентности в области жидкости через 10,0 с  $\pm$  5 (б), которые могут помочь проанализировать механизм струйного охлаждения на поверхности теплообмена. Можно заметить, что

распределение температуры по вертикали достаточно устойчиво, при этом объемная доля жидкого азота значительно уменьшается, скорость струйного течения значительно увеличивается с увеличением расстояния струи. И все контуры показывают, что струйное течение LN2 имеет большую ударную энергию и его охлаждение на поверхности пластины TC4 является своего рода струйным импинджмент-охлаждением. Для проверки конечно-элементной модели температурная история в точке измерения на 2 мм, 4 мм и 6 мм ниже центра поверхности построена и сравнена на рис. 8(a). Можно заметить, что смоделированный профиль температуры хорошо согласуется с результатом эксперимента. Абсолютная средняя погрешность температуры за 18,5 с составляет 0,39 °C, 2,21 °C и 2,96 °C в точках 2 мм, 4 мм и 6 мм соответственно. Это означает, что численное моделирование приемлемо.

### **3.4. Расчет поверхностного коэффициента теплопередачи (КТК)**

Для оценки поверхностного коэффициента теплопередачи (КПТК) между титановым сплавом TC4 и текучей средой в криогенном процессе закачки жидкого азота в этом разделе используется и модифицируется метод Бека. Метод Бека является своего рода обратным методом оптимизации, реализуемым уравнением теплопроводности твердого тела и алгоритмом итерационного процесса расчета. Было доказано, что он имеет высокую точность расчета и самую высокую эффективность расчета среди пяти методов прогнозирования, используемых для расчета, переходного температурно-зависимого НТС в процессе охлаждения распылением. В этом исследовании, поскольку концентрированный поток LN2 выбрасывается вертикально в центр поверхности пластины TC4 и в пластине отсутствует внутренний источник тепла, температурное поле на поверхности центра пластины предполагается однородным. Таким образом, моделирование реализовано в виде чистого теплового анализа на основе упрощенной одномерной модели теплообмена во

всей области решения, и рассчитывается только ТТК в центральной точке поверхности пластины.

На рис.9, а представлены измеренные и рассчитанные температуры пластины ТК4 в зависимости от времени охлаждения при расстоянии струи  $H = 10,0$  мм и массовом расходе жидкости  $Q = 40$  кг/ч. Температуру на поверхности пластины вычисляли обратной зависимостью от измеренных температур в точках ниже поверхности на 2 мм, 4 мм и 6 мм по методу Бека с временным интервалом 0,2 с. Как показано на рис. 9, а, расчетные кривые охлаждения хорошо согласовывались с измеренными, а температурная погрешность не превышала 5 %, что свидетельствует о достаточно хорошей достоверности расчетной модели и метода Бека.

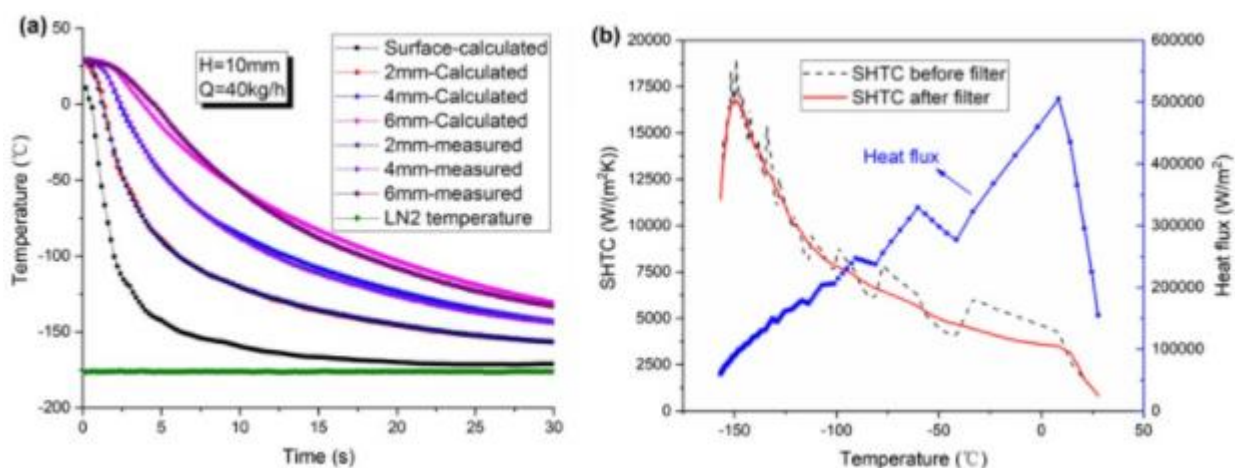


Рис. 9. (а) Измеренная и рассчитанная история температуры в пластине ТК4; (б) Тепловой поток и SHTC в зависимости от температуры.

Расчетная зависимость теплового потока от температуры, измеренная на 2 мм ниже пластины ТК4, представлена на рис. 9.(а) вместе с зависимыми от температуры кривыми SHTC до и после фильтрации. Как тепловой поток, так и значение SHTC не были постоянными в процессе охлаждения. По мере снижения температуры заготовки в точке 2 мм от комнатной температуры до  $-160$  °C тепловой поток сначала увеличивается и достигает своего пикового значения примерно при  $0$  °C, а затем колеблется, уменьшаясь до тех пор, пока, наконец, не прекратится теплообмен. В процессе охлаждения жидкость LN2 будет поглощать тепло как от пластины, так и от окружающего воздуха, но расчетный

тепловой поток здесь представляет собой только ту часть, которая выделяется пластиной ТС4. Таким образом, через поверхность пластины вначале выделяется большой тепловой поток, который постепенно снижается до нуля, когда температура поверхности приближается к температуре струйного течения LN2. Однако из-за того, что SHTC был определен обратной разнице температур, как определено в уравнении. SHTC был относительно небольшим в начале и постепенно увеличивался до максимального значения, когда температура поверхности,  $-171,4$  °C, как показано чуть выше. Тенденция кривой SHTC в зависимости от температуры поверхности пластины хорошо согласовывалась с характером кривой Нукиямы, что будет подробно объяснено в следующем четвертом разделе.

### **3.5. Анализ механизма охлаждения струи LN2**

При обработке с криогенным охлаждением легко возникает явление Лейденфроста, которое приводит к значительному снижению эффективности теплопередачи в зоне резания. Сосредоточившись на этой проблеме, важно выяснить особенности механизма поверхностного теплообмена между LN2 и поверхностью металла в соответствии с теорией теплообмена при кипении и найти способ избежать или уменьшить эффект Лейденфроста. В процессе струйного охлаждения LN2, поскольку температура LN2 была такой низкой, как  $-176$  °C, теплопередача происходила на поверхности пластины ТС4 и представляла собой своего рода теплопередачу пузырькового кипения. Он осуществляется за счет испарения, конвекции с газовой пленкой в пленке LN2 и конвекции с жидким азотом, что представляет собой сложный процесс, изменяющийся в зависимости от температуры поверхности пластины ТС4. В начале, поскольку температура LN2 была намного ниже температуры воздуха и пластины ТС4, LN2 снаружи струйного потока быстро испарялся, как только он выбрасывался, в то время как левый LN2 выбрасывался на пластину ТС4, а также быстро испаряется после поглощения тепла как воздуха, так и пластины ТС4, что

приводит к быстрому охлаждению в центральной области точно под реактивным соплом. Обычно при контакте жидкости с поверхностью, температура которой значительно выше точки ее кипения, она не смачивает горячую поверхность, а лишь образует на ней устойчивую газовую пленку между пленкой жидкости и поверхностью, что называется явлением Лейденфроста а критическая температура называется точкой Лейденфроста.

Впоследствии, когда пластина остывает, теплопередача увеличивается, поскольку более низкая температура поверхности будет производить меньше пузырьков и даст LN2 возможность контактировать с поверхностью, мгновенно испарится и отведет тепло, как представляет собой сегмент BC, что называется переходным режимом кипения. Затем, по мере того, как температура пластины продолжает снижаться, все больше LN2 контактирует с поверхностью периодически и повторно испаряется, тепловой поток резко возрастает по сравнению со стадией пленочного кипения. Как только центры зародышеобразования покрывают все поверхностные карманы на контактной поверхности, средний тепловой поток достигает пикового значения, которое определяется как критический тепловой поток (CHF). И это обычно происходит при перегреве стенки 20–50 °С. В этот момент стадия кипения жидкого азота 2 переходит в режим пузырькового кипения, как представляет собой сегмент CD, где часть поверхностных карманов не будет образовывать пузырьков, а между пластиной и жидкостным азотом существует как пузырьковое кипение, так и однофазная конвекция. Когда температура тарелки становится еще ниже, приближаясь к температуре кипения LN2, происходит только конвекция между тарелкой и жидкостью LN2, называемая однофазным режимом, как и на участке DE.

Однако, в отличие от процесса кипения в бассейне Нукиямы, режим пленочного кипения вряд ли может существовать в этом процессе охлаждения струей жидкого азота со столкновением. На начальном этапе, когда LN2 контактирует с поверхностью пластины TC4, формируются три зоны теплопередачи: зона соударения LN2, зона воздействия LN2 и сухая зона. В



центральной области соударения LN2, если скорость капли LN2 при достаточно большом струйном потоке образовавшаяся пленка газообразного азота будет смыта быстрой и непрерывной струйной каплей, поэтому газовая пленка вряд ли может существовать под жидкой пленкой. Капля LN2 прорывается через газовую пленку и периодически контактирует с поверхностью пластины, преобразуя формат теплопередачи пленочного кипения в переходное кипение. Таким образом, эффективное охлаждение LN2 при криогенной обработке должно включать поток LN2 с высоким соотношением жидкой фазы и обильной скоростью потока, чтобы избежать эффекта Лейденфроста в технике. Согласно нашему эксперименту, массовый расход жидкого азота 15 ~ 55 кг/ч достаточен для того, чтобы смыть газовую пленку, а избыточный поток жидкого азота не может эффективно улучшить эффективность теплопередачи, а только растрчивает ресурсы жидкого азота. И дальнейшая работа может быть сосредоточена на оптимизации наиболее подходящего расхода LN2 на основе численного моделирования, поскольку в настоящее время струйный поток LN2 со слишком низким расходом вряд ли может быть распылен нашим устройством управления собственной разработки.

### **3.6. Влияние азотной фазы**

Из приведенного выше результата видно, что LN2 может довольно быстро отводить тепло с поверхности заготовки. Однако, если жидкий азот превратится в газообразный азот, это серьезно повлияет на интенсивность теплопередачи.

При охлаждении газообразным азотом на поверхности пластины не существует теплопередачи при кипении, а только принудительная тепловая конвекция. Интенсивность охлаждения газообразной фазы азота была как раз на уровне теплоотдачи поверхности принудительного воздушного дутья. Таким образом, подача струйного потока LN2 с высоким содержанием жидкой фазы во время криогенной обработки очень важна.

Криогенная экспериментальная платформа струйного охлаждения LN2 была разработана для исследования эффективности охлаждения и механизма поверхностного теплообмена при криогенной обработке. Кривые T-SHTC в различных ситуациях были получены на основе модифицированного метода Бека, и были экспериментально исследованы влияющие факторы, такие как массовый расход жидкого азота, расстояние между струями и фаза азота. Выводы следующие:

в процессе струйного охлаждения LN2, по мере снижения температуры поверхности, SHTC между LN2 и поверхностью металла сначала увеличивается и достигает максимального значения при пиковой температуре, прежде чем, наконец, снизится до нуля. Таким образом, SHTC можно определить, как функцию температуры;

анализ механизма показал, что импинджмент-охлаждение струи LN2 отличается от процесса кипения в бассейне Нукиямы. В центральной области соударения LN2, если скорость капли LN2 в струйном потоке достаточно велика, образовавшаяся пленка газообразного азота будет смыта, преобразуя формат теплопередачи пленочного кипения в переходное кипение и избегая эффекта Лейденфроста. Согласно эксперименту, массового расхода жидкого азота 15 ~ 55 кг/ч достаточно для смывания газовой пленки;

анализ влияющих факторов показал, что общее значение SHTC и пиковое значение SHTC значительно увеличиваются по мере увеличения массового расхода LN2 и уменьшения расстояния струи. Но SHTC более чувствителен к расстоянию струи по сравнению с расходом на начальном этапе. Тогда SHTC газообразной фазы азота составляет всего 1500 Вт/С м. Это намного ниже, чем у LN2. Поэтому подача обильного количества жидкого азота во время криогенной обработки имеет решающее значение.

### **3.7. Свойства криогенных жидкостей**

Достижения в криогенной области позволяют создавать насосы, основанные на этом принципе, из-за многообещающих средств достижения

высокого уровня вакуума. Эти насосы обычно называют криогенными вакуумными насосами.

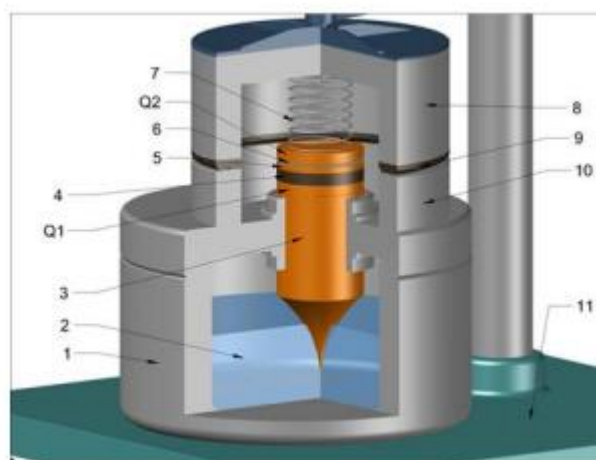


Рисунок 10 - Эскиз измерительной ячейки в разрезе без использования крионасоса.

1 - сосуд Дьюара; 2 - жидкий азот; 3 - теплообменник холодильника; Q1 - нижний криостат; Q2 – верхний криостат; 4 - контрольный образец; 5 - измерительная пластина; 6 - эталон теплопроводности; 7 - прижимная пружина; 8 - крышка измерительной ячейки; 9 - прокладка; 10 — клеточное основание; 11 - платформа.

Немаловажными зарубежными разработками в этой области являются показанные на рисунке 4 криопанели для криогенных вакуумных насосов, но задачи и области применения криопанели совершенно отличны от системы этого проекта. Так как основная задача криопанели — создание вакуума. Какой бы тип насоса вы ни использовали, принцип создания вакуума не меняется. Вакуум создается путем удаления молекулы газа за молекулой из герметично закрытого рабочего объема.

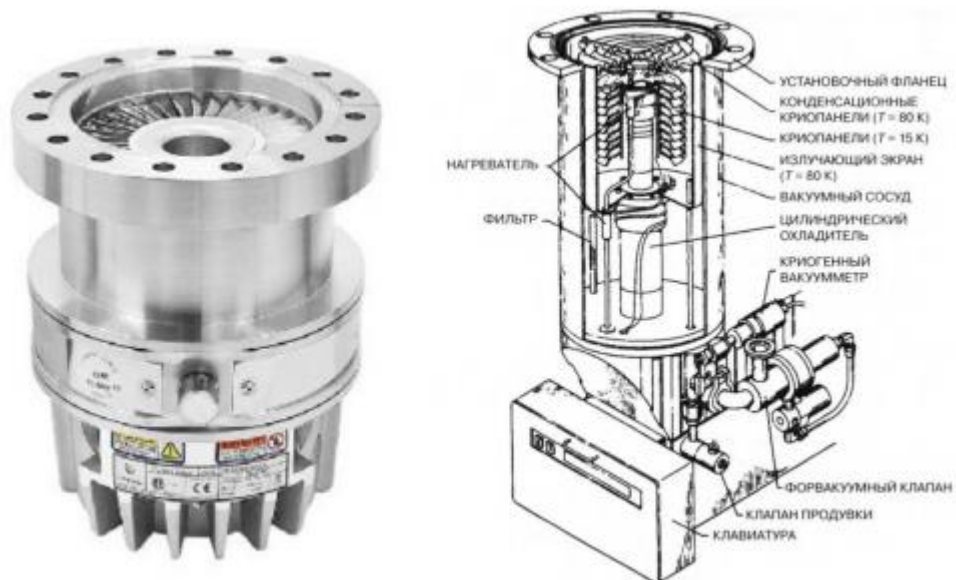


Рисунок 11 – Криопанель в криогенных вакуумных насосах.

Криогенные трубопроводы служат для передачи криогенной жидкости из ожижителя в накопительную емкость, а также из емкости к потребителю. Криогенные трубопроводы снабжаются качественной вакуумной теплоизоляцией, снижающей летучесть жидкости. Необходимое давление создается за счет избыточного давления в баке или насосе.

Для охлаждения специальных встроенных криопанелей до 10К и 80К, на которых фактически осаждаются молекулы газа, в крионасосе используется система охлаждения замкнутого цикла с гелием в качестве рабочего газа. Молекулы перекачиваемого газа, хаотично двигаясь, контактируют с криопанелями и конденсируются или поглощаются на них.

Внешний ряд решеток охлаждается до 80К и используется для конденсации водяного пара, который обычно является основной газовой нагрузкой. Внутренний ряд решеток конденсации охлаждается до температуры 15 К и предназначен для основной части оставшихся газов. Все конденсирующиеся газы переходят в твердое состояние при давлении паров менее 10-12 Торр. Неконденсирующиеся газы, такие как гелий, водород и неон, одновременно адсорбируются слоем инкапсулированного активированного (угольного) угля, охлажденного до 15 К.

Некоторые элементы расчета криогенных вакуумных насосов были изложены в четвертой главе, но сводились они лишь к оценке основных вакуумных характеристик скорости работы крио насоса и вспомогательной вакуумной системы, предельного давления. Анализ графиков приводит к выводу, что универсальной геометрии панелей не существует, так как в зависимости от того, преобладает направленный или диффузный поток в системе с криогенным вакуумным насосом, какой газ конденсируется и каково энергетическое состояние его молекул допустима крио панель с тем или иным углом наклона пластин, которая при заданных конкретных условиях имеет наибольший коэффициент захвата. В практике криогенных лабораторий успешно применяется так называемая вакуумная изоляция. Воздух из металлического корпуса откачивается диффузионным и форвакуумным насосами до остаточного давления 1010 мм рт. Искусство. Практика работы с такой вакуумной изоляцией показывает, что при применении к промышленным аппаратам возникнут большие монтажные и эксплуатационные трудности, в связи с чем применение ее в крупных аппаратах нерационально.

Конденсационные (криогенные) насосы теоретически обеспечивают максимальную скорость откачки газов в диапазоне давлений, превышающих давление пара при рабочей температуре конденсатора. В диапазоне давлений, характерном для вакуумной техники, конденсационный насос, охлаждаемый жидким водородом, не откачивает гелий, водород и неон, при охлаждении жидким гелием не откачивается только гелий. Криогенные конденсационные вакуумные насосы, широко используемые в настоящее время для создания без масляного вакуума, имеют серьезный недостаток: они могут работать только в том случае, если перекачиваемый газ находится в состоянии пересыщенного пара относительно температуры крио поверхности. Поэтому для откачки конденсацией, например, водорода при давлении 10 Па температура крио поверхности должна быть ниже 4 К, а при давлении 10 Па ниже 3,2 К.

В настоящее время вакуумная техника стала основной дисциплиной наряду с механикой, электротехникой и др. Вакуумные технологические методы

широко используются во многих отраслях промышленности и в научных исследованиях. Кислородное, криогенное, компрессорное, холодильное оборудование, для газопламенной обработки металлов, вакуумные и высоковакуумные насосы и агрегаты, комплектные технологические линии, агрегаты.

Низковакуумные насосы работают в диапазоне давлений от 1,03-10 Па (атмосферное давление) до 10 Па. К таким насосам относятся объемные, эжекторные, адсорбционные, криогенные насосы. Недостатки вакуумно-вакуумных систем, состоящих из диффузионных и конденсационных криогенных насосов, заключаются в том, что при 20°К водороду не откачивается (выделение водорода при испытаниях происходит).

В последние годы разработан и создан ряд микрокриогенных систем на основе ГХМ. Некоторые из них могут быть, по мнению авторов, основой для создания криогенных вакуумных насосов. Для снижения давления в вакуумной камере можно использовать два разных принципа. В первом газ физически удаляется из вакуумной камеры и выбрасывается наружу. Примерами такого режима работы являются механические и пароструйные насосы. Другой способ откачки основан на конденсации или захвате молекул газа на некоторой части внутренней поверхности камеры без удаления газа наружу. К этой категории относятся криогенные, крио сублимационные, сублимационные и геттер-ионные насосы.

Особенности измерений высоковакуумными манометрами. Обычно измерения глубины вакуума в области пониженного давления проводят для определения плотности потока молекул, падающих на определенную поверхность внутри вакуумной системы. Интересующим нас объектом может быть тонкая пленка, подложка или какое-либо устройство. Обычно полагают, что давление газа, измеряемое манометром, соответствует условиям, одинаковым для всех точек данной вакуумной камеры. Это предположение, однако, является лишь приближением, так как при очень малых давлениях

поведение газа определяется главным образом взаимодействием молекул газа со стенками камеры, а не между собой.

Следовательно, распределения самих частиц и их скоростей неравномерны и отличаются от максвелловских. Ионизационные манометры характеризуются рядом ограничений в измерении давления газа, и большинство источников ограничений не могут быть устранены. Чтобы уменьшить величину этих эффектов и оценить точность измерений в области низких давлений, необходимо понять механизмы, ответственные за эти эффекты. Проблема неоднородного распределения газа в вакуумных системах рассматривалась Муром. Он перечислил причины, которые могут привести к изменению плотности газа. Причиной могут быть насосы, работающие как ловушки и как источники направленного распределения газовых частиц. Эффект может быть связан с неупругим отражением падающих на стенку молекул, поверхностной миграцией адсорбированных газов, изменением скоростей адсорбции и десорбции на определенных участках внутренних стенок.

Изменение плотности газа может быть вызвано разницей температур элементов системы. Хотя и делались попытки аналитически описать реальное распределение газа, однако они проводились для систем с простейшей геометрией. Экспериментальные исследования в этом направлении проводились Холландом, который рассматривал полное давление газа как сумму максвелловской и направленной составляющих. Он установил ионизационную манометрическую трубку так, чтобы ее входная трубка могла вращаться, и наблюдал значительные перепады давления при различных ориентациях манометрической трубки. Так как устранить все источники неравномерного распределения давления газа невозможно, то при установке ионизационной лампы в вакуумной системе необходимо учитывать хотя бы наиболее важные из них.

Если манометр направлен на насос, криогенную панель или активно дегазирующую поверхность, такую как нагретый элемент, он, скорее всего, покажет давление, соответствующее либо более низкой, либо более высокой

плотности частиц по сравнению с окружающей атмосферой. подложка. Для получения более близкого к реальному значения давления необходимо направить соединительную трубку манометрического датчика в противоположную сторону или вбок, чтобы эффекты направленности потоков были близки к тем, которые возникают у подложки. Опасность неверных показаний давления выше в системах с мощными насосами из-за высокой скорости десорбции. В этих условиях можно ожидать преобладания направленной составляющей давления, которую вряд ли можно правильно измерить манометром.

Особое внимание при проектировании крио насосов следует также уделить решению ряда крио технических вопросов, а именно обеспечению минимальной тепловой нагрузки на холодные элементы насосов при обеспечении требуемой скорости откачки, так как от этого во многом зависит их эффективность. В криогенных устройствах очень важно учитывать температурные деформации и обеспечивать герметичность соединений. Также важен выбор способа охлаждения криососа, от которого в основном зависит производительность насоса.

Основными составными частями криостата являются вакуумная рубашка, экран с торическим резервуаром для криогенной жидкости, латунная крышка с газонепроницаемым уплотнением и расположенная под крышкой камера для криогенной жидкости. Вакуумная рубашка рассчитана на создание вакуума 1·10 мм рт.ст. Это достигается последовательной откачкой форвакуумными и диффузионными насосами и более глубоким вакуумированием за счет сорбции остаточных газов углем или другими адсорбентами. Вакуумная рубашка состоит из трех медных коаксиальных сосудов. Медные обечайки / и 7 с припаянным сверху плоским стальным кольцом 3 образуют вакуумную полостную оболочку 4 - экран, расположенный внутри вакуумной оболочки. Экран служит для защиты термостатируемой системы (криостатной ванны) от внешних притоков тепла. Для крепления экрана и подачи криогенной жидкости к нему припаяны



трубки, проходящие через стальное кольцо крышки. К верхней части кожуха экрана крепится тороидальный контейнер для криогенной жидкости.

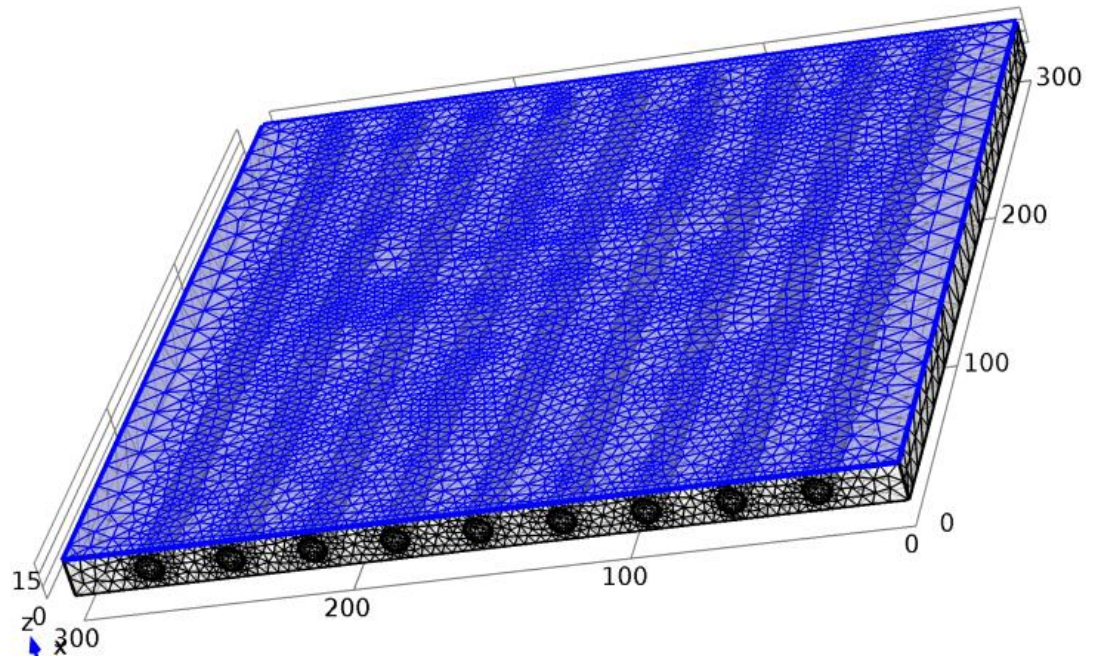
Площадь экрана должна быть сведена к минимуму, поскольку они уменьшают вероятность короткого замыкания. Расстояние между испарителем и поверхностью осаждения следует выбирать как можно большим, чтобы избежать радиационного перегрева наносимых геттерных пленок. Насосы всегда работают в циклическом тепловом режиме тренировочный нагрев - охлаждение (часто до криогенных температур) - лучистый нагрев при включении испарителя, амплитуда скачков температуры достигает 600 К., следовательно, длина свариваемых центров - потенциально наиболее вероятная источники утечек при термоциклических нагрузках - должны быть сведены к минимуму.

По той же причине следует избегать конструкций с панелями большой площади, встроенными в вакуумную камеру, охлаждаемую жидким азотом. В таких конструкциях сварные швы имеют большую протяженность, нарушение их герметичности в теплоизоляционных полостях, т. е. в элементах чисто технологического назначения, вызывает аварийную ситуацию для вакуумной системы в целом. Эта опасность устраняется, если вакуумируемая камера сверхвысокого вакуума и теплоизолирующие полости герметически разделены.

### **3.8. Результаты моделирования крио поверхности**

Количество элементов варьировалось, в зависимости от геометрии модели, однако в среднем составляло около 30 500 конечных элементов, где количество вершинных элементов было 20 000, количество граничных элементов было около 10000, а минимальный размер элемента, на который разбивается зона УКП составлял 0,012 мм. Сетка формировалась автоматически благодаря возможности настройки сетки, контролируемой физикой. В случае более сложной конфигурации можно использовать пользовательские настройки сетки. Фрагмент трехмерной модели, разделенный на конечные элементы, показан на рис. 3а-б.

а



б

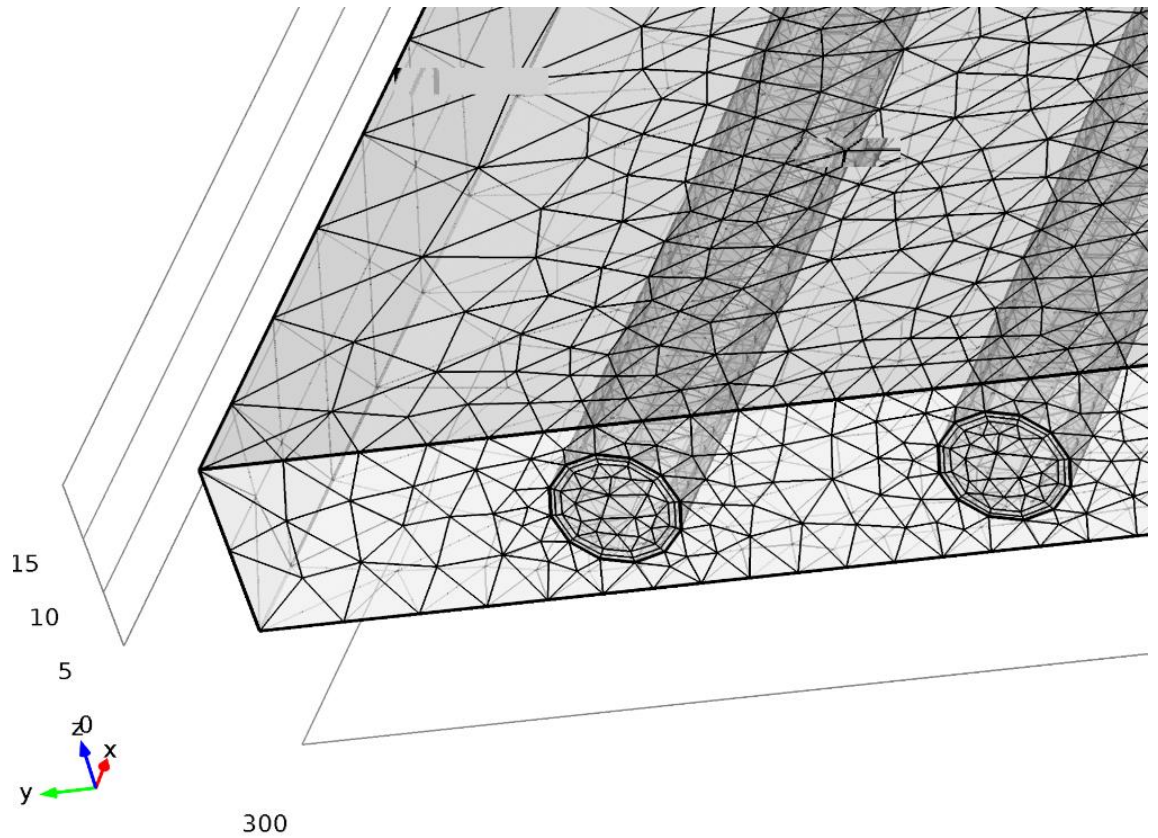


Рисунок 12. Схематичное изображение модели криповерхности. а) общий вид сетки модели, б) увеличенный вид фрагмента сетки

## Разработка рабочего чертежа

Компьютерная модель теплофизических процессов в модели УКП была реализована с использованием метода конечных элементов. Схематичная модель показана на рис. 13.

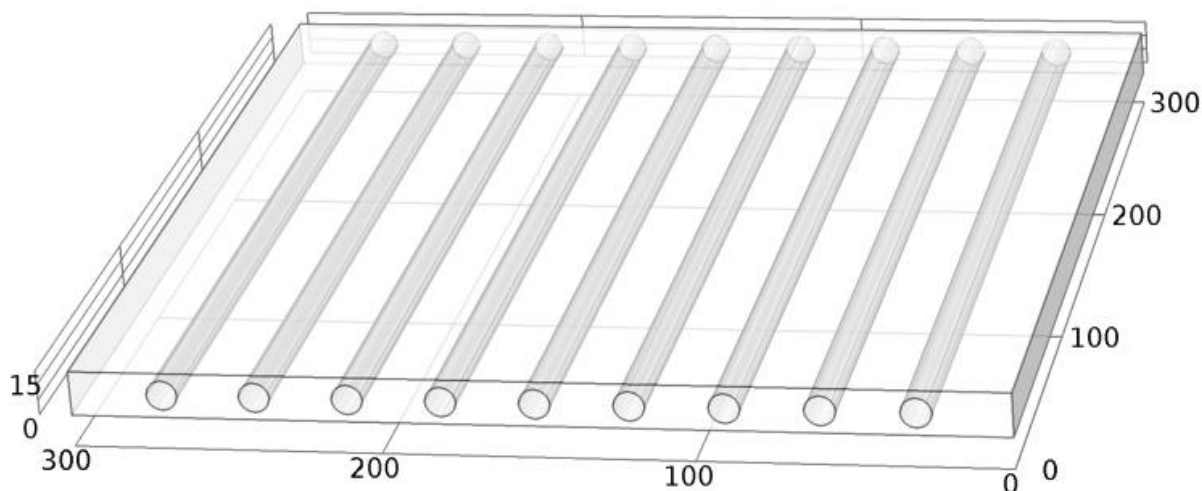


Рисунок 13. Общий вид модели УКП

Геометрические размеры компьютерной модели УКП равнялись 300x300x15 мм. Где были сделаны отверстия диаметром 3/5/7 мм с шагом 30 мм от центров отверстий.

### 3.9. Материалы, используемые в численном анализе

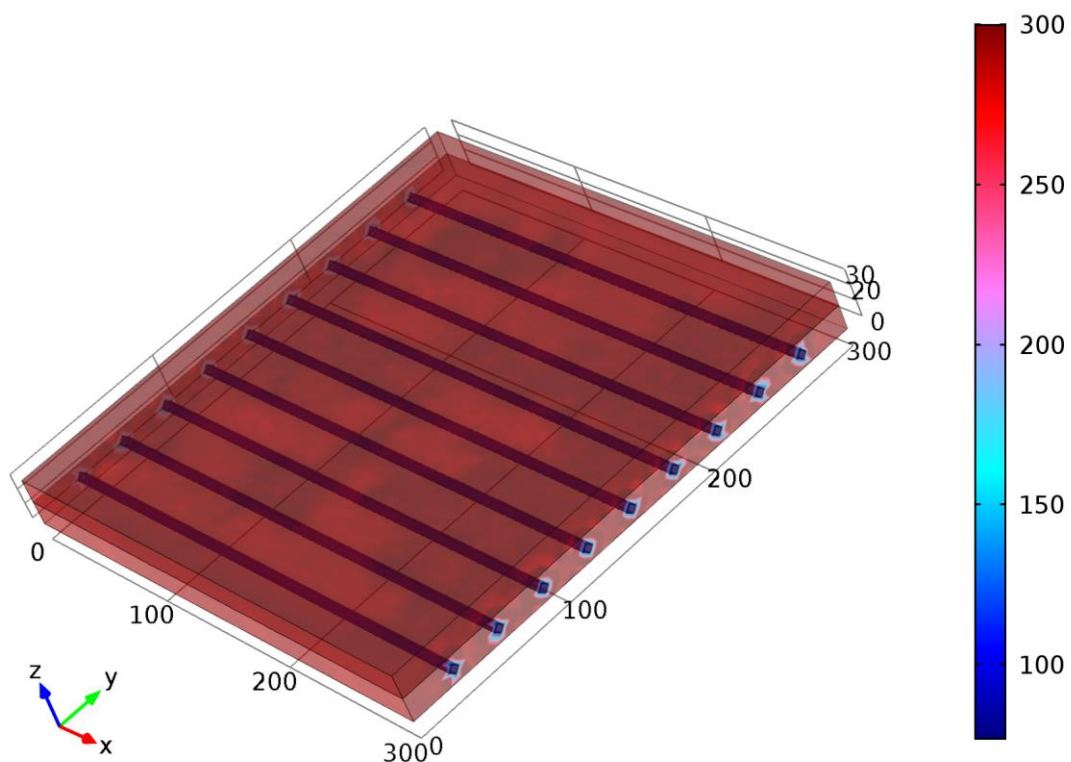
Все свойства материалов были взяты изотропными в расчетах этой модели. Данные по теплопроводности и теплоемкости, использованные в модели, представлены в виде зависимости от температуры. Были использованы материалы, сталь, азот, воздух.

### 3.10. Результаты моделирования УКП

На рис. 14 показаны распределение температуры в 3-Д модели УКП. На рисунке можем наблюдать интенсивное охлаждение крио поверхности от времени. К 30 - ой секунде видим, что 90% поверхности модели УКП, температура приближается к 100 K.

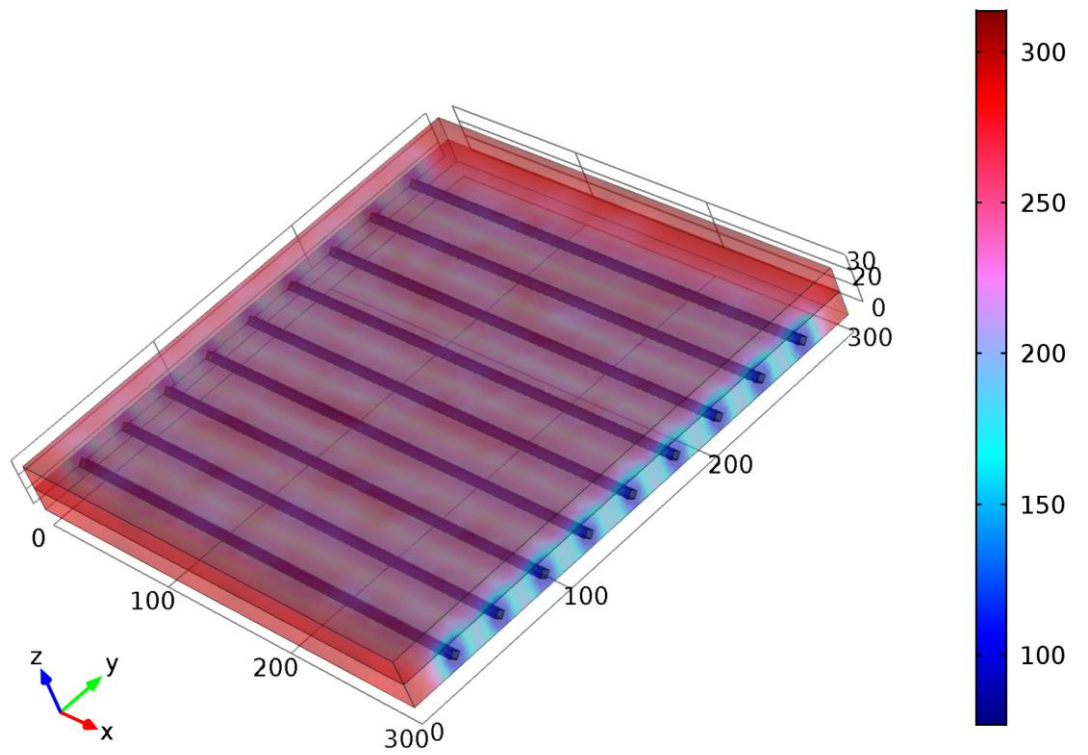
а

Time=0 s Surface: Temperature (K)



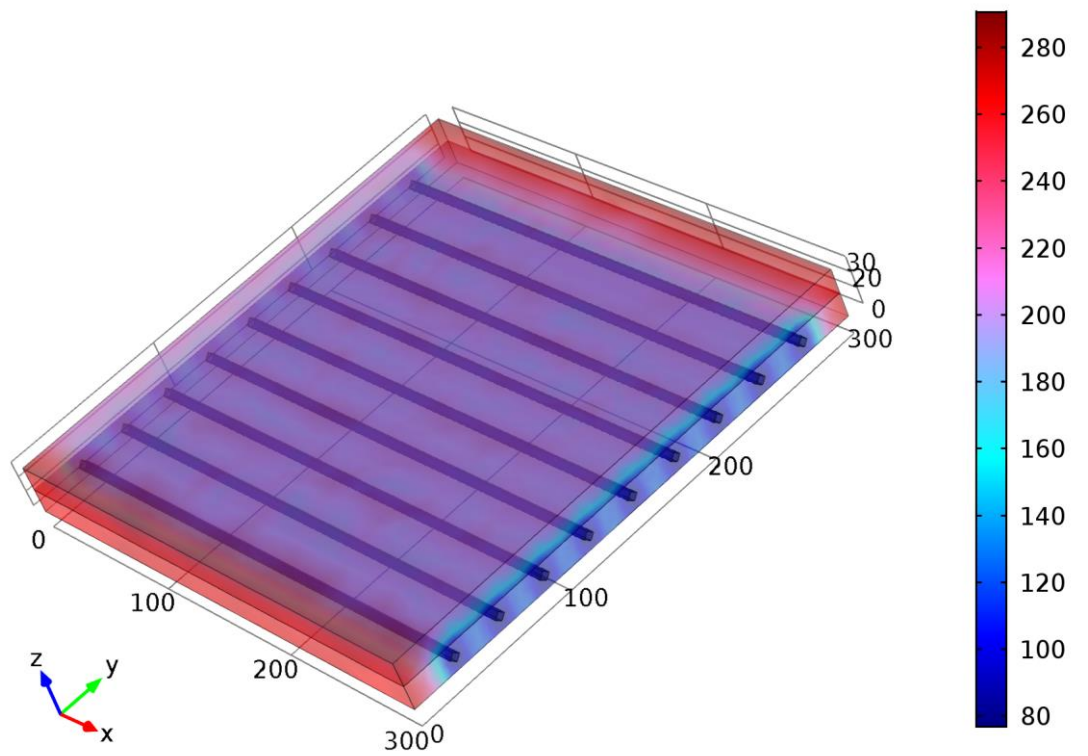
6

Time=5 s Surface: Temperature (K)



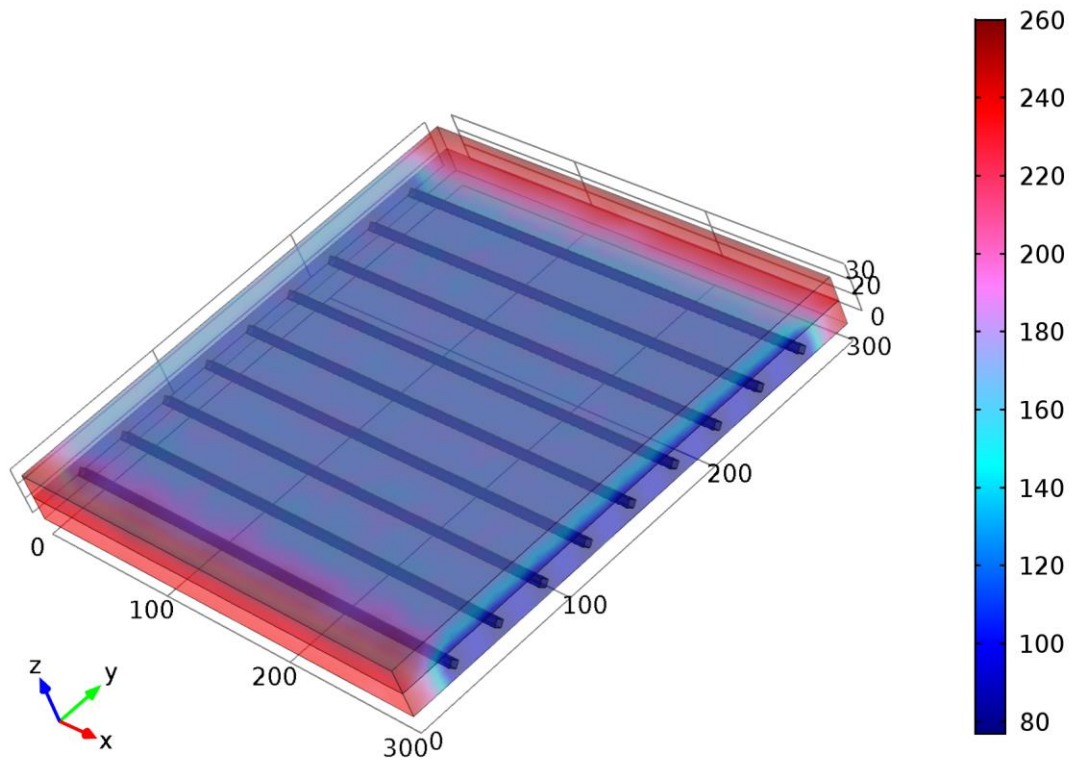
B

Time=10 s Surface: Temperature (K)



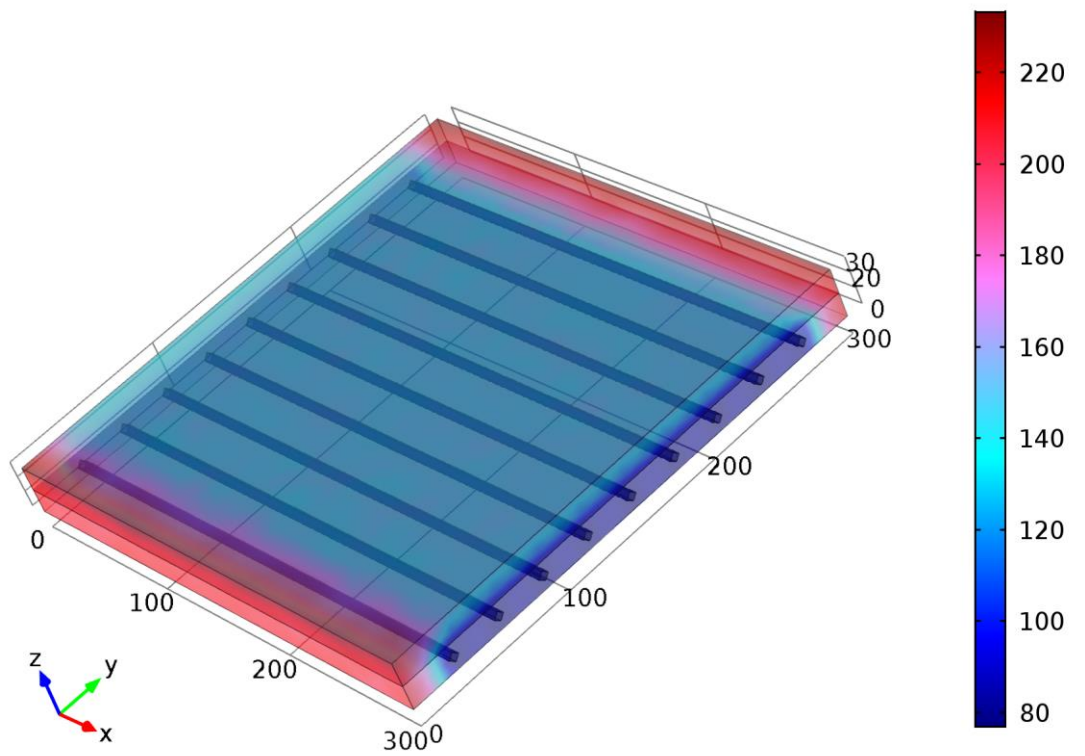
Г

Time=15 s Surface: Temperature (K)



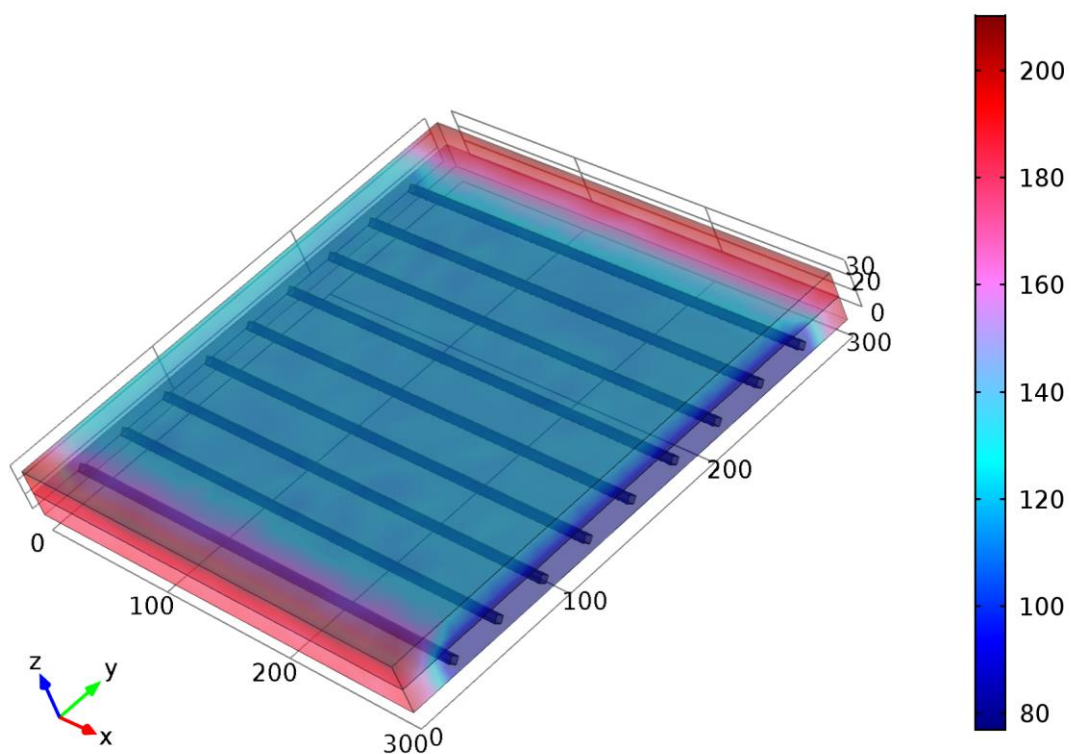
Д

Time=20 s Surface: Temperature (K)



е

Time=25 s Surface: Temperature (K)



ж

Time=30 s Surface: Temperature (K)

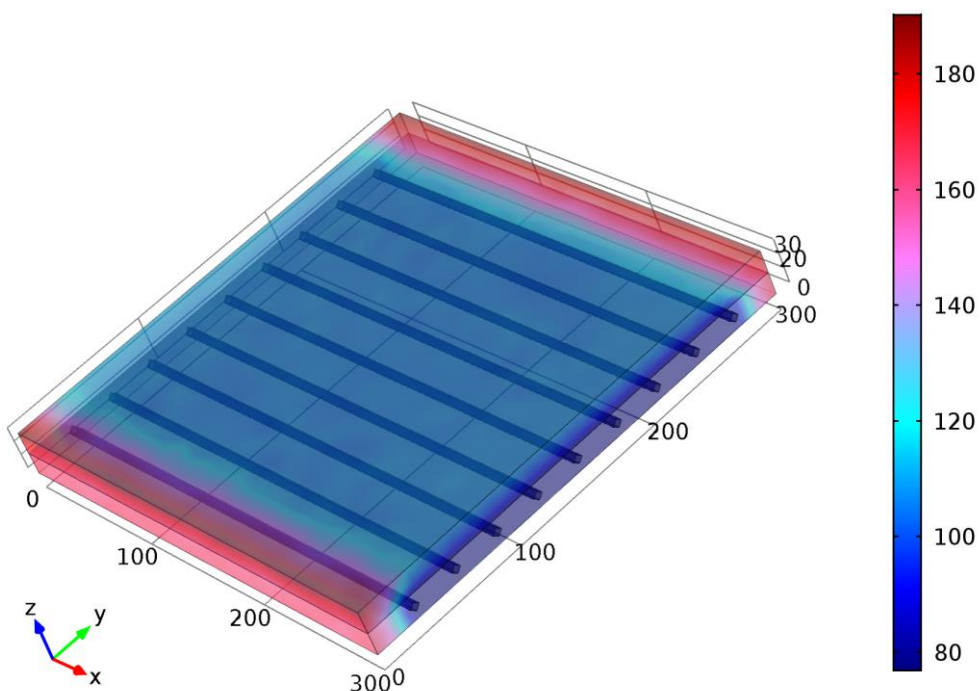
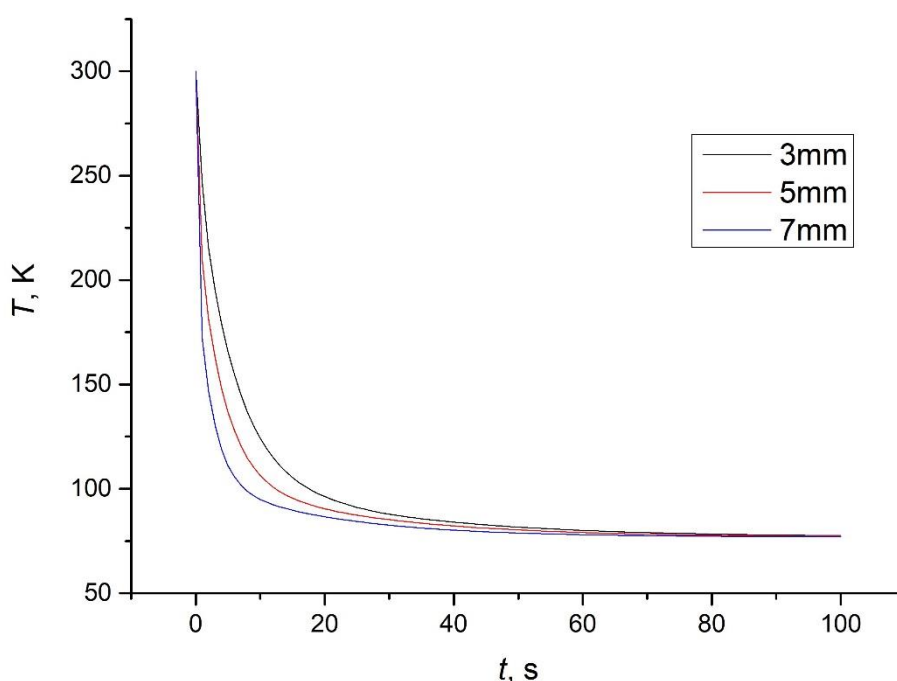


Рисунок 14. Распределение температуры в УКП по времени. а – 0 с., б – 5 с., в – 10 с., г – 15 с., д – 20 с., е- 25 с., ж – 30 с.

Рисунок 14. График распределения средней температуры по площади поверхности УКП по времени. Можем заметить, что интенсивность охлаждения имеет прямую зависимость от диаметра трубки по которой течет жидкий азот. Однако, к 40 – ой секунде средняя температура по всей площади поверхности УКП, приближается температуре жидкого азота в независимости от диаметра теплообменной трубки.



На рис.15 видим график распределения средней температуры по площади поверхности модели УКП

На рис.15 представлен график распределения максимальной температуры по всей площади поверхности модели УКП. Можем заметить, что при рассмотрении максимальной температуры по всей площади поверхности, наблюдается явное влияние размера диаметра теплообменной трубки. Более



интенсивное охлаждения площади поверхности УКП наблюдается при диаметре теплообменной трубки в 7 мм.

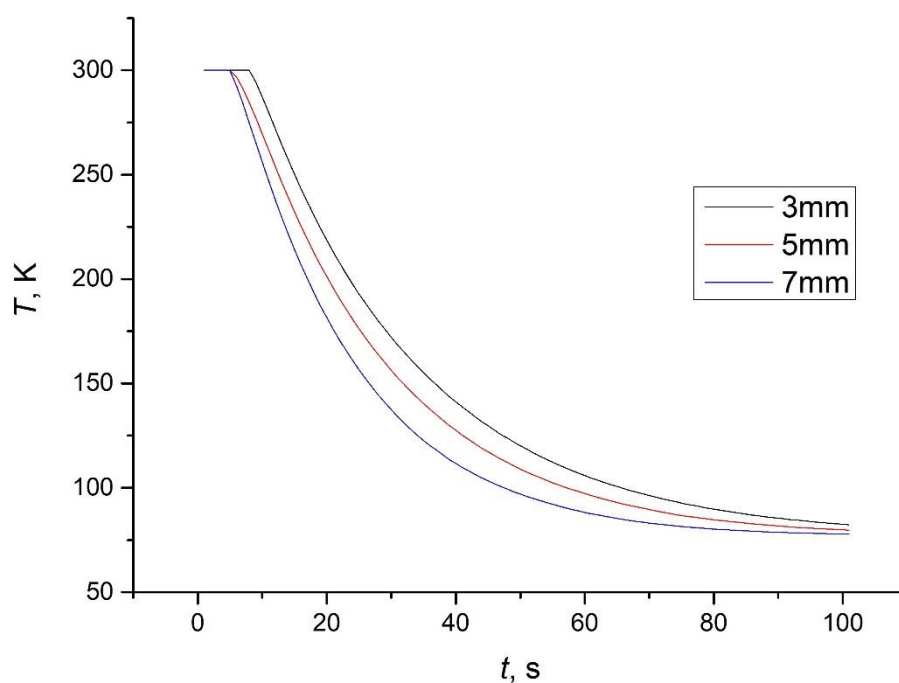


Рисунок 16. График распределения максимальной температуры по площади поверхности УКП по времени.

## **ГЛАВА IV. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Ценность современных научных исследований на данный момент определяется не только масштабом полученных результатов, смысл которых может найти применение после длительного времени, но и применимостью в масштабах промышленности. В результате этого вопрос коммерческой ценности становится одним из основных. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно - технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- организовать работы по научному исследованию;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- рассчитать бюджет проводимого научно-технического исследования;
- произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

### **4.1. Предпроектный анализ**

#### **4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

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

Потенциальными потребителями данного исследования являются:

- Научно исследовательские группы (при измерении теплопроводности относительным методом, определение вязкости нефтепродуктов, космические исследования и низкотемпературные измерения);
- Медицинские организации (производство лекарств, изучение биологических образцов и кристаллизации белковых соединений), в промышленности (производство мороженого и карамели) и для ремонта дисплеев.

Сегментировать рынок, заинтересованных в исследованиях в области покрытий представлено в таблице

Таблица 4 Карта сегментирования рынка услуг по нанесению покрытий.

	Измерительные приборы	Ремонт дисплеев
Медицинские центры		
Научные центры		

#### **4.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Полуэмпирические методы исследования обрели большую популярность в связи с высокой точностью получаемых результатов. Полуэмпирические методы более 50 лет являются основным источником знаний, получаемых в молекулярной спектроскопии. Но для получения информации необходимо затратить большое количество времени для интерпретации спектров. С другой стороны, с каждым годом все сильнее развиваются теоретические способы получения информации, например, *ab initio* методы. Сейчас они могут достаточно хорошо определить положение линий для 2-х атомных молекул или симметричных волчков, но для молекул с большим числом атомов точность результатов уступает экспериментальным на несколько порядков. И также необходимы вычислительные машины высокой мощности для обработки большого количества данных.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку

сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В данном научном исследовании создается метод анализа молекул типа асимметричного волчка в несинглетных электронных состояниях. Метод является полуэмперическим, что позволяет значительно повысить точность результатов, по сравнению с теоретическими методами.

С помощью теоретических расчетов (например, используя *ab initio* методы) можно определить параметры потенциальной функции, однако для молекул с тремя и более атомами точность таких расчетов уступает экспериментальным на 4-5 порядков. В дополнение, подобные расчеты требуют больших объемов вычислительной мощности, для проведения расчетов параметров высших порядков. На данный момент необходимые мощности труднодостижимы.

В таблице 5 приведена оценка конкурентов, где Ф – разрабатываемый проект, к1 – исследование, проведенное с применением *ab initio* методов, к2 – исследование, проведенное организацией, которая занимается исследованием атмосферы.

Таблица 5 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Удобство в эксплуатации	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
2. Точность получаемых результатов	0,3	5	2	4	1,5	0,6	1,2
3. Энергоэкономичность	0,05	5	2	5	0,25	0,1	0,25
4. Надежность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
5. Простота получения информации	0,05	3	4	2	0,15	0,2	0,1
6. Безопасность	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3

2. Цена	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
3. Время	0,05	3	5	3	0,15	0,25	0,15
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>34</b>	<b>4,5</b>	<b>2,5</b>	<b>3,75</b>

### 4.1.3. SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно - исследовательского проекта (таблица 6). Применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ проводится в 3 этапа.

*Первый этап* заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 6 – Матрица SWOT-анализа

<p><b>Сильные стороны</b></p> <p>С1. Наличие бюджетного финансирования</p> <p>С2. Актуальность тематики</p> <p>С3. Использование современных программ</p> <p>С4. Использование собственной разработки программного обеспечения</p> <p>С5. Оригинальность решения поставленной задачи</p> <p>С6. Наличие всех материалов для исследования</p>	<p><b>Слабые стороны</b></p> <p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки</p> <p>Сл2. Отсутствие потенциальных потребителей</p> <p>Сл3. Программное обеспечение с закрытым исходным кодом</p> <p>Сл4. Большая трудоёмкость работы</p> <p>Сл5. Долгое ожидание результатов эксперимента</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на результаты исследования</p> <p>В3. Возможность появления новых методов анализа</p> <p>В4. Расширение лаборатории</p> <p>В5. Возможность улучшения программного обеспечения</p>	<p><b>Угрозы</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на результаты исследования</p> <p>У2. Развитая конкуренция других научных центров</p> <p>У3. Задержки финансирования</p> <p>У4. Ограничение точности эксперимента</p> <p>У5. Повышение издержек</p>

*Второй этап* состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 7. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных

сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 7 Матрица SWOT-анализа

		Сильные стороны проекта			
		C1	C2	C3	C4
Возможности проекта	B1	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+
	B3	-	0	0	+
	B4	-	+	+	+

В рамках *третьего этапа* должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 8).

Таблица 8 SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>C1. Наличие бюджетного финансирования            C2. Актуальность тематики            C3. Использование современных программ            C4. Использование собственной разработки программного обеспечения            C5. Оригинальность решения поставленной задачи            C6. Наличие всех материалов для исследования</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки            Сл2. Отсутствие потенциальных потребителей            Сл3. Программное обеспечение с закрытым исходным кодом            Сл4. Большая трудоёмкость работы            Сл5. Долгое ожидание результатов эксперимента</p>
<p><b>Возможности:</b>            В1. Использование инновационной</p>	<p>По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»</p>	<p>По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»</p>

<p>инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на результаты исследования В3. Возможность появления новых методов анализа В4. Расширение лаборатории В5. Возможность улучшения программного обеспечения</p>	<p>можно сделать вывод о том, что нужно расширять лабораторию и попытаться улучшить программные обеспечения, чтобы увеличить эффективность программного обеспечения.</p>	<p>можно сделать вывод о том, что мы должны развивать новые методы исследования, чтобы уменьшить трудоёмкость работы.</p>
<p><b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие спроса на результаты исследования У2. Развитая конкуренция других научных центров У3. Задержки финансирования У4. Ограничение точности эксперимента У5. Повышение издержек</p>	<p>По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы» можно сделать вывод о том, что возможные угрозы при производстве, такие как отсутствие спроса и развитая конкуренция, могут сильно ослабить позиции данного научного исследования. тематика очень актуальна, и мы имеем оригинальные решения поставленной задачи молекулярной спектроскопии высокого разрешения, поэтому мы имеем конкурентоспособность</p>	<p>По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы» можно сделать вывод о том, что мы должны развивать новые методы исследования. При необходимости можно стремиться к сотрудничеству с другими научными центрами.</p>

Приведение анализа показало, что на этапе разработки технология имеет высокий шанс на коммерциализацию, в случае наличия интереса у партнеров и удачно выполненных исследованиях.

#### 4.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации, выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполнена специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 9).

При проведении анализа по таблице, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где:  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;  $B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

По результатам оценки выделяются слабые стороны исследования, дальнейшего улучшения необходимо провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план коммерциализации научной



разработки и проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.

Таблица 9 Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

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

14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
15	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	65	59

#### **4.1.5. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Для коммерциализации результатов, проведенного исследования будут использоваться следующие методы: инжиниринг и передача интеллектуальной собственности.

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика.

Передача интеллектуальной собственности будет производиться в уставной капитал предприятия или государства.

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

#### **4.2. Инициация проекта**

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта (таблица 10).

Таблица 10 Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
НИ ТПУ	Выпуск высококвалифицированных специалистов
<u>Инженерная школа ядерных технологий</u>	Разработка универсальной криогенной поверхности с температурой криостатирования 80 – 300 К.

В таблице 11 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 11 Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	Разработка крио поверхности для охлаждения и дальнейшей работы с образцами, в том числе активными различного состава в диапазоне температур поверхности 80 К – 300 К. Для достижения конечной цели сложнейшей и актуальной попутной задачей является создание насоса с регулируемым расходом для жидкого азота и других крио жидкостей.
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Создать универсальную крио поверхность с авто поддержанием заданной температуры в диапазоне от 80 К до 300 К.
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Разработать компьютерную модель в УКП.
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Получить рабочие чертежи крио поверхности Провести обработку полученных данных;

В таблице 12 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (таблица 13).

### 4.3. Планирование управления научно-техническим проектом

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

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

Таблица 12 Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Соколов Д.Ю. Ass.Prof. PhD, КазНУ	Руководитель	Постановка задачи, контроль выполнения работ	114
2	Таженова М.С. Магистр, ТПУ	Исполнитель по проекту	Теоретического исследование Анализ и обработка полученных результатов	492
ИТОГО				606

Таблица 13 Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	33457053,6
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	01.09.2020-31.05.2022
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.09.2020

3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2022
--------------------------------	------------

### 4.3.1. План проект

В рамках планирования научного проекта построены календарный график проекта (таблицы 14, 15).

Таблица 14 Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Утверждение темы магистерской диссертации	7	01.09.20	07.09.20	Соколов Д.Ю.; Таженова М.С.
Согласование плана работ	7	08.09.20	15.09.20	Соколов Д.Ю.; Таженова М.С.
Литературный обзор	108	16.09.20	01.01.21	Соколов Д.Ю.; Таженова М.С.
Проведение экспериментов, обработка полученных данных и обсуждение результатов	322	01.01.21	31.12.21	Соколов Д.Ю.; Таженова М.С.
Написание отчета	162	01.01.22	31.05.22	Соколов Д.Ю.; Таженова М.С.
<b>Итого:</b>	606			

Таблица 15 Календарный план график проведения НИОКР по теме

Наименование этапа	Т, дней	2020				2021								2022										
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май		
Утверждение темы магистерской диссертации	7	■																						
Согласование плана работ	7	■																						
Литературный обзор	108	■	■	■	■																			
Проведение экспериментов, обработка и обсуждение результатов	322					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Написание отчета	162																	■	■	■	■	■	■	■

■ –Таженова М.С.

■ Таженова М.С., Соколов Д.Ю.

#### 4.4. Бюджет научного проекта

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты сгруппированы по статьям. В данном исследовании выделены следующие статьи:

1. Сырье, материалы;
2. Специальное оборудование для научных работ;
3. Заработная плата;
4. Отчисления на социальные нужды;
5. Научные и производственные командировки;
6. Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями;
7. Накладные расходы.

Сырье и материалы. Расчёт материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта (таблица 16).

Таблица 16 Расчет затрат по статье «Сырье и материалы»

Наименование	Единицы измерения	Количество	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Компьютер	шт	1	106419	106419
Монитор	шт	1	8500	8500
Халат	шт	1	1000	1000
Шариковая ручка	шт	4	30	120
Ластик	шт	4	52	208
Тетрадь	шт	4	115	460
Печать	шт	4	170	680

Продолжение таблицы 16

Энергия	Наименование	Время работы оборудования, час	Потребляемая мощность, кВт	Цена за 1 кВт·ч	Сумма, руб
	ПК	1500	3	3.85	17325
	НТО	700	8		21560
Всего		156272			
<b>Итого по статье, руб.</b>					156272

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 17), шлифовально-полировочная машина “Saphir 320” был заранее закуплен и использован в лаборатории НЛ ВИИ ТПУ. Также использовался дифрактометр «SHIMADZU XRD-7000S».

Таблица 17 Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер (HP)	1	100000,0	100000,0
2	Программное обеспечение Microsoft Office	1	5990,0	5990,0
3	Программа COMSOL	1	889590.68	889590,68
4	Компьютер для высокоточного моделирования	1	30000000	30000000
5	Расширенная база данных COMSOL	1	100000	100000
<b>Итого, руб.:</b>				31095580,68

*Расчет основной заработной платы.* В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников,



рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 1.16

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

где:  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Расчет заработной платы научно – производственного и прочего персонала проекта проводили с учетом работы 2-х человек – научного руководителя и исполнителя. Баланс рабочего времени исполнителей представлен в таблице 18.

Таблица 18 Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Консультант	Магистрант
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней	99	99	99
- выходные дни	14	14	14
- праздничные дни			
Потери рабочего времени	24	24	24
- отпуск	14	14	14
- невыходы по болезни			
Действительный годовой фонд рабочего времени	212	212	212

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b * (k_{пр} + k_d) * k_p, \text{ где}$$

$Z_b$  – базовый оклад, руб.;  $k_{пр}$  – премиальный коэффициент (определяется Положением об оплате труда);  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 19.

Таблица 19 Расчет основной заработной платы (консультант, чуть меньше, чем руководитель)

Исполнители	$Z_b$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	26116	1	0,02	1,3	34629.82	1829.50	212	387854
Консультант	21463	1	0,02	1,3	28459.94	1503.54	212	318751
Магистрант	5786	-	-	1,3	7523	397.44	212	84257
Итого $Z_m$								790849

*Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.*

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и

общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} * k_{\text{доп}}, \text{ где}$$

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{\text{доп}}=0.15$ );

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

В таблице 20 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 20 Заработная плата исполнителей НТИ (Консультант)

Заработная плата	Руководитель	Консультант	Магистрант
Основная зарплата	387854	318751	84244.2
Дополнительная зарплата	58178.1	47812.7	12636.6
Зарплата исполнителя	446032.1	366563.7	96880.8
Итого по статье $C_{зп}$ , руб	909476.5		

Отчисления на социальные нужды. Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

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

$k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчисления на уплату во внебюджетные фонды.

На 2022 г. в соответствии с главой 34 налогового кодекса РФ установлен размер страховых взносов равный 30%

Отчисления на социальные нужды со стороны руководителя составляют:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 * 446032.1 = 133809,63 \text{ рублей}$$

Отчисления на социальные нужды со стороны консультанта составляют:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 * 366563.7 = 109969,1 \text{ рублей}$$

Отчисления на социальные нужды со стороны магистранта составляют:

$$Свнб=0,3*96880.8= 29064,24 \text{ рублей}$$

Тогда общие отчисления составят 272842.96 рублей

Научные и производственные командировки. В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

Затраты на научные и производственные командировки составляют 271300 руб.

Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями.

Сторонней организацией был выполнена сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), полученная в центре коллективного пользования ТГУ.

Таблица 21 Расчет затрат на подрядные работы

Метод анализа	Количество проб	Стоимость, руб	Итого, руб
СЭМ	4	6000	24000

Итого на оплату работ выходит 24000 руб.

*Накладные расходы.* Расчет накладных расходов провели по следующей формуле:

$$\begin{aligned} C_{\text{накл}} &= k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{рук}} + З_{\text{маг}}) = 0,8 \cdot (446032.1 + 366563.7 + 96880.8) \\ &= 727581.2 \end{aligned}$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов принят 0,8.

Общие затраты проекта приведены в таблице 22.

Таблица 22 Затраты научно-исследовательской работы

Вид исследования	Затраты по статьям									
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Доп-ая заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Научные и производственные командировки	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
Данное исследование	156272	31095580,68	790849	118627,374	272842,96	271300	24000	-	727581,2	33457053,6
Аналог	160000	40000000	5271101	790665.2	1818529.8	-	-	-	4849412.8	45431101

## 4.5. Операционные затраты

Операционные затраты будут вычислены по следующей формуле:

Опер. затр. = сырьё + амортизация + ЗП(осн + доп) +  
соц. отч. + науч. ком. + контр. расх. + накл. расх = 156272 + 31095580,68 +  
909476.5 + 272842.96 + 271300 + 24000 + 727581.2 = 33457053,6 рублей ,  
что составляет 67% от себестоимости проекта.

Амортизация научного оборудования вычислялась по следующему принципу.

Срок полезного использования оборудования составлял 10 лет, поэтому норма амортизации составляет:

$$N_a = \frac{100\%}{10} = 10\%$$

где  $N_a$  – норма амортизации в процентах.

Первоначальная стоимость оборудования составляла 31095580,68 рублей.

Из этого следует, что годовая сумма амортизации составляет:

$$C_{\text{перв.}} = \frac{C_{\text{об}} \cdot N_a}{100} = \frac{31095580,68 \cdot 10}{100} = 3109558,068 \text{руб}$$

### 4.5.1. Организационная структура проекта

Данный проект представлен в виде проектной организационной структуры.

Проектная организационная структура проекта представлена на рисунке 4.5.1.1.



Рисунок 4.5.1.1. Проектная структура проекта

#### 4.5.2. План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 23).

Таблица 23 План управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно (понедельник)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Ежемесячно (конец месяца)
3.	Документы и информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

#### 4.5.3. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по возможным рискам сведена в таблицу 24

Таблица 24 Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Рост стоимости и блокировка каналов	5	5	Высокий	Замещение импорта	Политические

	импортных комплектующих					
2	Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	4	5	Высокий	Участие в научных конференциях и публикация научных статей	Политика внутреннего финансирования науки

#### 4.6. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

##### 4.6.1. Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности используются следующие основные показатели:

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

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

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

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

где: ЧДП<sub>опt</sub> – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

$I_0$  – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;



$t$  – номер шага расчета ( $t= 0, 1, 2 \dots n$ )

$n$  – горизонт расчета;

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

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

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 25. При расчете рентабельность проекта составляла **25 %**, норма амортизации 10 %.

Таблица 25 Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

Наименование показателей	Шаг расчета				
	0	1	2	3	4
Выручка от реализации, руб.	0,0	41821317,1	41821317,1	41821317,1	41821317,1
Итого приток, руб.	0,0	41821317,1	41821317,1	41821317,1	41821317,1
Инвестиционные издержки, руб.	33457053,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Операционные затраты, руб. (35%от бюджета)	0,0	2550432,0	2550432,0	2550432,0	2550432,0
Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0,0	39270885,0	39270885,0	39270885,0	39270885,0
Налоги 20 %, руб.(5*20%)	0,0	7854177,0	7854177,0	7854177,0	7854177,0
Чистая прибыль, руб.(5-6)	0,0	31416708,0	31416708,0	31416708,0	31416708,0
Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль+амортизация)	-33457053,6	31605667,1	31605667,1	31605667,1	31605667,1
Коэффициент дисконтирования при $i=20\%$ (КД)	1,0	0,833	0,694	0,579	0,482
Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)	-33457053,6	26338055,9	21948379,9	18290316,6	15241930,5

$\Sigma$ ЧД	81818682,9
Итого NPV, руб.	48361629,3

Коэффициент дисконтирования рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1 + i)^t}$$

где:  $i$  – ставка дисконтирования, 20 %;

$t$  – шаг расчета.

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 48361629,3 рублей, что позволяет судить об его эффективности.

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

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

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.;

$I_0$  – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таким образом PI для данного проекта составляет:

$$PI = \frac{81818682,9}{33457053,6} = 2.445$$

Так как  $PI > 1$ , то проект является эффективным.

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

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 26 и на рисунке 4.6.1.1.

Таблица 26 Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, руб.
1	Чистые денежные потоки, руб.	- 33457053,6	31605667,1	31605667,1	31605667,1	31605667,1	
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	<b>0,909</b>	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,35	
	0,4	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,39	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,5	0,25	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	- 33457053,6	28729551,4	26106281,0	23735856,0	21586670,6	66701305,4
	0,2	- 33457053,6	26327520,7	21934333,0	18268075,6	15233931,5	48306807,1
	0,3	- 33457053,6	24304758,0	18710554,9	14380578,5	11061983,5	35000821,3
	0,4	- 33457053,6	22566446,3	16118890,2	11504462,8	8217473,4	24950219,1
	<b>0,5</b>	- 33457053,6	21080979,9	14032916,2	9323671,8	6257922,1	17238436,4
	<b>0,6</b>	- 33457053,6	19753541,9	12326210,2	7711782,8	4835667,1	11170148,3
	0,7	- 33457053,6	18584132,2	10587898,5	6415950,4	3539834,7	5670762,2
	0,8	- 33457053,6	17572750,9	9766151,1	5404569,1	3002538,4	2288955,8
	0,9	- 33457053,6	16624580,9	8754769,8	4614427,4	2433636,4	-1029639,2
	1	- 33457053,6	15802833,5	7901416,8	3950708,4	1959551,4	-3842543,6

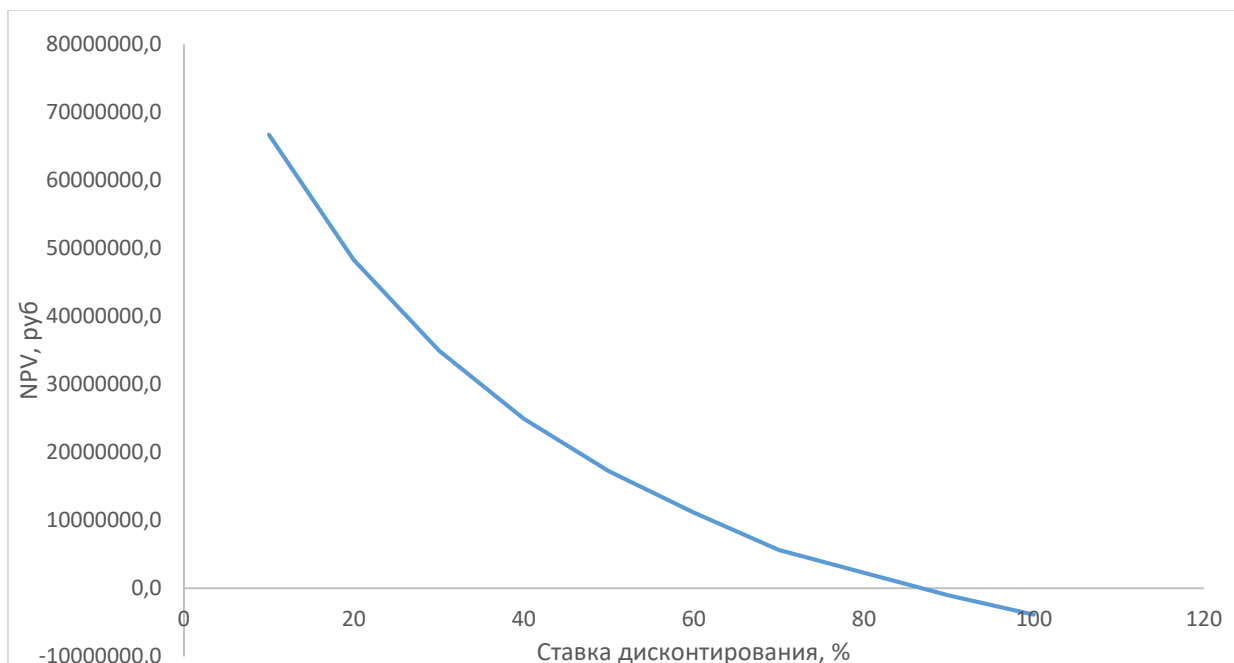


Рисунок 4.6.1.1. Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,88.

$IRR > i$ , проект эффективен.

Запас экономической прочности проекта:  $88\% - 20\% = 68\%$

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

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 27).

Таблица 27 Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ( $i=0,20$ ), руб.	-33457053,6	26338055,9	21948379,9	18290316,6	15241930,5
2	То же нарастающим итогом, руб.	-33457053,6	-7118997,7	14829382,2	33119698,8	48361629,3
3	Дисконтированный срок окупаемости	<b>DPP=1+(7118997,7/21948379,9)=1,32</b>				

**Социальная эффективность научного проекта** учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 28).

Таблица 28 Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Отсутствие производственных конечных чертежей с заводом и сборочные работы	Были получены рабочие чертежи крио поверхности.

#### 4.6.2. Оценка сравнительной эффективности исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный

показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

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

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 (в т.ч. аналоги).

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по следующей формуле:

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

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

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

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблице 29).

Таблица 29 Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1.Выход продукта	0,20	5	5	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	3	3
3. Надежность	0,15	4	4	4
4.Безопасность	0,15	4	3	4
5.Простота эксплуатации	0,15	5	4	5
6.Возможность автоматизации данных	0,20	5	4	5
Итого	1	28	23	25

$$I_m^p = 5 \cdot 0,20 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,20 = 4,7$$

$$I_1^A = 5 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 = 3,9$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,20 = 4,2$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{финр}^p$  и аналога  $I_{финр}^a$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{ф}^p}; I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_{ф}^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где:  $\mathcal{E}_{ср}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$  – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{финр}}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 30.

Таблица 30 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,18	0,16	0,16
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,50	3,85	4,00
3	Интегральный показатель эффективности	23,12	22,83	23,03
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,02	1,01	1,0

Выводы: Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная 48361629,3 руб.; индекс доходности  $PI=2.445$ , внутренняя ставка доходности  $IRR=88\%$ , срок окупаемости  $DPP=1,32$  года.

Таким образом мы имеем ресурсоэффективный проект с высоким запасом финансовой прочности и коротким сроком окупаемости.



## ГЛАВА V. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### Введение

Социальная ответственность - ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

В ходе данной работы разработка крио поверхности для охлаждения и дальнейшей работы с образцами, в том числе активными различного состава в диапазоне температур поверхности 80 К – 300 К. Работа выполнялась в лаборатории крио физики и крио технологии. Все работы выполнялись с использования компьютера. Раздел также включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

### 5.1. Производственная безопасность

#### 5.1.1. Отклонение показателей микроклимата в помещении

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Микроклимат производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти факторы влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Оптимальные и допустимые значения параметров микроклимата приведены в таблице 1 и 2

Таблица 1 - Оптимальные нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19-23	40-60	0.1

Теплый	23-25		0.2
--------	-------	--	-----

Таблица 2 - Допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура воздуха, С°		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		
Холодный	15	24	20-80	<0.5
Теплый	22	28	20-80	<0.5

Температура в теплый период года 23-25°С, в холодный период года 19-23°С, относительная влажность воздуха 40-60%, скорость движения воздуха 0,1 м/с.

Общая площадь рабочего помещения составляет 42м<sup>2</sup>, объем составляет 147м<sup>3</sup>. По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 санитарные нормы составляют 6,5 м<sup>2</sup> и 20 м<sup>3</sup> объема на одного человека. Исходя из приведенных выше данных, можно сказать, что количество рабочих мест соответствует размерам помещения по санитарным нормам.

После анализа габаритных размеров рассмотрим микроклимат в этой комнате. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха, скорость ветра.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является обще обменной. Основным недостатком - приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания. Согласно нормам, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40м<sup>3</sup>. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 42 м<sup>3</sup>, из этого следует, что дополнительная вентиляция не требуется. Параметры микроклимата поддерживаются в холодное время года за счет систем водяного отопления с нагревом воды до 100°С, а в теплое время года – за счет

кондиционирования. Нормируемые параметры микроклимата, ионного состава воздуха, содержания вредных веществ должны соответствовать требованиям.

### **5.1.2. Превышение уровней шума**

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБА. Согласно СанПиН 2.2.2 / 2.4.1340-03, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты:

1. применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

### **5.1.3. Повышенный уровень электромагнитных излучений**

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на

расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25В/м в диапазоне от 5Гц до 2кГц, 2,5В/м в диапазоне от 2 до 400кГц. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250нТл, и 25нТл в диапазоне от 2 до 400кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В. В ходе работы использовалась ПЭВМ типа Asus со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В (основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.).

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию.

Предельно допустимые уровни облучения (по *ОСТ 54 30013-83*):

- а) до 10 мкВт./см<sup>2</sup>, время работы (8 часов);
- б) от 10 до 100 мкВт/см<sup>2</sup>, время работы не более 2 часов;
- в) от 100 до 1000 мкВт/см<sup>2</sup>, время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;
- г) для населения в целом ППИМ не должен превышать 1 мкВт/см<sup>2</sup>.

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ

1. защита временем;
2. защита расстоянием;
3. снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;
4. экранирование источника;

## 5. защита рабочего места от излучения;

### СИЗ

1. Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.
2. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова ( $\text{SnO}_2$ ).

#### 5.1.4. Поражение электрическим током

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного с прикосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования.

Лаборатория относится к помещению с без повышенной опасностью поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются:  $I < 0,1 \text{ А}$ ;  $U < (2-36) \text{ В}$ ;  $R_{\text{зазем}} < 4 \text{ Ом}$ . В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);

- очистить дыхательные пути;

- приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);

- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;

- появления запаха, характерного для горячей изоляции или пластмассы;

- появления дыма или огня;

- появления искрения;

- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. — защитное заземление, зануление;

2. — малое напряжение;

3. — электрическое разделение сетей;

4. — защитное отключение;

5. — изоляция токоведущих частей;

6. — оградительные устройства.

7. Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты:

1. Использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

### 5.1.5. Освещенность

1. Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 300 Лк.

2. Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

3. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

4. Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

5. Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения  $A = 7$  м, ширина  $B = 6$  м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 1,0$  м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

6. Площадь помещения:

7.  $S = A \times B$ ,

8. где  $A$  – длина, м;

9.  $B$  – ширина, м.

10.  $S = 7 \times 6 = 42 \text{ м}^2$

11. Коэффициент отражения свеж побеленных стен с окнами, без штор  $\rho_{ст} = 50\%$ , свеж побеленного потолка  $\rho_{пт} = 70\%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_z = 1,5$ . Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z = 1,1$ .

12. Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен  $\Phi_{ЛД} = 2600 \text{ Лм}$ .

13. Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

14. Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A*B}{h(A+B)} = 1,04.$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\text{п}} = 70\%$ ,  $\rho_{\text{с}} = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,6$  равен  $\eta = 0,42$ .

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{EABK_3Z}{N\eta} = 2836 \text{ лм.}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} * 100\% \leq 20\%,$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} * 100\% = -9,07\%.$$

Таким образом необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

15. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda=1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

16. Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

17.  $h = h_n - h_p$ ,

18. где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса,

19.  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

20. Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

21. Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

22.  $h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,0$  м.

23. Из формулы  $\Phi_{\text{л}} = (E*S*K_3*Z)/N*\eta$  находим число ламп N



24.  $N = (E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z) / \Phi_{л} \cdot \eta$

25.  $\eta$  определяем через индекс помещения по формуле:

26.  $i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)} = \frac{7 \cdot 6}{2,0 \cdot (7+6)} = 1,6$

27. Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{П} = 70 \%$ ,  $\rho_{С} = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,6$  равен  $\eta = 0,47$ .

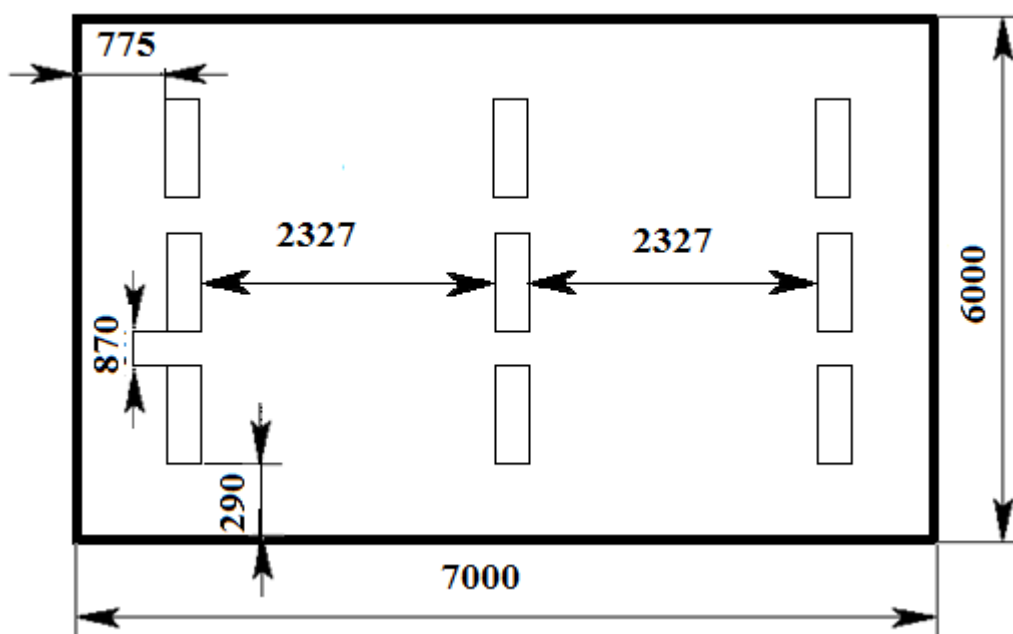
28. Тогда  $N = (E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z) / \Phi_{л} \cdot \eta = (300 \cdot 42 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / 2600 \cdot 0,47 = 17$  ламп; Принимаем 18 ламп, при этом получается 9 светильников, т.е. 3 ряда по 3 светильника.

29. Из условий равномерности освещения определяем расстояния  $L_1$  и  $L_1/3$  и  $L_2$  и  $L_2/3$  по следующим уравнениям:

30.  $7000 = 2 \cdot L_1 + 2/3 \cdot L_1 + 3 \cdot 265$ ;  $L_1 = 2327$  мм;  $L_1/3 = 775$  мм;

31.  $6000 = 2 \cdot L_2 + 2/3 \cdot L_2 + 3 \cdot 1227$ ;  $L_2 = 870$  мм;  $L_2/3 = 290$  мм;

32. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.



33. Рисунок – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

34. Индекс помещения определяется по формуле:

35. Потребный световой поток люминесцентной лампы определяется по формуле:

36.  $\Phi_{л} = (E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z) / N \cdot \eta = (300 \cdot 42 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / 18 \cdot 0,47 = 2457,44$  лм

37. Делаем проверку выполнения условия:

38.  $-10\% \leq \frac{\Phi_{лд} - \Phi_{П}}{\Phi_{лд}} \cdot 100\% \leq 20\%$ ;

$$39. \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% = \frac{2600 - 2457,44}{2600} \cdot 100\% = 5,5\%.$$

40. Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Теперь рассчитаем мощность осветительной установки:

$$41. P = 18 \cdot 40 = 720 \text{ Вт}$$

### 5.1.6. Пожарная опасность

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В– горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам).

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

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые

огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3. первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4. автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, изображенного на рисунке 1, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.



Рисунок 1 – План эвакуации

## 5.2. Экологическая безопасность

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специально переработке;

исходя из сказанного выше перед планированием покупки компьютера необходимо:

- побеспокоится заранее о том, каким образом будет утилизирована имеющаяся техника, перед покупкой новой.

- узнать насколько новая техника соответствует современным эко-стандартам и примут ее на утилизацию после окончания срока службы.

Утилизировать оргтехнику, а не просто выбрасывать на «свалку» необходимо по следующим причинам:

Во-первых, в любой компьютерной и организационной технике содержится некоторое количество драгоценных металлов. Во-вторых, предприятие также может быть оштрафовано за несанкционированный вывоз техники или оборудования на «свалку»;

Стадия утилизации, утилизируя технику мы заботимся об экологии: количество не перерабатываемых отходов минимизируется, а такие отходы, как пластик, пластмассы, лом черных и цветных металлов, используются во вторичном производстве. Электронные платы, в которых содержатся драгметаллы, после переработки отправляются на аффинажный завод, после чего чистые металлы сдаются в Госфонд, а не оседают на свалках.

Таким образом утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- отделить металлические детали от неметаллов;

- разделить углеродистые металлы от цветмета;

- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;

- копир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы утилизируют следующим образом. Не работающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в 1 транспортную единицу их сдают на переработку на

соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором, превращая его в ртутьсодержащие отходы, которые загрязняют ртутными парами

### **5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В лаборатории крио физики и крио технологии наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполнения работы является получение новых данных прикладного характера о свойствах материалов при низких температурах

Применение научных результатов:

Формирование физико-технологических основ для производства криогенного оборудования;

Результаты окажут определенное воздействие на развитие физики низких температур и криогенных технологий.

Будут проведены производственные с согласованием конечных чертежей с заводом и выполнены сборочные работы. После сборки будет выполнено испытание опытно промышленных образцов. Будут проведены испытательные и диагностические работы для синхронизации компьютерной модели. Будет создана и проверена компьютерная модель по разработанным чертежам.

Были получены рабочие чертежи крио поверхности. Была разработана конструкция и создана конструкторско-технологическая документация для изготовления опытно промышленного образца крио поверхности. Были получены рабочие чертежи криогенного насоса. Будет разработана конструкция и создана конструкторско-технологическая документация для изготовления опытно-промышленного образца криогенного насоса способного удобно работать с распространенными видами сосудов Дьюара.

Будут проведены маркетинговые исследования, изучение требований для различных областей использования разработки в науке (при измерении теплопроводности относительным методом, определение вязкости нефтепродуктов, космические исследования и низкотемпературные измерения), в медицине (производство лекарств, изучение биологических образцов и кристаллизации белковых соединений), в промышленности (производство мороженого и карамели) и для ремонта дисплеев. Это необходимо для предпочтений спроса и подбора комплектации изобретения без изменения общей конструкции, и значительной экономии средств для потребителя.

**Приложение А**  
(обозначение приложения)  
**Раздел на иностранном языке**

Раздел 2  
Охлаждённые поверхности  
Свойства металлов  
Свойство веществ при низких температурах

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Таженова Маржан Султановна		

Консультант школы отделения (НОЦ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Лаптев Роман Сергеевич	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист отделения ОИЯ школы ШБИЦ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Лахотюк Любовь Андреевна	-		



## PROPERTIES OF CRYOGENIC LIQUIDS

Advances in the cryogenic field are making pumps based on this principle because of the promising means of achieving high levels of vacuum. These pumps are commonly referred to as cryogenic vacuum pumps.

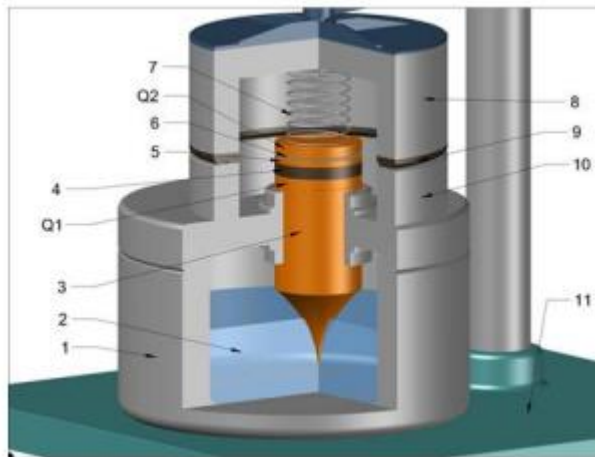


Рисунок 10 - Sectional sketch of the measuring cell without the use of a cryo pump.

1 - Dewar vessel; 2 - liquid nitrogen; 3 - refrigerator heat exchanger; Q1 - lower cryostat; 4 - control sample; 5 - measuring plate; 6 - thermal conductivity standard; 7 - clamping spring; 8 - cover of the measuring cell; 9 - gasket; 10 - cell base; 11 - platform.

Cryo panels are not the least of foreign developments in this area shown in Figure 4 for cryogenic vacuum pumps, but the tasks and applications of the cryo panel are completely different from the system of this project. Since the main task of the cryo panel is to create a vacuum. Whatever type of pump you use, the principle of creating a vacuum does not change. The vacuum is created by removing the gas molecule by molecule from the hermetically sealed working volume.

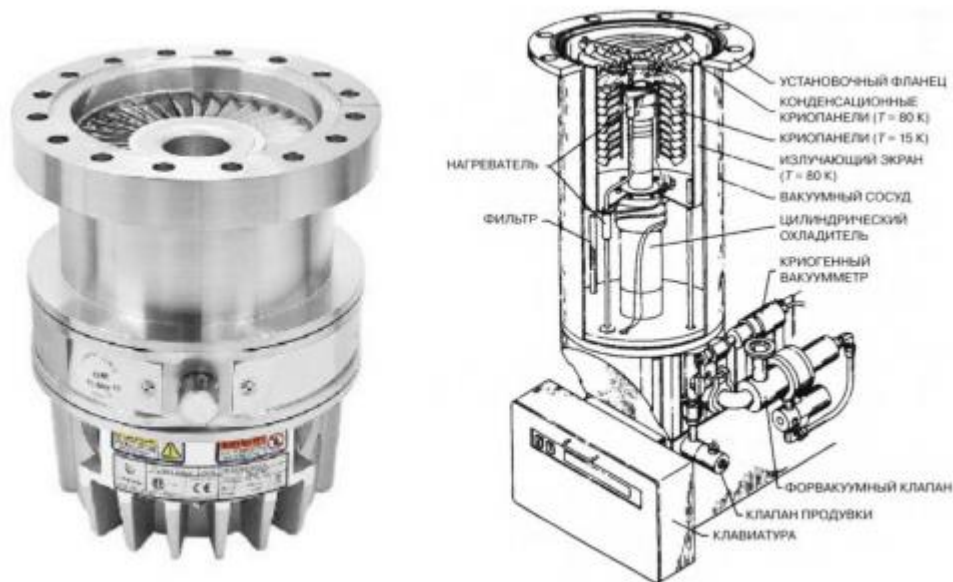


Figure 11 - Cryo panel in cryogenic vacuum pumps

Cryogenic pipelines are used to transfer cryogenic liquid from the liquefier to the storage tank, as well as from the tank to the consumer. Cryogenic pipelines are supplied with high-quality vacuum thermal insulation, which reduces the volatility of the liquid. The necessary pressure is created due to the excess pressure in the tank or pump.

To cool special built-in cryo panels to 10K and 80K, on which gas molecules are actually deposited, the cryo pump uses a closed cycle cooling system with helium as a working gas. Molecules of the pumped gas, moving randomly, contact the cryo panels and condense or are absorbed on them.

The outer row of gratings is cooled to 80K and used to condense water vapor, which is usually the main gas load. The inner row of condensation grates is cooled to a temperature of 15 K and is intended for the main part of the remaining gases. All condensable gases pass into a solid state with a vapor pressure of less than 10-12 Torr. Non-condensable gases such as helium, hydrogen and neon are simultaneously adsorbed by a layer of encapsulated activated (charcoal) carbon cooled to 15 K.

Some elements of the calculation of cryogenic vacuum pumps were outlined in the fourth chapter, but they were reduced only to an assessment of the main vacuum characteristics of the speed of the operation of the cryopump and the auxiliary vacuum

system, and the limiting pressure. An analysis of the graphs leads to the conclusion that there is no universal geometry of the panels, since depending on whether a directed or diffuse flow prevails in a system with a cryogenic vacuum pump, what gas is condensed and what the energy state of its molecules is, a cryopanel will be acceptable with one or a different angle of inclination of the plates, which, under given specific conditions, has the highest capture coefficient. In the practice of cryogenic laboratories, the so-called vacuum isolation is successfully used. The air from the metal casing is pumped out by diffusion and foreline pumps to a residual pressure of  $10^{10}$  mm Hg. Art. The practice of working with such vacuum insulation shows that when applied to industrial apparatuses, great installation and operational difficulties will arise, which is why its use in large apparatuses is irrational.

Condensation (cryogenic) pumps provide theoretically the maximum rate of pumping gases in the pressure range exceeding the vapor pressure at the operating temperature of the condenser. In the range of pressures typical of vacuum technology, a condensation pump cooled by liquid hydrogen does not pump out helium, hydrogen and neon, whereas cooled by liquid helium, only helium is not pumped out. Cryogenic condensing vacuum pumps, which are currently widely used to create an oil-free vacuum, have a serious drawback: they can only work if the pumped gas is in a state of supersaturated vapor relative to the temperature of the cryosurface. Therefore, to pump out by condensation, for example, hydrogen at a pressure of 10 Pa, the cryosurface temperature must be below 4 K, and at a pressure of 10 Pa below 3.2 K.

At present, vacuum technology has become the main discipline along with mechanics, electrical engineering, etc. Vacuum technological methods are widely used in many industries and in scientific research. Oxygen, cryogenic, compressor, refrigeration equipment, for gas-flame processing of metals, vacuum and high-vacuum pumps and units, complete technological lines, units.

Low vacuum pumps operate in the pressure range from  $1.03 \cdot 10^{10}$  Pa (atmospheric pressure) to 10 Pa. These pumps include some positive displacement pumps, ejector, adsorption, cryogenic pumps. The disadvantages of vacuum evacuation

systems, consisting of diffusion and condensation cryogenic pumps, are that hydrogen is not pumped out at 20°K (hydrogen evolution during tests is).

In recent years, a number of microcryogenic systems based on HCM have been developed and created. Some of them can be, according to the authors, the basis for the creation of cryogenic vacuum pumps. Two different principles can be used to reduce the pressure in a vacuum chamber. In the first, the gas is physically removed from the vacuum chamber and thrown out. Mechanical and steam jet pumps are examples of this mode of operation. Another pumping method is based on the condensation or entrapment of gas molecules on some part of the inner surface of the chamber without removing the gas to the outside. This category includes cryogenic, cryo-sublimation, sublimation and getter-ion pumps.

Specifics of measurements by high-vacuum manometers. Usually, measurements of the vacuum depth in the low pressure region are carried out in order to determine the flux density of molecules falling on a certain surface inside a vacuum system. The object of interest to us can be a thin film, a substrate, or some kind of device. It is usually assumed that the gas pressure measured by a manometer corresponds to conditions that are the same for all points of a given vacuum chamber. This assumption, however, is only an approximation, since at very low pressures the behavior of the gas is determined mainly by the interaction of gas molecules with the walls of the chamber, but not between themselves.

Consequently, the distributions of the particles themselves and their velocities are not uniform and differ from Maxwell's. Ionization manometers are characterized by a number of limitations in the pressure measurement and most of the sources of limitations cannot be eliminated. In order to reduce the magnitude of these effects and evaluate the accuracy of measurements in the low-pressure region, it is necessary to understand the mechanisms responsible for these effects. The problem of inhomogeneous distribution of gas in vacuum systems was considered by Moore. He listed the reasons that can lead to a change in the density of the gas. The reason may be pumps acting as traps and as sources of directional distribution of gas particles. The effect can be associated with the inelastic reflection of molecules incident on the wall,

with the surface migration of adsorbed gases, and with the variation in adsorption and desorption rates in certain areas of the inner walls.

The change in gas density can be caused by the difference in temperatures of the elements of the system. Although attempts have been made to describe analytically the real distribution of the gas, however, they have been carried out for systems with the simplest geometry. Experimental studies in this direction were carried out by Holland, who considered the total gas pressure as the sum of the Maxwellian and directional components. He mounted an ionization gauge tube so that its inlet tube could rotate, and observed significant pressure differences at various orientations of the gauge tube. Since it is impossible to eliminate all sources of uneven gas pressure distribution, at least the most important of them must be taken into account when installing an ionization lamp in a vacuum system. If the gauge is facing a pump, cryogenic panel, or actively degassing surface such as a heated element, it will likely indicate a pressure corresponding to either a lower or higher particle density compared to the surrounding atmosphere substrate. To obtain the value of the pressure closer to the real, it is necessary to direct the connecting tube of the gauge sensor in the opposite direction or sideways so that the effects of directionality of the flows are close to those that occur at the substrate. The danger of incorrect pressure readings is greater in systems with powerful pumps due to high desorption rates. Under these conditions, one can expect the predominance of the directional component of pressure, which is unlikely to be correctly measured with a pressure gauge.

When designing cryopumps, special attention should also be paid to solving a number of cryotechnical issues, namely, ensuring a minimum thermal load on the cold pump elements while ensuring the required pumping speed, since this mainly determines their efficiency. In cryogenic devices, it is very important to take into account thermal deformations and provide vacuum-tight connections. It is also important to choose the method of cooling the cryo-sosa, which mainly determines the performance of the pump.

The main components of the cryostat are a vacuum jacket, a screen with a torus tank for cryogenic liquid, a brass cover with a gas-tight seal, and a cryogenic liquid chamber located under the cover. The vacuum jacket is designed to create a vacuum of

1 10 mmHg. This is achieved by successive pumping by foreline and diffusion pumps, and a deeper vacuum by sorption of residual gases by coal or other adsorbents. The vacuum jacket consists of three copper coaxial vessels. Copper shells / and 7 with a flat steel ring 3 soldered on top form a vacuum cavity shell 4 - a screen located inside the vacuum shell. The screen serves to protect the temperature-controlled system (cryostat bath) from external heat inflows. To fix the screen and supply the cryogenic liquid, the tubes passing through the steel cover ring are soldered to it. A torus container for cryogenic liquid is attached to the upper part of the screen shell.

The screen area should be kept to a minimum as reduce short circuits. The distance between the evaporator and the deposition surface should be chosen as large as possible in order to avoid radiative overheating of the deposited getter films. The pumps always operate in a cyclic thermal mode: training heating - cooling (often to cryogenic temperatures) - radiant heating when the evaporator is turned on, the amplitude of temperature jumps reaches 600 K. Therefore, the length of welded centers - potentially the most likely sources of leaks under thermal cyclic loading - should be reduced to a minimum.

For the same reason, structures with large area panels built into the evacuated chamber, cooled by liquid nitrogen, should be avoided. In such constructions, the welds have a large length, the violation of their tightness in heat-insulating cavities, i.e., in elements of a purely technological purpose, causes an emergency situation for the vacuum system as a whole. This danger is eliminated if the ultra-high vacuum chamber being evacuated and the heat-insulating cavities are hermetically separated.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baek S. et al. Novel design of LNG (liquefied natural gas) reliquefaction process // *Energy Convers. Manag.* 2011. Vol. 52, № 8–9. P. 2807–2814.
2. Styles P. et al. A high-resolution NMR probe in which the coil and preamplifier are cooled with liquid helium // *J. Magn. Reson.* 1984. Vol. 60, № 3. P. 397–404.
3. Joseph J. et al. Fluid-hammer induced pressure oscillations in a cryogenic feed line // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 171. P. 012049.
4. Srinivasan K., Seshagiri Rao V., Krishna Murthy M.V. Analytical and experimental investigation on cool-down of short cryogenic transfer lines // *Cryogenics (Guildf)*. 1974. Vol. 14, № 9. P. 489–494.
5. Hedayatpour A., Antar B.N., Kawaji M. Cool-down of a vertical line with liquid nitrogen // *J. Thermophys. Heat Transf.* 1993. Vol. 7, № 3. P. 426–434.
6. Krishnamurthy M.V. et al. Experimental studies on cool-down and mass flow characteristics of a demountable liquid nitrogen transfer line // *Cryogenics (Guildf)*. 1996. Vol. 36, № 6. P. 435–441.
7. Yuan K., Ji Y., Chung J.N. Cryogenic chilldown process under low flow rates // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2007. Vol. 50, № 19–20. P. 4011–4022.
8. Hu H., Chung J.N., Amber S.H. An experimental study on flow patterns and heat transfer characteristics during cryogenic chilldown in a vertical pipe // *Cryogenics (Guildf)*. 2012. Vol. 52, № 4–6. P. 268–277.
9. Johnson J., Shine S.R. Transient cryogenic chill down process in horizontal and inclined pipes // *Cryogenics (Guildf)*. 2015. Vol. 71. P. 7–17.
10. Darr S.R. et al. Numerical Simulation of the Liquid Nitrogen Chilldown of a Vertical Tube // *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.
11. Darr S.R. et al. An experimental study on terrestrial cryogenic tube chilldown II. Effect of flow direction with respect to gravity and new correlation set // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 103. P. 1243–1260.
12. Darr S.R. et al. An experimental study on terrestrial cryogenic transfer line

- chilldown I. Effect of mass flux, equilibrium quality, and inlet subcooling // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 103. P. 1225–1242.
13. Jin L., Cho H., Jeong S. Experimental investigation on line chill-down process by liquid argon // *Cryogenics (Guildf)*. 2019. Vol. 97. P. 31–39.
  14. Jin L. et al. Experimental investigation on chill-down process of cryogenic flow line // *Cryogenics (Guildf)*. 2016. Vol. 79. P. 96–105.
  15. Hartwig J. et al. Comparison of cryogenic flow boiling in liquid nitrogen and liquid hydrogen chilldown experiments // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 88. P. 662–673.
  16. Hartwig J., Darr S., Asencio A. Assessment of existing two phase heat transfer coefficient and critical heat flux correlations for cryogenic flow boiling in pipe quenching experiments // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 93. P. 441–463.
  17. Mohammed J. et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics in cryogenic chilldown of a helically coiled tube // *Sādhanā*. 2021. Vol. 46, № 1. P. 2.
  18. Ganesan V. et al. Universal Critical Heat Flux (CHF) Correlations for Cryogenic Flow Boiling in Uniformly Heated Tubes // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 166. P. 120678.
  19. Gömöry F., Šouc J. Stability of DC transport in HTS conductor with local critical current reduction // *Supercond. Sci. Technol.* 2021. Vol. 34, № 2. P. 025005.
  20. Muttakin M. et al. Study on optimized adsorption chiller employing various heat and mass recovery schemes // *Int. J. Refrig.* 2021. Vol. 126. P. 222–237.
  21. Sheng B. et al. A corresponding state equation for compressed liquid isochoric heat capacity of pure and mixture refrigerants // *Int. J. Refrig.* 2021. Vol. 124. P. 20–29.
  22. Hall D.D., Mudawar I. Critical heat flux (CHF) for water flow in tubes—I. Compilation and assessment of world CHF data // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2000. Vol. 43, № 14. P. 2573–2604.
  23. Mudawar I. Recent Advances in High-Flux, Two-Phase Thermal Management // *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 2013. Vol. 5, № 2.



24. Mudawar I., Anderson T.M. Parametric Investigation Into the Effects of Pressure, Subcooling, Surface Augmentation and Choice of Coolant on Pool Boiling in the Design of Cooling Systems for High-Power-Density Electronic Chips // *J. Electron. Packag.* 1990. Vol. 112, № 4. P. 375–382.
25. Mudawar I., Anderson T.M. Optimization of Enhanced Surfaces for High Flux Chip Cooling by Pool Boiling // *J. Electron. Packag.* 1993. Vol. 115, № 1. P. 89–100.
26. Liang G., Mudawar I. Pool boiling critical heat flux (CHF) – Part 1: Review of mechanisms, models, and correlations // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 117. P. 1352–1367.
27. Liang G., Mudawar I. Review of pool boiling enhancement by surface modification // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. Vol. 128. P. 892–933.
28. Shmerler J.A., Mudawar I. Local evaporative heat transfer coefficient in turbulent free-falling liquid films // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1988. Vol. 31, № 4. P. 731–742.
29. Lyu T.H., Mudawar I. Statistical investigation of the relationship between interfacial waviness and sensible heat transfer to a falling liquid film // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1991. Vol. 34, № 6. P. 1451–1464.
30. Mudawar I., Hout R.A. Measurement of mass and momentum transport in wavy-laminar falling liquid films // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1993. Vol. 36, № 17. P. 4151–4162.
31. Willingham T.C., Mudawar I. Forced-convection boiling and critical heat flux from a linear array of discrete heat sources // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1992. Vol. 35, № 11. P. 2879–2890.
32. Gersey C.O., Mudawar I. Effects of heater length and orientation on the trigger mechanism for near-saturated flow boiling critical heat flux—I. Photographic study and statistical characterization of the near-wall interfacial features // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1995. Vol. 38, № 4. P. 629–641.
33. Sturgis J.C., Mudawar I. Critical heat flux in a long, rectangular channel subjected to one-sided heating—II. Analysis of critical heat flux data // *Int. J. Heat Mass*

- Transf. 1999. Vol. 42, № 10. P. 1849–1862.
34. Wadsworth D.C., Mudawar I. Enhancement of Single-Phase Heat Transfer and Critical Heat Flux From an Ultra-High-Flux Simulated Microelectronic Heat Source to a Rectangular Impinging Jet of Dielectric Liquid // *J. Heat Transfer*. 1992. Vol. 114, № 3. P. 764–768.
  35. Johns M.E., Mudawar I. An Ultra-High Power Two-Phase Jet-Impingement Avionic Clamshell Module // *J. Electron. Packag.* 1996. Vol. 118, № 4. P. 264–270.
  36. Klinzing W.P., Rozzi J.C., Mudawar I. Film and transition boiling correlations for quenching of hot surfaces with water sprays // *J. Heat Treat.* 1992. Vol. 9, № 2. P. 91–103.
  37. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling – Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 115. P. 1206–1222.
  38. Mudawar I., Bowers M.B. Ultra-high critical heat flux (CHF) for subcooled water flow boiling—I: CHF data and parametric effects for small diameter tubes // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1999. Vol. 42, № 8. P. 1405–1428.
  39. Hall D.D., Mudawar I. Critical heat flux (CHF) for water flow in tubes—II. // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2000. Vol. 43, № 14. P. 2605–2640.
  40. Katto Y., Ohno H. An improved version of the generalized correlation of critical heat flux for the forced convective boiling in uniformly heated vertical tubes // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1984. Vol. 27, № 9. P. 1641–1648.
  41. Mercado M., Wong N., Hartwig J. Assessment of two-phase heat transfer coefficient and critical heat flux correlations for cryogenic flow boiling in pipe heating experiments // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. Vol. 133. P. 295–315.
  42. Devahdhanush V.S., Mudawar I. Review of Critical Heat Flux (CHF) in Jet Impingement Boiling // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 169. P. 120893.
  43. Cai C. et al. Assessment of void fraction models and correlations for subcooled boiling in vertical upflow in a circular tube // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 171. P. 121060.

44. Devahdhanush V.S. et al. Assessing advantages and disadvantages of macro- and micro-channel flow boiling for high-heat-flux thermal management using computational and theoretical/empirical methods // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 169. P. 120787.
45. Ferreira J., Kaviany M. Geometric-confinement suppression of flow-boiling instability using perforated wick: Part I CHF and conductance enhancement // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 159. P. 120080.
46. O'Neill L.E., Mudawar I. Review of two-phase flow instabilities in macro- and micro-channel systems // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 157. P. 119738.
47. Kim Y.J. et al. Flow boiling CHF experiment with sudden expansion tubes // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 114. P. 104557.
48. Lee H. et al. Experimental and computational investigation of vertical downflow condensation // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 85. P. 865–879.
49. Lee J., O'Neill L.E., Mudawar I. 3-D computational investigation and experimental validation of effect of shear-lift on two-phase flow and heat transfer characteristics of highly subcooled flow boiling in vertical upflow // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 150. P. 119291.
50. Lee J., O'Neill L.E., Mudawar I. Computational prediction of key heat transfer mechanisms and hydrodynamic characteristics of critical heat flux (CHF) in subcooled vertical upflow boiling // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 161. P. 120262.
51. Katto Y. Critical heat flux // *Int. J. Multiph. Flow.* 1994. Vol. 20. P. 53–90.
52. Liang G., Mudawar I. Pool boiling critical heat flux (CHF) – Part 2: Assessment of models and correlations // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 117. P. 1368–1383.
53. Bruder M., Bloch G., Sattelmayer T. Critical Heat Flux in Flow Boiling—Review of the Current Understanding and Experimental Approaches // *Heat Transf. Eng.* 2017. Vol. 38, № 3. P. 347–360.
54. Zhang R. et al. Investigation on the critical heat flux in typical 5 by 5 rod bundle at conditions prototypical of PWR based on CFD methodology // *Appl. Therm.*

Eng. 2020. Vol. 179. P. 115582.

55. Galloway J.E., Mudawar I. CHF mechanism in flow boiling from a short heated wall—II. Theoretical CHF model // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1993. Vol. 36, № 10. P. 2527–2540.
56. Sadasivan P., Unal C., Nelson R. Perspective: Issues in CHF Modeling—The Need for New Experiments // *J. Heat Transfer.* 1995. Vol. 117, № 3. P. 558–567.
57. Sefiane K. A new approach in the modeling of the critical heat flux and enhancement techniques // *AIChE J.* 2001. Vol. 47, № 11. P. 2402–2412.
58. CHF—Transition Boiling // *Boiling.* Elsevier, 2017. P. 145–368.
59. Emery T.S., Kandlikar S.G. Pool boiling with four non-ozone depleting refrigerants and comparison with previously established correlations // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2017. Vol. 85. P. 132–139.
60. Zuber N. Hydrodynamic Aspects Of Boiling Heat Transfer (Thesis). Oak Ridge, TN, 1959.
61. Lienhard J.H., Dhir V.K. Hydrodynamic Prediction of Peak Pool-boiling Heat Fluxes from Finite Bodies // *J. Heat Transfer.* 1973. Vol. 95, № 2. P. 152–158.
62. Dhir V.. Nucleate and transition boiling heat transfer under pool and external flow conditions // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 1991. Vol. 12, № 4. P. 290–314.
63. Wang Y. et al. Research on surface heat transfer mechanism of liquid nitrogen jet cooling in cryogenic machining // *Appl. Therm. Eng.* 2020. Vol. 179. P. 115607.
64. Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti–6Al–4V titanium alloy // *J. Manuf. Process.* 2016. Vol. 21. P. 172–179.
65. Arun Kumar S., Yoganath V.G., Krishna P. Machinability of Hardened Alloy Steel using Cryogenic Machining // *Mater. Today Proc.* 2018. Vol. 5, № 2. P. 8159–8167.
66. Park K.-H. et al. The effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V // *J. Mech. Sci. Technol.* 2015. Vol. 29, № 12. P. 5121–5126.
67. No Title.

68. No Title.
69. Lu T., Kudaravalli R., Georgiou G. Cryogenic Machining through the Spindle and Tool for Improved Machining Process Performance and Sustainability: Pt. I, System Design // *Procedia Manuf.* 2018. Vol. 21. P. 266–272.
70. Kaynak Y., Lu T., Jawahir I.S. Cryogenic Machining-Induced Surface Integrity: A Review and Comparison with Dry, MQL, and Flood-Cooled Machining // *Mach. Sci. Technol.* 2014. Vol. 18, № 2. P. 149–198.
71. No Title.
72. No Title.
73. Lequien P. et al. Hybrid experimental/modelling methodology for identifying the convective heat transfer coefficient in cryogenic assisted machining // *Appl. Therm. Eng.* 2018. Vol. 128. P. 500–507.
74. Pusavec F. et al. Analysis of the influence of nitrogen phase and surface heat transfer coefficient on cryogenic machining performance // *J. Mater. Process. Technol.* 2016. Vol. 233. P. 19–28.
75. No Title.
76. No Title.
77. Ying L. et al. Investigation of convection heat transfer coefficient of circular cross-section short pipes in hot stamping dies // *Appl. Therm. Eng.* 2018. Vol. 138. P. 133–153.
78. Panão M.R.O., Moreira A.L.N., Durão D.F.G. Thermal-fluid assessment of multijet atomization for spray cooling applications // *Energy.* 2011. Vol. 36, № 4. P. 2302–2311.
79. Mudawar I., Deiters T.A. A universal approach to predicting temperature response of metallic parts to spray quenching // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1994. Vol. 37, № 3. P. 347–362.
80. Wang F. et al. Diffusion thermodynamic behavior of milling Ti-6Al-4V alloy in liquid nitrogen cryogenic cooling // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. Vol. 95, № 5–8. P. 2783–2793.
81. Xue R. et al. Experimental study of liquid nitrogen spray characteristics in

atmospheric environment // Appl. Therm. Eng. 2018. Vol. 142. P. 717–722.

82. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности
83. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”
84. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
85. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".
86. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
87. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
88. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
89. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
90. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
91. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
92. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
93. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха
94. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
95. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
96. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры