

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа **ИШЭ**

Направление подготовки **Теплоэнергетика и теплотехника**

Кафедра **Теоретической и промышленной теплотехники**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Тепло- и массоперенос при плавлении льда в условиях высокотемпературного нагрева</b>

УДК 621.1.016.4:551.322:536.421.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ73	Слободин Виктор Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Сыродой С.В.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Куликова О.А.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель профиля	Борисов Б.В.	д. ф.- м.н, профессор		

Томск – 2019 г.

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
ПК1	способность и готовность использовать углубленные знания в области естественнонаучных и гуманитарных дисциплин в профессиональной деятельности
ПК2	способность использовать углубленные теоретические и практические знания, которые находятся на передовом рубеже науки и техники в области профессиональной деятельности
ПК3	способность демонстрировать навыки работы в коллективе, готовностью генерировать (креативность) и использовать новые идеи
ПК4	способность находить творческие решения профессиональных задач, готовностью принимать нестандартные решения
ПК5	способность анализировать естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности
ПК6	способность и готовность применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты, оценивать результаты выполненной работы
ПК7	способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов (в соответствии с целями магистерской программы)
ПК8	способность оформлять, представлять и докладывать результаты выполненной работы
ПК9	готовность использовать современные и перспективные компьютерные и информационные технологии
ПК10	способность формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования, мероприятиями по улучшению эксплуатационных характеристик, повышению экологической безопасности, улучшению условий труда, экономии ресурсов
ПК11	способность к определению показателей технического уровня проектируемых объектов или технологических схем
ПК12	готовность к участию в разработке эскизных, технических и рабочих проектов объектов и систем теплоэнергетики, теплотехники и теплотехнологии с использованием средств автоматизации проектирования, передового опыта их разработки
ПК13	готовность к проведению технических расчетов по проектам, технико-экономического и функционально-стоимостного анализа эффективности проектных решений
ПК14	готовность использовать прикладное программное обеспечение для расчета параметров и выбора теплоэнергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования
ПК22	готовность использовать современные достижения науки и передовой технологии в научно-исследовательских работах
ПК23	способность планировать и ставить задачи исследования, выбирать методы экспериментальной работы, интерпретировать и представлять результаты научных исследований, давать практические рекомендации по их внедрению в производство

ПП24	готовностью представлять результаты исследования в виде отчетов, рефератов, научных публикаций и на публичных обсуждениях
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
ОК1	способность совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности
ОК2	способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности в процессе изменения социокультурных и социальных условий деятельности
ОК3	способность свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности
ОК4	способность использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, в управлении коллективом, влиять на формирование целей команды, воздействовать на ее социально-психологический климат в нужном для достижения целей направлении, оценивать качество результатов деятельности
ОК5	способность проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности за свои решения в рамках профессиональной компетенции, способностью разрешать проблемные ситуации
ОК6	способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение, в том числе с помощью информационных технологий
ОК7	способность использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов
ОК8	способность использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки
ОК9	готовность вести библиографическую работу с привлечением современных информационных технологий, способностью анализировать, синтезировать и критически резюмировать информацию

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
Б.В. Борисов

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**Магистерской диссертации**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ73	Слободину Виктору Алексеевичу

Тема работы:

<b>Тепло- и массоперенос при плавлении льда в условиях высокотемпературного нагрева</b>	
Утверждена приказом ректора (дата, номер)	№ 837/с от 04.02.2019

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>	Объектом исследования являются кристаллы льда различных компонентных составов.  Предмет исследования – экспериментальное и теоретическое исследование процессов тепло- и массопереноса протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений (плавление льда, испарение воды) при движении частиц льда в среде высокотемпературных газов.
<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;</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Аналитический разбор литературы</li><li>• Подготовка частиц льда для проведения эксперимента</li><li>• Проведение экспериментальных исследований плавлений частиц льда в высокотемпературной газовой среде</li></ul>

<i>содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Исследования процессов плавления при добавлении в воду различных примесей</li> <li>• Формулировка математической модели</li> <li>• Верификация математической модели</li> <li>• Теоретические исследования</li> <li>• Выводы по результатам исследования</li> </ul>
---	--

<b>Перечень графического материала</b>	17 слайдов
--	------------

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	Куликова О.А.
Английская часть	Черемисина И.А.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Глава 1. Природные газогидраты
--------------------------------

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	15.10.2018 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	Сыродой С.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ73	Слободин Виктор Алексеевич		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ73	Слободину Виктору Алексеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>НОЦ им. И. Н. Бутакова</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР: Тепло- и массоперенос при плавлении льда в условиях высокотемпературного нагрева

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Месячный должностной оклад доцента 33664 руб., магистранта 12664 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации – 20%, нормы премии по счету заработной платы – 0,3; коэффициент доплат и надбавок – 0,3; районный коэффициент – 1,3; коэффициент дополнительной зарплаты – 15%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисление в социальные фонды принимаются равными 27,1%

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Потенциальные потребители результатов исследования Разработка анализа конкурентоспособности Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Проведение оценки ресурсной и финансовой эффективности исследования.

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ
5. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ73	Слободин Виктор Алексеевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ73	Слободину Виктору Алексеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Теоретическая и промышленная теплоэнергетика
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема НИР:

<b>Тепло- и массоперенос при плавлении льда в условиях высокотемпературного нагрева</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является лаборатория №107, 4-го уч. корпуса, где производились исследования. Она оборудована письменным столом, персональными компьютерами, высокотемпературной печью, топливом и электронной аппаратурой. В данной лаборатории было проведено исследование фазовых превращений льда в высокотемпературной газовой среде.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой Кодекс РФ, N 197</li> <li>Приведены перечень НТД, используемых в данном разделе, организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Химическое воздействие;</li> <li>– Опасность поражения электрическим током;</li> <li>– Отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– Превышение уровня шума;</li> <li>– Неправильная или недостаточная освещенность рабочего места.</li> <li>– Высокая температура изделия</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Рассмотреть влияние исследования при плавлении частиц льда в высокотемпературной среде на экологическую обстановку.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Пожар (причиной возникновения пожара может стать нарушение противопожарного режима, ненадлежащее соблюдение профилактических мероприятий, отсутствие первичных средств пожаротушения).
---	--

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Куликова О.А.	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ73	Слободин Виктор Алексеевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 134 страницы, 21 рисунок, 27 таблиц, 159 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: теплоперенос, теплообмен, излучение, газовый гидрат, математическое моделирование, экспериментальные исследования, временные характеристики.

Объектом исследования является кристалл льда.

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование процессов тепло- и массопереноса протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений (плавление льда испарение воды) при движении частиц льда в среде высокотемпературных газов.

Проводились экспериментальные исследования по определению зависимостей временных характеристик процессов испарения водяной пленки и зажигания от температуры окружающей среды.

В результате исследования получены времена нагрева, плавления и испарения при различных температурах, при различных размерах частиц. Разработана математическая модель, в полной мере учитывающая комплекс процессов испарения, нагрева и плавления частиц льда.

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: газовые горелки.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	13
ГЛАВА 1. ПРИРОДНЫЕ ГАЗОГИДРАТЫ .....	18
1.1 Сжигание гидрата метана с использованием гранул различного состава .....	18
1.2 Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды.....	21
1.3 Свойства газовых гидратов .....	24
1.4 Научные исследования в области изучения газовых гидратов.....	26
1.5 Газовые гидраты озера Байкал.....	27
1.6 Поиски и открытия поддонных газогидратов.....	31
1.7 Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования их распространения.....	32
1.7.1 Особенности газогидратопроявлений в очагах разгрузки флюидов в Охотском море.....	32
1.7.2 Механизмы формирования газовых гидратов в Охотском море .....	35
1.7.3. Термобарические параметры и запасы газогидратов Охотского моря. ....	35
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	37
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ЛЬДА .....	39
3.1 Анализ и обсуждение результатов экспериментального исследования .....	39
3.2 Влияние размера частицы.....	43
3.3 Сравнительный анализ и обсуждение результатов теоретического и экспериментального исследований .....	46
ГЛАВА 4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	49
4.1 Физическая постановка .....	49
4.2 Математическая постановка .....	50
4.2.1 Стадия прогрева капли .....	50
4.2.2 Стадия испарения капли.....	53
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ... ..	57
5.1 Предпроектный анализ... ..	58
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	58

5.1.2 Анализ конкурентных решений.....	59
5.1.3 SWOT-анализ .....	60
5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	62
5.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	63
5.2 Инициация проекта.....	64
5.2.1 Цели и результаты проекта .....	64
5.2.2 Организационная структура проекта .....	65
5.2.3 Ограничения и допущения проекта.....	66
5.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	66
5.3.1 Иерархическая структура работ проекта .....	66
5.3.2 План проекта .....	68
5.4 Бюджет научного исследования .....	70
5.4.1 Стоимость экспериментальной установки .....	70
5.4.2 Основная заработная плата .....	72
5.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды.....	75
5.4.4 Накладные расходы .....	76
5.4.5 Организационная структура проекта .....	77
5.4.6 План управления коммуникациями проекта .....	78
5.4.7 Реестр рисков проекта.....	78
5.5 Оценка сравнительной эффективности исследования .....	79
<b>ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....</b>	<b>83</b>
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	85
6.1.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	85
6.1.2 Производственная безопасность.....	86
6.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	88
6.2.1 Превышение уровня шума .....	88
6.2.2 Химическое воздействие.....	88
6.2.3 Отклонение показателей микроклимата.....	89
6.2.4 Недостаточная освещенность рабочего места.....	90

6.2.5 Опасность поражения электрическим током .....	91
6.2.6 Высокая температура изделия.....	93
6.3 Экологическая безопасность.....	93
6.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду .....	93
6.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.....	94
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	94
6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	95
6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований .....	95
6.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
Приложение А.....	115

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день природный газ, в качестве топлива используется практически во всех регионах России. На начало 2016 года уровень потребления газа в среднем по Российской Федерации составил 62%. При этом в городах уровень потребления газа вырос за последние несколько лет в 11 раз, а в сельской местности уровень потребления газа поднялся с 36% до 44% общего потребления.

В настоящее время природный газ является легкодоступным и недорогим топливом как для производителей, так и потребителей тепловой и электрической энергии [1]. Также возведение ТЭЦ, использующих в качестве топлива природный газ, запрашивает сравнительно небольшие капиталовложения чем ТЭЦ, работающие на твердом топливе.

В сравнении электрических КПД теплоэлектростанций, работающих на газе и твёрдом топливе, то КПД станции, использующих газ, выше на 26-27%. Строительство ТЭЦ использующих газ, вложения средств на 1 МВт/час установленной мощности меньше на 50% чем угольная и 20% чем атомной соответственно. Теплота сгорания газового топлива намного выше, чем у угля.

Газовое топливо намного чище, по сравнению с другими углеводородными теплоносителями. Выделение углекислого газа во время сгорания газа намного меньше, нежели у других традиционных источников, (на пример углем), что в целом фактически даёт намного меньше вредного влияния на окружающую среду[2-4]. У газовой ТЭЦ в действительности нет вредных выбросов в атмосферу в отличие от угольной, и переход с угля на газ непосредственно приведет к резкому снижению выбросов углекислого газа. Исходя из всего вышеперечисленного, переход с угольных мощностей на газовые будет способствовать мгновенному снижению выбросов двуокиси углерода на 50–70% [5-7]. Сегодня существует проблема «обрыва пламени» для

газовых горелок, вследствие использования на ТЭЦ природного газа. Учитывая большое распространение природного газа в качестве топлива на ТЭЦ, данная проблема является одной из актуальнейших [8].

Как известно, сжигание природного газа происходит в газовых горелках. Благодаря устойчивому пламени в газовой горелке можно достичь динамического баланса между готовностями пламени перейти навстречу движению газозадушной смеси и потока направить пламя от горелки в топку [9-11].

К границам устойчивой работы горелок можно отнести проскок и отрыв пламени. Пламя втягивается в горелку и нарушается стабилизация горения газа вследствие падения подачи и скорости выхода смеси. Вследствие повышенной скорости движения смеси будет происходить переход фронта пламени в направлении движения, затем будет отделяться пламя от горелки и, как следствие оно будет погашено. Будет наблюдаться процесс отрыва пламени. Проскок пламени будет возникать при горении смеси в самой горелке [12].

Исходя из выше перечисленного, можно сказать, что поддержание устойчивого горения пламени обеспечивается вследствие определенной пропорцией между скоростью его распространения, а также скоростью поступления смеси до места горения. Существует зависимость устойчивости самого пламени от соотношения объемов газа и воздуха в смеси. Пламя будет стабильнее, если газа будет больше [13-14].

Образование оксидов углерода, а также погашение пламени будет возникать при неполном сгорании газа, последнее в свою очередь обусловлено горением газа во время проскока пламени в горелке [15-16].

«Обрыв факела», образующийся попаданием частиц льда в активную зону горения (преимущественно в зимнее время) становится причиной частых нерегламентированных остановов энергетических установок [17]. Результатом происхождения данных технических происшествий является существенное

снижение надежности энергоснабжения объектов, что может стать причиной аварии.

При работе редуцирующего пункта, основным фактором, оказывающим влияние на него, будет являться компонентный состав газа [18-19]. В случаях, когда температура близка к  $0^{\circ}\text{C}$ , начинается процесс формирования гидратов, означающий возникновение соединений углеводородов, неустойчивых с водой [20].

Вследствие процессов плавления и испарения соответственно частиц льда и образующихся затем капель воды, происходит нарушение работы горелочных устройств котельных агрегатов. Это происходит в условиях, которые являются иногда недостаточными для того, чтобы подавить процесс горения газозадушной смеси. К такому условию относится попадание (при сравнительно низких массовых концентрациях) частиц льда в изначальное газовое топливо [21]. На данный момент процессы фазовых переходов частиц льда во время их движения через высокотемпературные продукты горения не исследованы.

Учитывая всё это, математические модели, описывающие весь комплекс физико-химических процессов, которые протекают при интенсивных фазовых превращениях мелкодисперсных частиц льда в условиях высоких (более  $1000^{\circ}\text{C}$ ) температур внешней среды еще не разработаны. При колоссальной концентрации частиц льда снижение температуры пламени может быть достаточным для условий прекращения горения. В связи с этим, экспериментальные и теоретические исследования основных закономерностей фазовых превращений и тепломассопереноса в условиях движения частиц льда через высокотемпературные газы является актуальной, не решенной до настоящего времени задачей [22].

**Актуальность задачи** данной работы объясняется также и целесообразностью изучения закономерностей фазовых превращений газовых гидратов при их конверсии.

Есть гипотеза о механизме снижения температуры пламени при переходе воды из кристаллического в парообразное состояние в условиях больших темпов нагрева. В основе данной гипотезы лежит положение о главной роли процесса плавления льда и испарения его расплава в образовании стока теплоты, который приводит к подавлению горения в результате резкого снижения температуры в области химического взаимодействия окислителя и горючего. В настоящее время экспериментальные данные о закономерностях фазовых превращений и тепломассообмена при взаимодействии частиц льда с высокотемпературными газами отсутствуют. Нет публикаций по поводу информации также об интегральных характеристиках процессов плавления частиц льда при высоких темпах нагрева и последующего испарения расплава [24-25]. В результате проведения ряда экспериментальных исследований сформулирована физическая модель рассматриваемого процесса и определен ряд его характеристик. Также, сформулирована математическая модель процессов фазовых превращений льда в условиях интенсивного прогрева и решена соответствующая задача тепломассопереноса в частице и ее малой окрестности [26]. Результаты экспериментальных исследований будут использованы для верификации разработанной математической модели посредством сравнения по ряду интегральных характеристик процесса (времена нагрева и плавления, скорости испарения). На данный момент отечественной и зарубежной литературе нет публикаций с результатами решения задач, аналогичных постановке и методам решения [27]. Высокий уровень планируемых результатов косвенно можно подтвердить публикациями статей авторов проекта по предлагаемой тематике журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций («Тепловые процессы в технике» «Пожаровзрывобезопасность», «Безопасность труда в промышленности», «Инженерно физический журнал» НАН Беларуси, «Бутлеровские сообщения») в 2012-2013 гг. [28]. Это является основанием для вывода о том, что планируемые результаты своему уровню превосходят аналогичные Российские разработки. Анализ содержания основного международного научного журнала по

проблематике проекта «Heat and mass transfer» за последнее время показывает, что в данном журнале не существует статей по тематике проекта. Вследствие этого можно говорить о том, что планируемые результаты по своему уровню значительно превосходят зарубежные разработки [29].

# ГЛАВА 1. ПРИРОДНЫЕ ГАЗОГИДРАТЫ

## 1.1 Сжигание гидрата метана с использованием гранул различного состава

К природным газогидратам относятся скапливание гидратов, образованные без вмешательства людей. Такие скапливания находятся на Земле, а также в других планетах во вселенной. Учитывая то факт, что природные газогидраты получили большое распространение, имеющие колоссальный потенциал минеральной энергии, пребывание их на Земле, было доказано лишь в 60-х годах прошедшего века [30-31]. Существованию газовых гидратов и их открытию, поспособствовали: навык борьбы с промышленными гидратами, собранный в Шебелинском газопромысле, и их познание в лабораторных условиях во время работы над первой диссертацией, и анализирование неестественных условий пребывания залежей углеводородов в криолитозоне, после обнаружения в мерзлых породах Сибири нехарактерных толщ [32].

Основаниями для возникновения газогидратов являются: наличие газа, воды, определенное давление и температура одновременно. Никаких химических связей между молекулами нет [33]. Молекулы воды объединены между собой водородной связью, легко распадающейся при уменьшении давления или роста температуры [34].

Извлекаемые запасы гидратированного газа зависят от множества факторов, наиболее важными из которых можно назвать: глубина и размер зоны образования гидратов; удельное содержание гидрата в разрезе пород; толщина продуктивных пластов; размер и степень переохлаждения залежи; суммарные запасы газа в залежи; эффективность применяемой технологии разработки [35].

Газовые гидраты обладают уникальными свойствами. К примеру, 207 объемов метана могут быть связаны одним объемом воды при переходе в гидратное состояние. При этом, ее удельный объем возрастает на 26% (при замерзании воды ее удельный объем возрастает на 9%). 1 м<sup>3</sup> гидрата метана при

$P=26$  атм и  $T=0$  °С содержит 164 объема газа. При этом на долю газа приходится 0,2 м<sup>3</sup>, на воду 0,8 м<sup>3</sup>. Удельный объем метана в гидрате соответствует давлению порядка 1400 атм. Разложение гидрата в замкнутом объеме сопровождается значительным повышением давления. Гидраты обладают высокими электросопротивлением и акустической проводимостью. Это позволяет создать эффективные средства их поисков и разведки. Они практически непроницаемы для воды и газа, способствуя тем самым, сохранности углеводородов в недрах Земли во времени [36-37].

Газовые гидраты при естественных и искусственных условиях образуются при высоких давлениях окружающей среды или низких температурах, которые обеспечивают их равновесные состояния. Их структуры имеют следующие типы: кубический (sI); кубический (sII); и гексагональный (sH) [38]. Залежи газовых гидратов, найденные на Земле, имеют колоссальные запасы природного газа. На ближайшее время запланирована усиленная добыча газа из отложений гидратов. В некоторых статьях описано получение гидрата из морских отложений. [39]

Сейчас охват газовых гидратов распространяется как на глобальные энергетические ресурсы, так и на новейшие эффективные технологии [40]. Рассматривались высокоэнергетические технологии, использующие двигатели-генераторы с газообразным гидратом CO<sub>2</sub>. Особое внимание было уделено проблемам хранения и транспортировки гидратных материалов в резервуарах, а также к вопросу безопасности.

Не существует на данный момент физико-математической модели, которая описывала бы процесс диссоциации гидрата CH<sub>4</sub>. Это в свою очередь, мешает нам двигаться вперед. Обязательно нужно уменьшить транспортные расходы. Температура хранения гидратных гранул тесно связана со стоимостью технологии. Достижение самых малых скоростей распада гидрата CH<sub>4</sub> было возможно при температуре примерно 263 К. Помимо этого, существует зависимость усиления разложения газовых гидратов от размеров зерен, толщины порошкового слоя, и разности температур и давлений. Такие

факторы как большое влияние толщины слоя и диаметр частицы сильно оказывают влияние на механизм самосохранения. Необходимо указать разные типы диффузии во время формирования гидрата  $\text{CH}_4$  и при его распаде. Инерция среды и газодиффузионный поток в значительной степени ограничивают скорость формирования гидрата газа и его рост как в твердой грануле, так и через водную пленку. Мисюрой и Конеко было представлено внешнее теплообмен, оказывающее огромное влияние на характер распада гидрата  $\text{CH}_4$ . Было продемонстрировано, что есть зависимость как количественного характера распада, так и качественного характера диссоциации от теплообмена. Власовым было произведено экспериментальное исследование, показывающее рост гидрата газа с учетом диффузии [41]. Энергия активации и внутренняя кинетическая константа будут играть важную роль. От них зависит распад гидрата газа на поверхности частиц при положительных температурах. В данном случае происходит перенос газового гидрата в воду и газ. Здесь нет пор в образце. Совсем противоположное поведение газогидрата наблюдается при отрицательных температурах. Образование пористости обусловлено образованием газовых гидратов и их разложением.

Экспериментальные исследования по образованию мезо- и макропор на поверхности твердых гранул при помощи сканирующей электронной микроскопии было продемонстрировано Kuhs et al. От вида гостя зависит размер поры. В каркас хозяина встраивается молекула гостя (в данном случае молекулы воды). Пористостью производится контроль кинетического поведения образцов. При моделировании это необходимо учесть. Мезо- и макропорами обладают природные газогидраты, добыча которых производится как на морском дне, так и на континенте [42]. От удельной площади поверхности будут зависеть скорости реакции между газом и твердой пористой частицей [43]. Пористость регулирует скорость диссоциации гидрата клатрата при самосохранении. Основным фактором, который будет являться ограничением для поведения распада, это фильтрация внутри пористой частицы. Пористость нужно учитывать во время химических превращения и при сжигании твердого

топлива [44]. Охват сжигания газовых гидратов относится как к проблеме, так и к вопросам касательно безопасности.

Критическая концентрация из горючего газа может стать причиной многих пагубных последствий (спонтанное загорание  $\text{CH}_4$  и его взрыв). С формированием водной пленки на поверхности твердого порошка, льда и метана, начинается распад гидрата газа [45]. Здесь имеет место гетерогенная система с газом гидрат-лед-вода-метан.

Горение гидрата  $\text{CH}_4$  в присутствии вынужденного пристеночного ламинарного потока изучалось в работах. Скорости распространения пламени были изменены от 6 мм / сек до 1 м / с, когда температура образца изменялась от 193 К до 263 К [46]. Этот факт связан с самосохранением.

## **1.2 Технологии воздействия на нетрадиционные углеводороды**

Стабильность газовых гидратов наблюдается при некоторых термобарических условиях газа и воды. Они характерны для районов вечной мерзлоты, и для осадков, находящихся под дном водоёмов, глубина которых около 450-500 мм. Обычно местом их обнаружения являются некоторые континентальные окраины и осадочные бассейны. В последних функционируют напряжения сжатия, основной причиной которых являются продления сдвиговых разломов.

Особенность газовых гидратов состоит в том, что они могут накапливать большое количество газа в небольших объёмах. Поэтому они обладают большим ресурсным запасом [47]. Но все оценочные данные по потенциалу газовых гидратов были определены приблизительно. Диапазон варьирования колеблется от максимальных, которые по всей видимости завышены, и произведены без учета геолого-геохимических ограничений, до минимальных, которые были сделаны, учитывая немалое количество факторов, являющихся ограничениями для формирований газовых гидратов. Несмотря на всё это, все нынешние оценки, сделанные учёными различными способами, сходятся во мнениях, что

геологические запасы газа в гидратном виде колоссальны:  $3.1 \cdot 10^{13}$ - $3.4 \cdot 10^{16}$  на суше  $3.1 \cdot 10^{16}$ - $7.6 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>- океанические гидраты. Если хотя бы незначительную часть (10%) этих запасов принять как извлекаемые, то они все равно превзойдут современные запасы природного газа по всей Земле, примерно в два раза [48].

По мнению многих учёных, содержание углерода в природных гидратах метана, по сравнению с каменным углем почти в 2 раза больше. Из этого следует, что гидраты метана являются главным источником углерода в земной коре. Сегодня можно говорить о том, что гидраты метана в поддонных осадках являются возможными источниками энергии в будущем [49].

К ещё одному значительному аргументу в пользу разведывания и разработки газогидратных залежей (ГГЗ) относятся небольшие глубины местоположения (если сравнивать с традиционным газом), а также их широкая распространённость в приповерхностных слоях литосферы [50].

При этом во многом не понятны на данный момент механизмы и условия по формированию газогидратных залежей в мире, и характер их поведения в геофизическом диапазоне времени. Нехватку способов по поиску газогидратных залежей и сортирование газогидратных отложений по коллекторским свойствам, следуют считать немаловажным ограничением для исследований. Сегодня не существует подхода к ранжированию газогидратных залежений по способам их разрабатывания [51].

Самым вероятным подходом к решению вышеописанных проблем является классификация газогидратных залежей по принципам, которые отражают геофизическую способность того или иного вида газогидратных скапливаний, а также ресурс их добычи.

Помимо этого, в классификации обязана присутствовать информация, которая позволит выбрать тот или иной способ создания ГГЗ, зависящий от её вида [52].

Метановые гидраты проявляют метастабильность поблизости от подошвы зоны стабильности. Если наблюдается рост уровня моря и возрастания гидростатического давления на его дне или падения температуры осадков

начинает увеличиваться мощность слоя. В нём присутствуют газогидраты, в том случае, если растворённый метан в нужных количествах в воде будет находиться ниже границы зоны стабильности.

При падении уровня моря (понижение гидростатического давления) или росте температуры осадков, в состав которых входят газогидраты, могут происходить нарушения условий стабильности клатратов. В этом случае вверх будет смещена нижняя граница стабильности, и поэтому начнется процесс диссоциации газогидратов, находящихся тут [53].

Газогидраты будут диссоциировать, сопровождаясь с выделением свободного газа, который накапливается собственно под нижней границей зоны стабильности. В 1 м<sup>3</sup> газогидрата присутствует до 164 м<sup>3</sup> метана (газовая фаза) и 0,87 м<sup>3</sup> воды. Из этого следует, что этого намного больше, по сравнению с метаном, в единице объёмов газовых резервуаров, скажем на глубинах до 1.5 км под дном. При диссоциации клатратов в осадках будет происходить неестественно высокая пористость на подходящей глубине. Также это приводит к выделению громадного количества воды [54]. Поэтому дестабилизация газовых гидратов станет причиной ухудшения прочностных свойств формирований осадков в месте диссоциации. Последствия будут катастрофическими: к ним относятся обвал склона, просадка грунта и громадные оползни на континентальном склоне. Многие из этих явлений проявили себя в некоторых районах Мирового Океана.

Если в среде осадков есть способ для пропуска метана (зона интенсивного образования разломов в месте диссоциации газовых гидратов), то он, поднимаясь может выходить в воду, и оказывать влияние на её биологическое сообщество, а далее и в атмосферу. Проникая в верхние слои атмосферы метан, в значительной мере усиливая парниковый эффект, играет, тем самым, заметную роль в изменениях климата во всем мире. Его умение оказывать воздействие на глобальное потепление почти в 25 раз превышает эквивалентную способность углекислого газа.

Главным геологическим методом, свидетельствующем о наличии газовых гидратов, и возможности их получить, является сейсмическое моделирование МОВ. Обычно на сейсмических разрезах в виде специфической отражающей границы, выступает нижняя граница зоны стабильности газогидратов [55]. Она получила название BSR (bottom simulating reflector – кажущаяся отражающая граница на сейсмических записях). Она может быть выявлена по целому ряду некоторых отличительных признаков. Соответствие позиции глубине подошвы термобарической зоны стабильности газогидратов является неизменным признаком BSR. Она определяется по геотермическим данным и, в большинстве случаев, расположена на глубинах 250-500 м ниже дна моря [56].

Невзирая, на глобальную распространённость зоны, в которой газовые гидраты могли бы иметь стабильность в ней, всё-таки распределение их представлено в виде скоплений, залежи которых находятся в указанных глубинах.

К ещё одному виду скоплений относятся те, что находятся непосредственно на дне очагов разгрузки флюидов, в том случае, что там есть термобарические условия стабильности газогидратов. Учитывая то, что под нижней границей этих скоплений, свободного газа в осадках возможно нет, не появляются условия формирующих, четких и специфических сейсмических отражений, которые подобны BSR [57].

Множество природных газов (пропан, бутан, этан, гексан, изобутан и т. д.) формируют гидраты, существующие при определённых термобарических условиях. К основным и широко распространённым газогидратам, встречающихся в природе, относятся метановые гидраты, и диоксиды углерода [58].

Во время добывания газа, гидраты обычно формируются в промышленных коммуникациях, магистралях, и в скважинах. Пропускная способность быстро сокращается во время отложений гидратов на стенках труб. Разные ингибиторы внедряются в трубопроводы в качестве борьбы с формированием гидратов на всех предприятиях газовой промышленности. К ним

можно отнести метанол, различные гликоли, раствор  $\text{CaCl}_2$ . Также стараются придерживаться что бы у потока газа температуры была больше, по сравнению с температурой формирования гидратов [58]. Производится это посредством подогревателей, теплоизоляционных материалов для трубопроводов, а также выбор режима эксплуатации. Все они необходимы для того, чтобы температура была на максимуме у газового потока. Чтобы предупредить появления формирования гидратов в магистральных газопроводах чаще всего используется газоосушка.

### **1.3 Свойства газовых гидратов**

Природным газогидратом является метастабильное вещество. Во время процесса формирования, а также их пиролиза газовые гидраты зависят от некоторых параметров [59]. К ним относятся: температура, давление, химический состав газа и воды, и др.

Характеристика гидратов обладает большим разнообразием. На данный момент существуют три главных типа кристаллов:

- Массивные кристаллы. Здесь на всей поверхности кристалла в его образовании участвует сорбция газа и воды.
- Вискерные кристаллы. Здесь основную роль играет туннельная сорбция молекул ко дну произрастающего кристалла.
- Гель-кристаллы. Образуются в объёме воды из газа растворимого в ней, и в том случае, если условия возникновения гидратов будут достигнуты.

В слоях горных пород гидраты обычно распределяются по-разному. Они могут представлять собой микроскопические включения, а также иметь вид формирующихся частиц крупных размеров, практически до протяжённых пластов многометровой толщины.

Объём газогидратов обладает клатратной структурой. Из этого следует, что в состав одной единицы его объёма входит в среднем 165-175 объёмов чистого газа. Плотность воды и гидрата имеют различные значения, у последнего она ниже и составляет примерно 900 кг/м [60-61].

#### **1.4 Научные исследования в области изучения газовых гидратов**

За последнее время наблюдается большое усиление интереса к проблеме газовых гидратов по всему миру [62]. Увеличение активности по отношению к исследованиям, можно объяснить на основании определённых факторов:

1. Активирование поисков по нахождению альтернативных источников углеводородного сырья в государствах, не имеющих запасы энергоносителей, поскольку газовые гидраты имеют отношения к нетрадиционным источникам углеводородного сырья, промышленные исследования, которых скорее всего будет начато в ближайшие время;

2. Потребность в оценивании роли газогидратов на поверхностях в геосферных слоях, преимущественно, учитывая их вероятное воздействие на изменения климата во всём мире;

3. Исследование закономерностей формирования и пиролиза газовых гидратов в недрах Земли, с задачей аргументирования поисковых работ и разведывания традиционных углеводородных месторождений (в качестве маркеров простых нефтегазовые месторождения, залежи которых находятся очень глубоко, могут быть использованы природные гидратопроявления);

4. Активность, связанная с освоением углеводородных залежей, находящиеся в сложных естественных условиях (глубоководный шельф, арктические зона), в которых очень усугублена проблема техногенных газогидратов;

5. Обоснованность понижения эксплуатационных затрат в случае возникновения гидратов на предприятиях газовой промышленности, благодаря переходу на энерго-ресурсосберегающие, а также экологически чистые технологии [63-64];

6. Возможное потребление газогидратных технологий во время хранения, а также и транспортировки природного газа.

Разработка и конструирование двух специальных камер, с помощью которых проводились эксперименты по исследованию газовых гидратов и пород,

содержащих гидраты, проводилась 1986--1988 гг. Благодаря одной из них, при помощи специального оптического микроскопа, можно было производить наблюдения за процессами образования и разложения гидратов углеводородных газов [65]. Изучать процессы формирования и разложения гидратов, строение которых определялось сменностью внутренней гильзы, в породах разного состава, можно было при помощи второй камеры.

### **1.5 Газовые гидраты озера Байкал**

К наиболее значимым нынешним достижениям российских учёных, которые исследуют газогидраты несомненно относится открытие метанового гидрата в месте осадков озера Байкал. К этому времени были известны залежи метановых гидратов в осадках морей на окраине. В конце XX в. большая организация в состав которой входили группы исследователей из Бельгии, России, США и Японии экспериментально доказала присутствие метановых гидратов в осадках озера Байкал [65].

Образование газогидратов в осадках водоёмов сопровождается совокупностью определенных условий:

1. Низкая температура, которая может быть и не ниже нуля.
2. Высокое давление.
3. Необходимые количества газа (к примеру, метан) и воды.

Зона стабильности газогидратов, границы которой могут быть найдены на основании фазовых диаграмм, определяется термобарическими условиями. Накопив данные о рельефе, температуре, а также о тепловом потоке сквозь днище, была произведена идентификация их существования в осадках озера в 70-80 гг. минувшего века. На данный момент известно, что на глубинах больше 300 м среднегодовая температура незначительно меняется, и составляет примерно  $(33 \pm 0.2)$  °C. Судя по фазовой диаграмме, возможность гидратообразования метана, при такой температуре, может произойти при давлении 3,5 МПа [66].

Это давление может быть обеспечено слоем воды, толщина которой примерно 350-400 м. Таким образом, необходимые для формирования

метангидратов термобарические условия, присутствуют в донных отложениях по всему глубоководью (примерно 450 м) в озере Байкал. Причём наблюдается совпадение донной поверхности с верхней границей зоны стабильности [67]. Местоположение нижней границы зоны стабильности может быть проанализировано посредством фазовой диаграммы по температуре осадков. Следует подчеркнуть, что на основании значений теплового потока, определение которого сегодня было найдено примерно в 800 пунктах дна озера Байкал, расчёт поддонных температур производится весьма ненадёжно [68].

В 1997 г. была впервые опубликована прогнозная карта глубины местоположения нижней границы зоны стабильности газогидратов в осадках всего озера Байкал. Существенная мощность зоны стабильности метановых гидратов присуща Байкалу. В общей сложности существует корреляция мощности со всей глубиной озера: наибольшие показатели мощности зоны стабильности (больше 600 м) по прогнозам находятся в Центральной глубокой впадине, если говорить о Северной котловине, то в её осадках такой слой превышает 250 м только в некоторых местах. Выклинивание газогидратного слоя фиксируется на озере, глубины которого менее 400 м, и в зонах геотермальных аномалий. Необходимо обратить внимание на том, что геотермический прогноз способен только произвести обозначения слоя осадков, в котором присутствуют термобарические условия, необходимые для возникновения газогидратов, но не предоставляющий сведений о присутствии либо неимении реальных гидратов [69].

Несколько подводных скважин пробурили в ходе осуществления международной программы “Байкал-Бурение” в 1993-1999 гг. В 1997 г. в центральной части Южно-Байкальской котловины была пробурена одна из данных скважин. Именно здесь, судя по прогнозам геофизических данных, находился наиболее мощный газогидратный слой (300-350м). Стоит подчеркнуть, что вследствие сложности условий геологии, скважина была пройдена только до глубины 225 м. Из верхней части ствола этой скважины (до 42 м) и с глубин 121 и 161 м, удалось поднять вверх керн. Геологический разрез,

который удалось восстановить по фрагментам керна, и по результативным данным каротажа, представлялся сложенным, в основном, песчаными турбитидами (слой зернистого песка с толщиной 3-90 см) с прослойками тонких глин. Отложения турбитидов становятся естественными ловушками газа вследствие присутствия прослоек плотных глин. Газ, может переходить в газогидратную форму, если накапливается при благоприятных термобарических условиях [69]. Нахождение газогидраты в верхней части разреза не увенчалось успехом, однако, время от времени из ствола скважины отмечалось усиленное выделение газа (в частности, метана, 74% об.). И лишь образцы керна, поднятые с глубин 121 и 161 м, температура которых была выше 8-9 гр., представляли собой смерзшийся песчано-алевритовый материалы. Этот материал выделялся во время нагревания газа. Оттаивая, данные образцы утрачивали прочность и в итоге рассыпались. Учитывая то, что этот керн был взят из областей положительных температур, он был замерзшим, при поднятии на поверхность. Это и являлось очевиднейшим признаком присутствия газовых гидратов в осадке [70]. Поднимая образцы на поверхность, разложения газовых гидратов происходили с поглощением тепла, которое приводит к падению температуры осадков на 10-15 гр, их замораживанию, а также к замедлению последующего распада гидратов из-за возникновения эффекта консервации. Скорее всего, эти явления начинали происходить во время бурения скважины BDR-97. Исследуя один из образцов керна, собственно на борту бурового комплекса пришли к выводу, что выход газа из данного образца превысил в 10 раз газовыделение из осадков остальных подводных скважин. Вследствие совокупности данных пришли к заключению о том, что в данных образцах керна содержатся газогидраты. Были предприняты меры, чтобы их сохранить и дать возможность провести комплексные исследования [71].

Первые несколько дней образцы керна находились в морозильной камере, потом они были помещены в жидкий азот. Далее это материал отправлялся в лаборатории НИИ Иркутска, Новосибирска, а также Японии. Там он изучался при помощи различных физико-химических методов.

В ходе комплексных исследований проводились измерения объёма газа, который выделялся при оттаивании осадка, и газовой смеси хроматографическим, изотопным и некоторыми другими способами. Найдены электропроводимость, ионный состав поровых труб [72].

Доминирующим в составе водной вытяжки керна являются катионы аммония и гидрокарбонат-анионы, свидетельствующие о присутствии восстановительных условия в осадке. Содержание хлорид-ионов здесь примерно в 1.5-2 раза ниже, если сравнивать с поровыми водами кедра, взятых из скважины BDR-93 на глубине более 50 м, в состав которых не входят газогидраты. Низкая концентрация хлорид-ионов в поровых водах осадков считается косвенным признаком наличия газогидратов в осадках.

Комплексные исследования стали подтверждением присутствия в керне метангидратов ( $\text{CH}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) с содержанием около 3,3% (масс). Помимо этого, в наличии есть углекислый газ, и в малых количествах этан и пропан (<0,005%). Нет сомнений в том, что большая часть находившегося в породе газогидрата была разложена во время хранения, а также при транспортировке. Реальное его содержание in situ намного выше, и возможно составляет 10-20% (масс).

Таблица 1.5 – Ионный состав поровых вод

Ионы	Содержания, мкг/г	Ионы	Содержания, мкг/г
pH	6,28	$\text{HCO}_3^-$	151
$\text{NH}_4^+$	48	$\text{F}^-$	6
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	18	$\text{Cl}^-$	17
$\text{Na}^+$	12	$\text{NO}_3^-$	2,5
$\text{K}^+$	12	$\text{SO}_4^{2-}$	7
$\sum$ катионов	90	$\sum$ анионов	184
Суммарное содержание ионов – 274 мкг/г исходной породы			

## **1.6 Поиски и открытия поддонных газогидратов**

В 1998-1999 гг. после проведения геофизических работ в Южной котловине Байкала исследователи смогли выявить участок дна, в пределах которого существуют все условия для формирования в поддонных осадках газогидратов [72].

Для изучения газовыделяющих структур были организованы геолого-геофизические работы. Они проводились в марте 2000 г. Их диаметр составлял 100-200 м на глубинах более 1300 м. Проводить исследования настолько малых объектов на дне дрейфующего судна весьма затруднительно. Присутствие достаточно мощного слоя льда в зимнее время бесспорно являлось преимуществом для Байкала, по сравнению с другими акваториями, если брать во внимание возможность их изучения. В будущем исследования в районе всех найденных вулканов включали отбор проб осадков в центральных частях кратера грунтовыми трубками длиной в 1-2 м. Также они включали отбор проб воды и газа для химических анализов [73].

Особенно представляли интерес результаты, полученные в кратере вулкана Маленький. Там было отобрано 17 кернов на площади радиусом 150 м, длина которых не превысила 15-67 см. Белые кристаллы газового гидрата поднялись всё-таки наверх после того, как несколько раз была опущена грунтовая трубка, на одной из станций из центра обследуемой площади. Так, впервые происходило визуальное наблюдение газогидратных кристаллов в осадках озера Байкал. В нижней части керна мощность гидратного слоя равняется 10 см. Выше был расположен 25-сантиметровый слой алеврит-пелитового диатомового ила со следами недавней переработки [74]. Скорее всего, вскрыли только самую верхнюю часть залежей газовых гидратов. Вследствие ограниченного проникновения грунтовых трубок, невозможно было прохождение через слой гидрата. В жидком азоте были сохранены кристаллы газовых гидратов. Проведя лабораторные исследования, пришли к выводу от том, что они содержат метан биогенного происхождения. Начиная с 2002 г., довольно часто гидраты метана доставались тут и в летнее время с корабля [75].

Кроме отбора проб осадков также проводилось вертикальное зондирование придонного слоя воды при помощи прибора CDT. Он рассчитывал автономные изменения температуры, электропроводимость, прозрачность воды на дне, а также содержание в ней кислорода [76].

## **1.7 Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования их распространения.**

### **1.7.1 Особенности газогидратопроявлений в очагах разгрузки флюидов в Охотском море.**

Главной задачей экспедиции Института океанологии АН СССР в 1986 г. было исследование предполагаемой гидротермы вблизи озера Парамушир, признаком которой считался газовый “факел”, находящийся эхолотных записях, не раз наблюдавшийся с 1982 г. Помимо этого, высокие содержания в морской воде рядом с “факелом” растворённых водорода, метана и кремниевой кислоты также рассматривались как признак гидротермальной разгрузки на морском дне [76]. В ходе экспедиционных исследований было установлено, что наблюдаемый на эхограмме “факел” не был результатом гидротермальной активности, а объяснялся выходами на дне пузырьков газа.

В прибрежье озера Парамушир выходы газа оказались приурочены к вершине у вала (глубина моря 768 м) шириной около 400 м, длиной 800 м относительной высотой до 15 м. В морском дне в районе очага разгрузки присутствуют глубокие ямы, рыхлый грунт, а также оно характеризуется наличием немалых карбонатных корок, которые покрыты белым налётом, а также кавернозные желваки. Планируется, что данные карбонатные корки возникли в результате насыщения воды  $\text{CO}_2$ , выделяющимся во время восхождения потоков метана [77]. Стоит подчеркнуть, что на сегодняшний день времени найдено не мало очагов субмаринной разгрузки газонасыщенных флюидов, где было зафиксировано аутигенное формирование минералов. В частности, в Чёрное море, в прибрежье Орегона, в районе плато Воринг в

Норвежское море отложения в очагах разгрузки флюидов включает множественные гидратные формирования (корки, желваки, карбонатизованные раковины и др.) часто в сочетании с бактериальными матами (сообщества метанотрофных организмов), сходными по внешнему виду с белым налётом, обнаруженным на карбонатных корках в прибрежье о. Парамушир [78].

В экспедиции с 1986 г. образцы новых газогидратов были подняты на двух станциях. На одной из станций газогидраты были найдены на поддонной глубине 185 см – в наконечнике грунтовой трубки находился слой сплошного снежно-белого гидрата толщиной 2 см. Предполагается, что этот агрегат был оторван трубкой от более мощного гидратного тела. Выше газогидратного слоя наблюдается слой разрыхлённого (рассыпающегося) над толщиной около 10 см, в нижней части которого были обнаружены быстро разлагающиеся линзочки (миллиметровые) газовых гидратов [79]. На второй станции слой с тонкими мелкими линзами гидратов был найден в призабойном интервале глубин 220-240 см, а немного выше находился слой разрыхлённого ила. Газогидратовмещающие отложения представляют собой чёрные, кремнистые диатомовулканокластические алевритовые илы с тонкими прослоями (до 1-2 см) алеврита; отложения имеют сильный запах сероводорода. Химический анализ состава гидратного газа показал, что на 97,8 % он состоит из метана и содержит 0,045 % этана, 0,0001 % пропана, 0,0896 % диоксида углерода [47]. Углерод метана оказался сравнительно “лёгок” по изотопному составу: значение  $\delta^{13}\text{C}$  составило -54 PDB (PDB – *Belemnitella Americana* из формации Пиди мелкого возраста в Южной Каролине – общепринятый стандарт изотопного состава углеводорода) [80].

Газогидратопроявления в прибрежье о. Парамушир были исследованы в экспедиции ВНИИ Океанология в 1991 г. Газовый “факел” был пересечён пятью промерными профилями и пятнадцатью профилями с пробоотбором и геотермическими измерениями, позволяющее уточнить его расположение [80]. Диаметр “факела” около морского дна, по данным эхолотных пересечений, составляет 350-400 м. Газовые гидраты были найдены на двух станциях,

находящихся рядом с западной окраиной “факела”, причём одна из них была за его пределами. На ряде других станций были выявлены косвенные признаки гидратов (низкая концентрация хлорид-ионов в поровой воде, высокое газосодержание и обводнение осадков, запах сероводорода, карбонатизация отложений). Газовые гидраты в виде упрощённых обломков неправильной формы (размером от нескольких миллиметров до 7 см по длинной оси) были обнаружены на поддонной глубине 10-40 см в глинисто-алевритовых отложениях с многочисленными включениями карбонатных корок, стяжений, карбонатизированных раковин двустворчатых моллюсков и их обломков [81]. Данные газовой хроматографии подтвердили преобладание метана в составе гидратного газа, тогда как значение  $\delta^{13}C$  углерода метана оказалось существенно ниже, чем полученное для гидратного газа в экспедиции 1986 г., и составило -67,3 % [81].

В прибрежье о. Сахалин проводился грунтовый пробоотбор на трех полях субмариной разгрузки газа. Самый интересный результат удалось получить в районе одного из полей, где газовые гидраты, найденные на пяти грунтовых станциях. Вмещающие газовые гидраты алевропелиты были представлены в основном диатомовыми илами с малой примесью теригенного материала. Глубина залежи кровли газогидратосодержащих отложений варьировала в диапазоне от 0,3 до 1,2 м, а их вскрытая мощность составила от 0,1 до 1 м. На станциях газовые гидраты прослеживались почти до забоя [82].

### **1.7.2 Механизмы формирования газовых гидратов в Охотском море**

Приуроченность известных скоплений газовых гидратов в Охотском море к очагам разгрузки газа не вызывает каких-то сомнений. Скопления данного типа имеют несколько свойств. Рассмотрим их в рамках геологической модели газогидратообразования в очагах разгрузки, предложенной в работах, с учётом некоторых иных опубликованных данных и новейших материалов [82].

Газогидраты в рассматриваемых скоплениях формируются на слишком малых поддонных глубинах, в частности, в прибрежье о. Сахалин они были обнаружены в интервале поддонных глубин от 0,3 до 1,2. Существование газа в гидратной фазе вблизи от морского дна может быть только в условиях постоянного его притока снизу. Свидетельством этого являются несколько случаев немалого содержания газовых гидратов в отложениях (до 40%). Глубина моря вблизи о. Сахалин и о. Парамушир составляет от 600 до 1000 м, гидростатическое давление варьирует в диапазоне от 6 до 10 МПа, а придонная температура изменяется в интервале 2,2-2,3 °С и 1,7-2,2 °С, соответственно. Зона стабильности гидратов метана при данных значениях температуры и давления на дне может простираться до поддонных глубин, достигающих по крайней мере 100 м [83]. Расположение нижней границы данной зоны, находится при помощи величины геотермического градиента, тогда как глубина залегания гидратосодержащих отложений зависит, в основном, от интенсивности восходящего потока газа. Чем интенсивнее поток газа, тем на меньшей поддонной глубине возникают газовые гидраты. Найденный в ходе сравнительно прошлых экспедиций рост глубины залегания кровли гидратосодержащих отложений скорее всего является свидетельством падения интенсивности восходящего потока газа со временем [83].

Сосуществование газовых гидратов и различных формирований аутигенных карбонатов (конкреции, корки и т.д.) в зоне разгрузки свободного газа, скорее всего, обусловлено с окислением метана, приведшем к насыщению воды углекислым газом и дальнейшему выпадению из растворов карбонатов [84].

### **1.7.3. Термобарические параметры и запасы газогидратов Охотского моря**

Первоначально предполагалось, что субмаринные газогидраты формируются в целом, из аутигенного биохимического газа, а весь генерирующий, биохимический и канагенетический газ попадает в зону образования газовых гидратов, где он стабилизируется в гидратной форме.

Помимо этого, допускалось, что газовые гидраты, в основном распространены в океане почти повсеместно в пределах всей термобарической зоны их стабильности, и их залежи находятся в виде сплошного слоя. В этом непроницаемом для свободного газа слое, образуются свободные углеводороды [85]. Из этих предпосылок следовало, что количество газогидратного газа на порядок выше эквивалентных суммарных ресурсов угля, нефти и природного газа на планете. Оценки количества метана в субмаринных скоплениях газогидратов, базируются на распределении сейсмического горизонта BSR (Bottom Simulating Reflector), маркирующего подошву зоны стабильности газогидратносных акваторий. Уточнение оценок ресурсов газогидратного газа требует более тщательного рассмотрения специфики наличия газогидратов в акваториях Мирового Океана.

Термобарические условия их существования характерны для большей части дна Мирового океана с глубинами воды более 300-400 м на арктическом шельфе зона стабильности газовых гидратов связана с присутствием субмаринной криолитозоны и, скорее всего существует при значительной меньшей глубине воды, если подошва криолитозоны находится на глубине более 260 м от уровня моря. Поддонная глубина подошвы зоны стабильности газовых гидратов в среднем составляет примерно 400-600 м [86].

Самым широкое распространение получил природный газогидратообразователь в субмаринных условиях является метан.

Геотермическая оценка глубины подошвы газогидратного слоя является примером комплексирования геофизических методов. В тех районах Мирового Океана, где присутствует весьма плотная изученность теплового потока и полученные точные факты о температурах на дне водоёма, а также плотностных характеристиках осадочных пород [86]. Для расчёта давления в толщах осадков, была использована оценка термобарических параметров на подошве гидратосодержащего слоя.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 2.1 представлена схема экспериментальной установки, на которой были проведены экспериментальные исследования. Полая керамическая трубка нагревалась до высоких температур (до 1000 °С). На металлическом держателе крепилась частица льда, впоследствии попадающая в трубку. Инициация процессов фазовых превращений при переходе частиц льда из твердого в жидкое, а затем в газообразное состояние капель воды, была обусловлена интенсивным радиационно-конвективным нагревом. Определение изменений во времени основных характеристик исследуемого процесса возможно во время регистрирования положения ледяной частицы и ее размеров. С помощью специальной видеокамеры Photron FASTCAM SA1.1 скорость видеосъёмки которой 67500 кадров/с были зафиксированы стадии термической подготовки, а также плавления частицы льда.

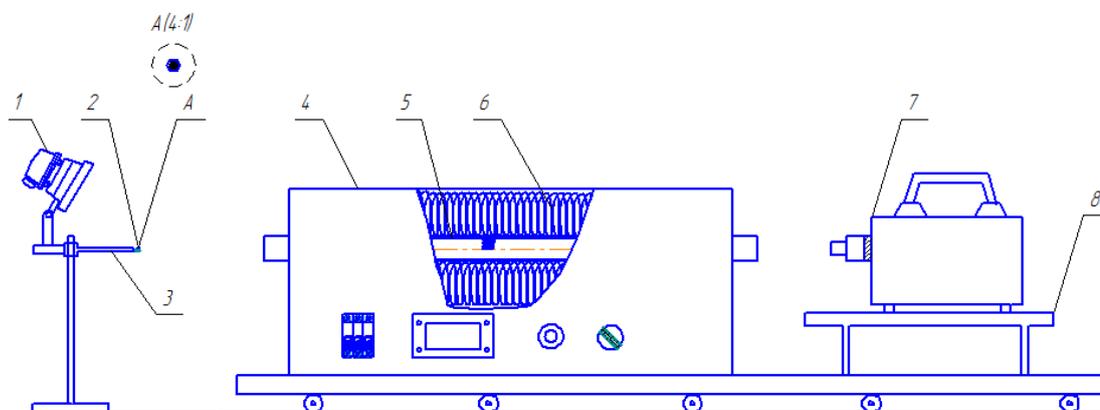


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

1 – прожектор 2 – частица льда 3 – металлический держатель 4 – нагревательный элемент 5 – керамическая трубка 6 – муфельная печь 7 – высокоскоростная видеокамера 8 – движущаяся платформа.

Во время проведения экспериментов были использованы трое разных типов частиц льда. Первая группа была сделана на основе дистиллированной

воды. Вторая на основе дистиллированной воды с включением двуокиси углерода. Третья из дистиллированной воды с включениями частиц угля с высокой степенью окисления при массовой концентрации 10%. Все группы данных материалов заготавливались по нескольким этапам: на начальном этапе материал наполнялся в микроёмкости в виде сфер.

После этого вниз спускалась игла-держатель так, чтобы центр симметрии сферы совпал с концом иглы держателя. Далее эту систему (материал, игла - держатель), нужно было поместить в морозильную камеру, где при температуре  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  начинается процесс кристаллизации материалов.

Период времени от начала теплового воздействия (момент попадания в полость цилиндра) до момента начала плавления (появление 14 приповерхностного водяного слоя) считался временем нагрева частицы ( $t_n$ ). Период времени от начала плавления до момента падения водяной капли с иглодержателя считался временем плавлением частицы льда ( $t_n$ ). Размеры ледяных частиц варьировались в диапазоне  $2 < \delta < 8 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ . Количество серий в каждом эксперименте составляет 35.

## ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

**Целью раздела** является экономическое обоснование научно-исследовательской работы (НИР), определение и анализ трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию проекта, а также уровня научно-технической результативности работы.

**Тема:** «Тепло- и массоперенос при плавлении кристаллов льда в условиях высокотемпературного нагрева».

НИР рассматривает научно-технические основы проблемы “обрыва факела”, который образуется попаданием частиц льда в активную зону горения (преимущественно зимнее время) становится причиной частых нерегламентированных остановов энергетических установок. Проводятся экспериментальные и теоретические исследования основных закономерностей фазовых превращений и тепломассопереноса при условиях движения частиц льда через высокотемпературные газы с использованием муфельной электропечи.

Необходимо разработать теорию прогнозирования обрыва факела газовых горелок котельных агрегатов. Так как процессы фазовых превращений частиц льда при движении через высокотемпературные продукты горения до настоящего времени не исследованы. При критической концентрации частиц льда понижение температуры пламени может быть достаточным для прекращения горения газа.

Для проведения расчета необходимо проведение технико-экономического обоснования. Это связано с необходимостью оценки объема работ и материальных вложений для реализации всего плана исследования, включающих в себя теоретическую проработку темы и проведение расчетов.

## **5.1 Предпроектный анализ**

### **5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

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

Под целевым рынком понимают сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками. Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых потребуется определенный товар. Для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция и др.

Предположим, что целевым рынком для данной работы является рынок производственных предприятий. Сегментируем производственные предприятия по следующим критериям: размер предприятия и вид товара. На основании этих критериев построим карту сегментирования (таблица 5.1).

Экспериментальные исследования проводились с использованием муфельной электропечи. Прибор необходим для термической обработки, а также хранения разнообразных образцов и материалов в определенных температурных условиях. Благодаря тому, что оборудование обладает специальными техническими характеристиками, потенциальными потребителями являются следующие отрасли промышленности: химические лаборатории; предприятия, занимающиеся производством ювелирных изделий; геофизические лаборатории; предприятия, которые изготавливают восковые предметы; пищевые промышленности; предприятиях, выполняющих купелирование разных благородных металлов, ТЭЦ.

## 5.1.2 Анализ конкурентных решений

Данное устройство (Бф) предназначено для проведения экспериментальных исследований, которое может использоваться в разных областях хозяйства. Они широко используются для различных видов термообработки в разных сферах деятельности, исследовательских лабораториях, в производственных предприятиях и других организациях.

Существует множество аналогичных установок со своими достоинствами и недостатками. Одним из них является камерная электропечь для обжига термической обработки металлов (К1). В конечном итоге, выбранный в качестве конкурирующего решения.

Экспертная оценка основных технических характеристик данных продуктов представлена в таблице 5.1.2.

Таблица 5.1.2 – оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

№	Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
			Бф	Бк1	Кф	К1
	1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>						
1	Возможность моделирования тепло- и массообменных процессов	0,2	5	2	1	0,4
2	Удобство в эксплуатации и обслуживании	0,2	5	3	1	0,6
3	Влияние на окружающую среду	0,03	4	3	0,12	0,09
4	Энергоэкономичность	0,05	4	5	0,2	0,25
5	Надежность оборудования	0,07	4	3	0,28	0,21
6	Простота эксплуатации	0,1	5	2	0,5	0,2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>						

1	Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	0,5	0,2
2	Широта использования установки	0,05	1	4	0,05	0,04
3	Затраты на материалы	0,1	4	2	0,4	0,2
4	Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	5	0,4	0,5
	Итого	1	63	44	<b>4,45</b>	<b>2,69</b>

Данные оборудования для обжига термической и высокотемпературной обработки металлов практически одинаково эффективны. Различие заключается лишь в способе классификации. Преимущество собственной разработки заключается в компактности оборудования, благодаря чему, не требуется больших пространственных площадей.

Также сильной стороной является то, что данная система проста в использовании, так как разрабатывалась с тем учетом, что большинство рабочего персонала не будет иметь большого опыта работы муфельными установками.

### 5.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица составляется на основе анализа рынка и конкурентных технических решений, и показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

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. Матрица SWOT представлена в таблице 5.1.3.

Таблица 5.1.3 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
	<p>С1.Высокая экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2.Незначительное воздействие на окружающую среду.</p> <p>С3.Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4.Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5.Плавка любого металла</p>	<p>СЛ1.Отсутствие прототипа научной разработки</p> <p>СЛ2.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>СЛ3.Нехватка кадров для проведения экспериментов</p> <p>СЛ4.Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца</p> <p>СЛ5. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемые при проведении научного исследования.</p>
<b>Возможности</b>	<p>В2 С3С4. Помощь бюджетирования позволит уменьшить себестоимость производства, в связи с чем, увеличится спрос на продукт.</p> <p>В1С1С2. При помощи инновационной инфраструктура ТПУ можно создавать и реализовывать новые энергоэффективные и экологичные технологии.</p>	<p>В2СЛ5. В случае появления дополнительного спроса на продукт может повлечь за собой увеличение комплектующих материалов, что приведет к увеличению срока поставок.</p>
<p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В3.Широкий спектр применения.</p> <p>В4.Рост стоимости конкурентных разработок.</p>		
<b>Угрозы</b>	<p>У2С3. Низкая себестоимость продукта позволит конкурировать на рынке.</p> <p>У4С1С2. Высокие показатели эффективности и экономичности в будущем позволят пройти более жесткие требования государственных ограничений.</p>	<p>У3СЛ1. Отсутствие прототипа научной разработки не позволит экспортировать продукт, в ближайшее время.</p> <p>У5СЛ4СЛ5.Отсутствие необходимого оборудования и большой срок поставок комплектующих материалов с учетом несвоевременного финансирования негативно повлияет на весь процесс исследования</p>
<p>У1.Невостребованность технологии ввиду узкого применения.</p> <p>У2.Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У3.Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p> <p>У4.Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>		

### 5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 5.1.4.

Таблица 5.1.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации НТЗ	3	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	3
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3

9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	50	40

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50, что говорит о средней перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не учитывались, а также проявляется недостаток знаний. Исходя из этого, необходимы дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

### **5.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Перспективность данного научного исследования выше среднего, соответственно не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого недостаточно (пункт 4 – 8 не подходят). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для следующих методов (пункты 1 - 3): Торговля патентной

лицензией; передача ноу-хау и инжиниринг. Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика достаточно для реализации пунктов, которые были выбраны.

## 5.2 Инициация проекта

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.

### 5.2.1 Цели и результаты проекта

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам приведена в таблице 5.2.1.1:

Таблица 5.2.1.1 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
ТЭЦ	Разработанная методика прогнозирования обрыва факела газовых горелок
ТПУ	Увеличение разработок, повышающих статус вуза

Цели и результат проекта представлены в таблице 5.2.1.2

Таблица 5.2.1.2 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Разработать теорию прогнозирования обрыва факела газовых горелок котельных агрегатов.</li> <li>• Произвести экспериментальное и теоретическое исследования процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений, при движении частиц льда в высокотемпературной газовой среде.</li> </ul>
Ожидаемые результаты проекта:	Разработанная теория прогнозирования обрыва факела. Успешное внедрение проекта в соответствующие организации.
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Сравнение полученных результатов с

	эксплуатационным опытом Предоставление методики выполнения исследований, полнота и объективность данных, структурированное изложение результатов проекта.
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выполнение проекта строго в последовательности на основе рекомендаций.</li> </ul>

### 5.2.2 Организационная структура проекта

На этапе организационной структуры работы проекта решались следующие вопросы: определить, кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Данная информация представлена в таблице 5.2.2.1.

Таблица 5.2.2.1 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Сыродой Семён Владимирович к.т.н., научный сотрудник	Руководитель	Координация деятельности проекта	15
2	Слободин Виктор Алексеевич, ТПУ, отделение ИШЭ, магистрант	Исполнитель	Выполнение работ по проекту	558

### 5.2.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 5.2.3.1).

Таблица 5.2.3.1 – Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения</b>
1.2.3.1 Бюджет проекта	210000 рублей
1.2.3.1.1 Источник финансирования	НИ ТПУ
1.2.3.2 Сроки проекта	01.01.2018 – 31.05.2019
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	12.12.2018
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	31.05.2019

## 5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

### 5.3.1 Иерархическая структура работ проекта

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

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

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

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется

содержание всего проекта. На рисунке № 5.3.1.2 приведен шаблон иерархической структуры.



Рисунок 5.3.1.1 – Иерархическая структура по ВКР



Рисунок 5.3.1.2 – Проектная структура проекта

В данном проекте будет использована проектная структура проекта, потому что она подходит больше, так как технология представляется новой и не исследуемой ранее, сложность проекта высока.

### 5.3.2 План проекта

В рамках планирования научного проекта был построен календарный график проекта (табл. 5.3.2.2). Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 5.3.2.1).

Таблица 5.3.2.1 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1.1	Разработка технич. задания	3	1.02.19	4.02.19	Сыродой С.В.
2.1	Подбор и изучение материалов по теме	20	5.02.19	28.02.19	Слободин В. А.
1.2	Выбор напр. исследования	5	1.03.19	6.03.19	Сыродой С.В., Слободин В.А..
1.3	Календарное планирование работ	3	7.03.19	11.03.19	Сыродой С.В., Слободин В.А.
2.2	Проведение теоретических расчетов и обоснований	11	12.03.19	24.03.19	Слободин В.А.
2.3	Проведение экспериментов	38	25.03.19	13.05.19	Слободин В.А.
3.1	Оценка и обсуждение результатов	4	14.05.19	17.05.19	Сыродой С.В., Слободин В.А.
3.2	Оформление отчета	12	18.05.19	31.05.19	Слободин В.А.
<b>И т о г о:</b>		96			

Таблица 5.3.2.2 – Календарный план

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1.1	Разработка технич. Задания	Руководитель	3	■													
2.1	Подбор и изучение материалов по теме	Магистрант	20	■	■	■											
1.2	Выбор напр. исследования	Руководитель, магистрант	5				■	■									
1.3	Календарное планирование работ	Руководитель, магистрант	3				■	■									
2.2	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Магистрант, эксперт	11					■	■	■							
2.3	Проведение экспериментов	Магистрант	38							■	■	■	■	■			
3.1	Оценка и обсуждение результатов	Руководитель, магистрант	4												■	■	
3.2	Оформление отчета	Магистрант	12												■	■	■

## 5.4 Бюджет научного исследования

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 группируются по статьям, представленным в таблице 5.4.1.

Таблица 5.4.1 – Материальные затраты на сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Материальные затраты	Ед. изм.	Объем потребления	Тариф, руб/ед.	Итого, руб.
Электроэнергия: – освещение	кол. часов. работы x потреб. мощн.	350ч. x 100 Вт = 35 кВт·ч	5.8 кВт/ч	203
Ноутбук LENOVO ideapad 310		500 ч. x 281,6 Вт = 140,8 кВт·ч		816.64
Кухонные весы Аксион ВКЕ-21	шт	768,8 гр	570	570
Бумага белая формата А4	упаковка, шт	-	350	350
Итого:				1939 руб.

### 5.4.1 Стоимость экспериментальной установки

Задачи проекта решаются на базе оборудования, находящегося в 4 корпусе НИ ТПУ. Главным объектом развития и оптимизации технологии является экспериментальная установка, состоящая из нескольких основных ступеней:

1. Высокотемпературная печь НОВАТЕРН
2. Дополнительные детали
3. Координатное устройство
4. Объектив Nikon Nikkor AF 80-200mm F/4.5-5.6 D ED VR
5. Вытяжная вентиляция
6. Компьютер

## 7. Сумка-холодильник

Это устройство предназначено для проведения термообработки садки из различных материалов в условиях воздушной окислительной атмосферы.

Таблица 5.4.1.1 - Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

№ п/п	Наименование	Стоимость, руб.	Количество, шт
1	Дополнительные детали	10000	-
2	Координатное устройство	19000	1
3	Вытяжная вентиляция	36000	1
4	Компьютер	25000	1
5	Сумка-холодильник	2000	1
Итого		92000	

Вследствие того, что стоимость на печь и объектив камеры выше 40 тыс.руб., то нужно посчитать амортизацию.

Учитывая тот факт, что объектив камеры и печь работали всегда одновременно, то амортизация рассчитывается как:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} * C_{кт} * \frac{1}{T_{сл}}, \text{ руб/год}, \quad (5.3.1.2)$$

где  $T_{исп.кт}$  – время использования высокотемпературной печи;

$T_{кал}$  – календарное время;

$C_{кт}$  – цена оборудования;

$T_{сл}$  – срок службы установки.

$$K_{ам} = \frac{96}{365} * 80000 * \frac{1}{5} = 1424,7 \text{ руб/год},$$

$$K_{ам} = \frac{96}{365} * 45000 * \frac{1}{5} = 2367,12 \text{ руб/год}$$

Таблица 5.4.1.2 – Амортизационные затраты

№ п/п	Наименование	Стоимость, руб	Количество
1	Высокотемпературная печь НОВАТЕРН	1424,7	1
2	Объектив Nikon Nikkor AF 80-200mm F/4.5-5.6 D ED VR	2367.12	1
Итого		3791.82	

Общая стоимость на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ составляет 95791.82 рубля.

#### 5.4.2 Основная заработная плата

В данной НИР включается основная заработная плата научного руководителя и студента магистранта. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется «Положением об оплате труда»). Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.4.2.1)$$

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

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.4.2.2)$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дп}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{43764,32 \cdot 10,4}{251} = 1813,34$$
$$Z_{\text{дп}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{16\,463,2 \cdot 10,4}{251} = 682 \quad (5.4.2.3)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – 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;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн. (таблица 11).

Месячный должностной оклад работника вычисляется по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (5.4.2.4)$$

где  $Z_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент;

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томск).

На настоящем этапе сформирована команда из ключевых специалистов во главе с руководителем, имеющим опыт реализации подобных проектов. Расчёт стоимости их услуг представлен в таблице ниже:

Таблица 5.4.2.1 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Расчёт основной заработной платы исполнителей системы выбирается на основе системы оплаты труда в ТПУ (для руководителя). Для исполнителя (магистра) предусматривается расчёт оплаты труда исходя из системы оплаты труда предприятия.

Таблица 5.4.2.2 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , Руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	33664,86	-	-	1,3	43764,32	1813,34	2,5	4533,35
Магистрант	12664	-	-	1,3	16 463,2	682	93	63426

Итого $C_{\text{осн}}$	67959,35
------------------------	----------

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

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (5.4.2.5)$$

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

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

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

В таблице 5.4.2.3 приведена форма расчета основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 5.4.2.3 – Расчет зарплат

<b>Заработная плата</b>	<b>Научный руководитель</b>	<b>Исполнитель</b>
Основная зарплата, $Z_{\text{осн}}$	4533,35	63426
Дополнительная зарплата, $Z_{\text{доп}}$	453,33	6342,6
Зарплата исполнителя $C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$	4578,68	69768,6
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	74347,25	

### 5.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды

При начислении зарплаты работникам ежемесячно производится оплата страховых отчислений в пенсионный фонд, медицинского и социального страхования. На сегодняшний день общая ставка для всех перечисленных отчислений в России составляет 27.1 %. В таблице 5.4.3.1 перечислены отчисления на каждого из работников.

Таблица 5.4.3.1 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель по категориям	Зар.плата,руб.	Отчисления, руб.
Руководитель	4578,68	1240,8
Магистрант	69768	18907,13
Итого:	74347.25	20148.1

#### 5.4.4 Накладные расходы

К данной статье относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (5.4.4.1)$$

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

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (67959.35 + 6795.93) = 22426.54 \text{ руб.}$$

Таблица 5.4.4.1 – Бюджет затрат НТИ

№	Затраты по статьям					
	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ + амортизация	Основная заработная плата	Накладные расходы	Отчисления на социальные нужды	Итого плановая себестоимость
1	1939.64	95791.35	67959,17	22426,54	20148.1	<b>208264.8</b>

### 5.4.5 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать таблице 5.4.5.1.

Таблица 5.4.5.1 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

В данном случае выбор лежит к проектной структуре проекта из-за особенностей разработки. Составляющая проекта является модульные системы, работающие в постоянном взаимодействии с другими модулями. Также основной причиной выбора проектной структуры является то, что технология проекта является новой, и имеются ограниченные сроки реализации.

### 5.4.6 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Пример плана управления коммуникациями приведен в таблице 5.4.6.1.

Таблица 5.4.6.1 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Представителю заказчика	Ежеквартально (первая декада квартала)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

### 5.4.7 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. Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу 5.3.7.1.

Таблица 5.4.7.1 – Реестр рисков проекта

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Экономический кризис	Отсутствие бюджетного финансирования	2	2	Низкий	Прогнозирование экономической ситуации	Непредвиденная экономическая остановка
2	Несоблюдение техники безопасности	Недобросовестное исполнение правил ТБ	4	4	Высокий	Обязательное получение допуска по ТБ, ведение журнала ТБ	Снижение работоспособности и утомляемость
3	Возможность поломки оборудования	Халатная работа за оборудованием	5	5	Высокий	Качественный монтаж и эксплуатация оборудования	Срок эксплуатации

### 5.5 Оценка сравнительной эффективности исследования

**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 как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (5.5.1)$$

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 следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (5.5.2)$$

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

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

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (табл. 5.5.1).

Таблица 5.5.1 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Камерная электропечь
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	2
3. Помехоустойчивость	0,15	5	3
4. Энергосбережение	0,20	5	3
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,15	4	4
ИТОГО	1	24	19

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_i^p}{\Phi_{\max}} = \frac{80000}{208264.08} = 0,38; I_{\Phi}^a = \frac{\Phi_i^a}{\Phi_{\max}} = \frac{34000}{208264.08} = 0,16$$

$$I_T^p = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,35$$

$$I_{T1}^a = 3 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 = 2,95$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_T^p}{I_{\Phi}^p} = \frac{4,35}{0,19} = 22,9; I_{\text{финр}}^a = \frac{I_{T1}^a}{I_{\Phi}^a} = \frac{2,95}{0,21} = 14,05$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{22,9}{14,05} = 2,4$$

Таблица 5.5.2 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Камерная электропечь	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,16	0,38
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	2,95	4,35
3	Интегральный показатель эффективности	14,05	22,9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	2.4	0.412

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной магистерской диссертации были проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов плавления кристаллов льда в условиях высокотемпературного нагрева. В ходе выполнения данной диссертации был модернизирован экспериментальный стенд, на котором проводились экспериментальные исследования. Определены времена плавления льда и испарения воды в условиях высокотемпературного нагрева. Было исследовано воздействие главных факторов (влияние температуры топочной среды, влияние размера частиц, влияние состава топлива) на временные характеристики процессов плавления и испарения кристалла льда. Было выявлено, что время плавления частиц льда, обогащённых  $\text{CO}_2$ , и содержащих углеродистые частицы с одинаковыми частицами возрастает. Установлено, что размер частиц льда на основе дистиллированной воды в значительной степени влияния на временные характеристики, в отличие от температур внешней среды. Также было установлено, что размер частиц льда на основе дистиллированной воды, обогащённых  $\text{CO}_2$ , а также содержащих углеродистые частицы не оказывает значительного влияния на временные характеристики, в отличие от температур внешней среды. Необходимо подчеркнуть, что для кристаллов льда, обогащённых двуокисью углерода, и кристаллов льда с включениями угля при больших температурах внешней среды ( $800 - 1000^\circ\text{C}$ ) можно зафиксировать бурное кипение воды в виду того, что при таких параметрах температуры излучение имеет большое значение проникая в глубь слоя воды.

После получения экспериментальных результатов была разработана математическая модель, которая практически полностью учитывает комплекс процессов испарения водяной пленки, термической подготовки и плавления частицы льда.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке основных элементов теории и математической базы процессов термической подготовки и воспламенения частиц газовых гидратов.

Пояснительная записка к диссертации содержит доскональное описание методики проведения эксперимента, а также физической и математической постановки математической модели, и подробный анализ результатов.

Помимо это также были выполнены разделы «Социальная ответственность» и «Менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение». В разделе «Менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения, составлена смета затрат на проект, определены сильные и слабые стороны проекта, определен бюджет научного исследования и определены все риски при создании проекта. В разделе «Социальная ответственность» рассмотрена социальная ответственность предприятия (корпоративная социальная ответственность), указаны вредные факторы, которые могут возникнуть на рабочем месте, описаны организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны. Также указана безопасность при чрезвычайных ситуациях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоморная О.В., Высокоморный В.С., Стрижак П.А. Оценка параметров надежности работы автономных устройств энергоснабжения удаленных линейных объектов магистральных газопроводов Восточной Сибири и Дальнего Востока // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 4
2. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2020 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitelstva RF 28.08.2003 № 1234 [Russian Energy Strategy to 2020. Approved by order of the government RF]. 2003, no. 1234.
3. Livinskiy A.P., Redko I.Ya., Filin V.M. Energetik, 2010.
4. Salamov A.A. Energetik, 2009. 7, pp. 26–27.
5. Kononenko P.I., Mikhayluts V.G. Energetik, 2007. 3, pp. 43–44.
6. Zalmanov L.R., Moryakov P.V. Energetik, 2001. 11, pp. 38–40.
7. Kovalev L.I. Energetik, 2009. 3, pp. 26–29.
8. Сжигание гидрата метана с использованием гранул различного состава, 2011, стр. 147-150.
9. Корценштейн В.Н. Растворенные газы подземной гидросферы земли. М.: Недра, 2014.
10. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы.
11. Макогон Ю.Ф. Образование гидратов в газоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты. Газовая промышленность, 2015, №5.
12. Макогон Ю.Ф. Образование гидратов в газоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты. Газовая промышленность, 2015, №5.
13. Макогон Ю.Ф. Особенности эксплуатации месторождений природных газов в зоне вечной мерзлоты. ЦНТИ Мингазпрома, 2016.
14. Макогон Ю.Ф. Метод определения запасов газа в газогидратных залежах. Газовое дело, 1966, №1.

15. Макогон Ю.Ф. Растворимость газов в воде при наличии гидратов. Экспресс-информация, 1971, № 22. 59
16. Hammerschmidt E.G. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines. Industrial and Engineering Chemistry, 1934. 26, 8, pp. 851–855.
17. Eps operation & maintenance manual (powered by CCVT) // This document contains information that is proprietary to ORMAT SYSTEMS LTD. 2006, 600 p.
18. Газовые гидраты. Технология воздействия на нетрадиционные источники, 2007. 26, 8, pp. 151–155.
19. Трофимчук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Гидраты - новый источник углеводородов// Природа - 2010г. №3.
20. Дж Кэрролл. Гидраты природного газа, 2014. – 73 с.
21. Баженова О.К., Бурлин Ю.К. «Геология и геохимия нефти и газа», МГУ 2007 г.
22. Алодко Е.Я., Дядин Ю.А., Журко Ф.В., Ларионов Э.Г., Мельгунов М.С., Манаков А.Ю., Нестеров А.Н., Фенелонов В.Б. Равновесные условия разложение газовых гидратов, диспергированных в мезопористых средах // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2006 – С. 18 – 27.
23. Алиев З.С., Шеремет В.В. Определение производительности горизонтальных скважин, вскрывшие газовые и газонефтяные пласты. – М.: Недра, 1995.
24. Андриасов Р.С., Мищенко И.Т., Петров А.И. Справочное руководство по проектированию и разработке нефтяных месторождений. Добыча нефти. – М.: Недра, 1995.
25. Басниев К.С., Бозиев С.Н., Медведев Б.И., Нагаев А.И. Распределение температуры вдоль скважины при закачке горячего теплоносителя с целью теплового воздействия на гидратную залежь // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2006.

26. Басниев К.С., Бозиев С.Н., Щебетов А.В. От газогидратного месторождения Маллик – к будущему газовой промышленности // Газовая промышленность. – 2004. – № 2.
27. Басниев К.С., Бозиев С.Н., Щебетов А.В. К вопросу разработке газогидратных залежей // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2006.
28. Басниев К.С., Кульчицкий В.В. Новый метод разработки газогидратных залежей // Наука и техника в газовой промышленности. – 2004. – № 2. – С. 57-62.
29. Басниев К.С., Кульчицкий В.В., Щебетов А.В., Нифантов А.В. Способы разработки газогидратных месторождений // Газовая промышленность. – 2006. – № 7. – С. 22-24.
30. Басниев К.С., Медведев Б.И., Нагаев А.И. Моделирование разложения газовых гидратов в пористой среде // Всероссийская конференция по газовым гидратам. “Новосибирск – 2004.
31. Басниев К.С., Щебетов А.В., Нифантов А.В. Перспективные освоения газогидратных залежей // Наука и техника в газовой промышленности. – 2006. – № 7. – С. 22-24.
32. Бондарев Э.А., Габышева Л.Н., Каниболотский М.А. Моделирование образования газовых гидратов при движении газа в трубах // Известия АН СССР. МЖГ – 1982. – № 5. – С. 105-112.
33. Богданов Ю.М., Жиленко Е.А., Игошин А.И., Чернышова В.А. Ингибиторосодержащие способы отбора газа на ПХГ в каменной соли // Газовой промышленности. – 2007. – № 7. – С. 51-53.
34. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. – Спб.: ВНИИОкеанология, 2008 – 199 с.
35. Голубев В.А. Свидетельства присутствия газогидрата в верхнем слое донных осадков озера Байкал: Результаты измерений теплопроводности *in situ* // Докл. РАН. – 1998. – Т. 358. – № 3. – С. 384-388.

36. Гольмшток А.Я., Дучков А.Д. Газогидраты и тепловой поток озера Байкал // Программы и тезисы Российского семинара “Газовые гидраты в экосистеме Земли”. Новосибирск, – 2007. – 24 с
37. Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Рощина Н.А. О возможности обнаружения донных скоплений газовых гидратов геотермическим методом // Вопросы геофизики. Вып. – 38 / По ред. В.Н. Трояна и др. – Санкт – Петербург., 2008 – С. 130-147.
38. Дучков А.Д., Газогидраты в осадках озера Байкал // Российский химический журнал. – 2012. Т.47 – № 3 – С. 91-100.
39. Егоров А.В., Рожков А.Н., Вогт П.Р. О Газогидраты непосредственно на морском дне: природное явление и его теоретическое объяснение – М.: Институт проблем механики РАН (препринт 616), 1998. – 22 с.
40. Зарубежная информация. – 2001. – № 4.
41. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 2008. – 236 с.
42. Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А., Квон В.Г., Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2008.
43. Казарян В.А. Подземное хранение газов и жидкостей. – М. –Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2010. – 432 с
44. Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Генетические типы метана озера Байкал // Докл. РАН. – 2009. – Т. 411. – № 5. – С. 672-675.
45. Клеркс Ж., Земская Т.И., Матвеева Т.В., и др. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал // Докл. РАН. – 2011. – Т. 393. – № 6. – С. 822-826.
46. Крейнин Е.В. Нетрадиционная термическая технология добычи трудноизвлекаемого углеводородного сырья // Газовая промышленность. – 2010. – № 3.
47. Крейнин Е.В. Перспективы разработки технологии добычи назовых гидратов. – 2009. – № 1.

48. Кузьмин М.И., Калмычков М.Г. Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал // Докл. РАН. – 2010. – Т. 362. – № 4. – С. 541-543.
49. Ларионов В.Р., Федосеев С.М., Иванов Б.Д. Перспективы практического использования газовых гидратов в горном деле. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2012. – 224.
50. Лужковой В.Р. Повышение эффективности технологии применения метанола предупреждения гидратообразования при низкотемпературной обработке газа: Автореф. дис .... канд.техн наук. М., 2013
51. Мазуренко Л.Л., Соловьев В.А., Матвеева Т.В., и др. Газовые гидраты Мирового океана // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2008. – С 2-6.
52. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: открытие и перспективы // “Газовая промышленность”, 2013. – № 5.
53. Макогон Ю.Ф., Саркисянц Г.А., Предупреждение образования гидратов при добыче и транспорте газа – М.: Недра, 2016.
54. Макогон Ю.Ф., Холдич Г.А., Макогон Т.Ю. Кинетика и морфология вторичных кристаллов газовых гидратов // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2013. – С. 51-54
55. Малюков В.П., Рыгзынов Ч.Ц., Перспективы разработки газогидратных месторождений // Материалы 2-й международной конференции. Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса в 21 веке. – М.: РУДН, 11-15 октября 2013 г. – С. 139-140.
56. Малюков В.П., Эстиакуззаман М.М., Методы предупреждения образования гидратов углеводородов // Материалы 2-й международной конференции. Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса в 21 веке. – М.: РУДН, 11-15 октября 2013 г. – С. 306-308.
57. Матвеева Т.В., Соловьёв В.А., Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения // Российский химический журнал. – 2003. – Т.47. – № 3. – С. 101-111.

58. Мингулов Р.М., Лебенкова И.В., Баскаков А.П., Предупреждение гидратообразования в системах сбора и промысловой подготовки газа Заполярного месторождения // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2013. – С. 62-64.
59. Мельников В.П., Нестеров А.Н., Решетников А.М. Диссоциация газовых гидратов при атмосферном давлении // Газовые гидраты. – 2014.
60. Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р., Превентивные методы борьбы с гидратообразованием в трубопроводах // Нефть и газ. – 2015. – № 1. – С. 50-56.
61. Надежный А.М., Бондаренко В.И., Газовые гидраты в Прикамчатско-Парамуширской части Охотского моря // Докл. АН СССР – 2011. – Т. 306. – № 5. – С. 1192-1196.
62. Нигматуллин Р.И, Динамика многофазных сред. – Т. 1. М.: Наука, 2014. – 464.
63. Нифантов А.В., Математическое моделирование разработки газогидратных месторождений // Газовая промышленность, 2015. – № 1.
64. Перлова Е.В., Леонов С.А., Махонина Н.А., Субаквальные газогидратные залежи – от геологии до разработки. Проблемы геологии природного газа России и сопредельных стран: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИГАЗ, 2016. – С. 282-297.
65. Пузанов М.Ю., Нетрадиционный источник газа: природные газовые гидраты, 2015 – С. 516-522.
66. Соловьёв В.А., Газогидратоносность недр Мирового океана // Газовая промышленность. – 2014. – № 12.
67. Соловьёв В.А., Глобальная оценка количества газа в субмаринных скоплениях газовых гидратов. // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 43 (7). – С. 609-624
68. Схоляко А.С. Исследование условий образования гидратов природных газов в пористой среде и их влияние на продуктивную характеристику скважин: Автореф. дис.... канд.техн наук. М., 2013

69. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря: к 60-летию основанию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. – М.: Наука, 2006. – 130 с.
70. Унароков К.Л. Исследование процесса диссоциации гидратов в системе добычи и транспорта природных газов: Автореф. дис.... канд.техн наук. М., 2015
71. Ларионов В.Р., Федосеев С.М., Новая позиция в квалификации гидратосодержащих горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2002. – № 8. – С.184-186.
72. Ларионов В.Р., Федосеев С.М., Исследование гидратообразования в пористой породе // Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2006 – С. 18 – 27.
73. Хлыстов О.В. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал // Геология и геофизика – 2012. – Т. 47. – № 8. – С. 979-981.
74. Черский Н.В., Царёв В.П., Михайлов В.А. Роль зон гидратообразования в формировании ресурсов природных газов и оценка эксплуатации возможных газогидратных залежей // Поиск и оценка ресурсов газогидратных залежах. – Якутск, 2014 – С. 3-68.
75. Шагапов В.Ш., Уразов Р.Р. Характеристика газопровода при наличии гидратных отложений // Теплофизика высоких температур 2013. – Т. 42. – № 3. – С. 461-468.
76. Щебетов А.В. Месторождение газовых гидратов: ресурсы и возможные методы разработки // Технологии ТЭК. – 2016. – № 4. <http://www.oilcapital.ru>.
77. Якушев В.С., Истомин В.А., Перлова Е.В. Ресурсы и перспективы освоения нетрадиционных источников газа России: к 55-летию освоения ВНИИГАЗа. – М.: ВНИИГАЗ, 2017 (ротапонт ВНИИГАЗа).
78. Якушев В.С., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Леонова С.А. Географо-генетическая классификация природных газогидратных залежей. Проблемы

геологии природного газа России и сопредельных стран: Сб., науч.тр. – М.: ВНИИГАЗ, 2016. – С. 267-281.

79. Агалаков С.Е., Курчиков А.Р. Ресурсы газа в зонах стабильности газогидратов на севере Западной Сибири // Наука и техника в газовой пром-сти. - 2004. - N1-2. - С.26-35. - Библиогр.: 11 назв.

80. Баклан В.Ю., Блайда И.А. Клады Черного моря: перспективы использования ресурсов гидрата метана и сероводорода // Энергосбережение (Украина). - 2011. - N 9. - С.33-35.

81. Надежный А.М., Бондаренко В.И., Газовые гидраты в Прикамчатско-Парамуширской части Охотского моря // Газовые гидраты (спец. вып.). Приложение к журналу “Газовая промышленность”, 2006 – С. 18 – 27.

82. Давыдова А.Е. Перспективы добычи аквамаринных газогидратов на шельфе и континентальном склоне Мирового океана // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы всерос. науч.-практ. конф. Т.1. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. - С.36-38. - Библиогр.: 3 назв.

83. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года / Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. // Докл. АН. - 2012. - Т.446, N 3. - С.330-335.

84. Динамические, термодинамические и механические свойства газовых гидратов структуры I и II / Инербаев Т.М., Субботин О.С., Белослудов В.Р. и др. // Рос. хим. журн. - 2003. - Т.47, N 3. - С.19-27. - Библиогр.: 65 назв.

85. Дядин Ю.А., Гущин А.Л. Газовые гидраты // Сорос. образоват. журн. - 1998. - N 3. - С.55-65

86. Дадаев А.А., Плотник Р.И., Морозов О.Г. Комбинированная лазерномикроволновая обработка газогидратов // Физика и техн. приложения волновых процессов: материалы IX междунар. науч.-техн. конф., 13-17 сент. 2010. - Челябинск: Челябинский государственный университет, 2010. - С.235.

87. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч.1. Стадия прогрева // Горение и плазмохимия. – 2007. – № 1. – с.

88. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч.2. Стадия испарения // Горение и плазмохимия. – 2007. – № 1. – с.

89. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

90. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

91. 2.2.4.548-1996 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

92. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

93. ГОСТ Р 52084-2003. Приборы электрические бытовые. Общие технические условия.

94. Белов, Сергей Викторович. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): учебник для академического бакалавриата / С. В. Белов. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва: Юрайт ИД Юрайт, 2015. - 703 с. Ссылка на электронный каталог НТБ ТПУ - <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/advanced/document/RU%5CTPU%5Cbook%5C315981>

95. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

96. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

97. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

98. Трудовой Кодекс РФ, N 197

99. Руководство по эксплуатации. Электродуховка сопротивления камерная.

100. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов и безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
101. "Кодекс законов о труде Российской Федерации"(с изм. на 24.12.2002.)
102. Техническое условие 3442-001-89060302-2012.
103. Basniev K. S., Medvedev B. I., Nagaev A. I. Modeling of decomposition of gas hydrates in a porous medium // all-Russian conference on gas hydrates. "Novosibirsk – 2004.
104. Basniev K. S., chirps, A. V., A. V. Nifontov for Prospective development of gas hydrate deposits // Science and equipment in gas industry. – 2006. – № 7. – P. 22-24.
105. Bondarev E. A., Gabysheva L. N., Kanibolotsky M. A. Modeling of gas hydrate formation in gas flow in pipes // proceedings of the USSR Academy of Sciences. MIG – 1982. – № 5. – P. 105-112.
106. Bogdanov Yu. M., Zhilenko and E. A., Igoshin, A. I., Chernyshov V. A. Inhibitorsdisease methods of selection of gas in underground storages in rock salt // Gas industry. – 2007. – № 7. – P. 51-53.
107. Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Submarine gas hydrates. – SPb.: Vniiokeanologiya, 2008 – 199 p.
108. Golubev V. A. Evidence of the presence of gas hydrate in the upper layer of bottom sediments of lake Baikal: Results of thermal conductivity measurements in situ // Dokl. WOUND. – 1998. – Vol. 358. – № 3. – Pp. 384-388.
109. Golmshtok A. J., Duchkov A. D. Hydrates and the heat flow of the Baikal lake // Program and abstracts of the Russian workshop "Gas hydrates in the ecosystem of the Earth." Novosibirsk, 2007. – 24 sec
110. Golmshtok A. Ya., Duchkov A.D., Roschina N. Ah. About possibility of detection of bottom accumulations of gas hydrates by geothermal method // Questions of Geophysics. Issue. – 38 / Ed. V. N. Troyan et al. – St. Petersburg., 2008 – Pp. 130-147.

111. Duchkov A.D., gas Hydrates in lake Baikal sediments // Russian chemical journal. – 2012. Vol. 47 – № 3 – P. 91-100.
112. Egorov A.V., Rozhkov A. N., Vogt P. R. On gas Hydrates directly on the seabed: natural phenomenon and its theoretical explanation – M.: Institute of problems of mechanics RAS (Preprint 616), 1998. – 22 p.
113. Foreign information. – 2001. – № 4.
114. Istomin V. A., Yakushev V. S. Gas hydrates in natural conditions. – M.: Nedra, 2008. – 236 p.
115. Istomin V. A., Yakushev V. S., Makhonina N. A. Kvon V. G., the Effect of self-preservation of gas hydrates // Gas hydrates (spec. issue.). Annex to the journal “Gas industry”, 2008.
116. Kazaryan V. A. Underground storage of gases and liquids. – M. –Izhevsk: SIC “Regular and chaotic dynamics”, 2010. – 432 s
117. Kalmychkov G. V., Egorov A.V., Kuzmin M. I., Genetic types of methane from lake Baikal, Dokl. WOUND. – 2009. – Vol. 411. – № 5. – Pp. 672-675.
118. Klerks Zh., Zemskaya T. I., Matveeva T. V., and other methane Hydrates in the surface layer of deep-sea sediments of lake Baikal // Dokl. WOUND. – 2011. – Vol. 393. – № 6. – P. 822-826.
119. Kreinin E. V. Unconventional thermal technology of extraction of hard-to-recover hydrocarbon raw materials. Gas industry. – 2010. – № 3.
120. Kreinin E. V. Prospects of development of technology of extraction of called hydrates. – 2009. – № 1.
121. Kuzmin M. I., Kalmychkov M. G. the First discovery of gas hydrates in the sedimentary thickness of lake Baikal // Dokl. WOUND. – 2010. – Vol. 362. – № 4. – P. 541-543.
122. Larionov V. P., Fedoseev S. M., Ivanov, B. D., Prospects of practical use of gas hydrates in mining. – Yakutsk: Izd-vo yants so ran, 2012. – 224.
123. The Luzhkov V. R. Increase of efficiency of application technology of methanol preventing hydrate formation in low-temperature processing gas: abstract. dis.... kand.doctor of technical Sciences. M., 2013

124. Mazurenko L. L., Soloviev V. A., Matveeva T. V., and other Gas hydrates of the World ocean // Gas hydrates (spec. issue.). Annex to the journal “Gas industry”, 2008. – 2-6.

125. Makogon, Y. F. Natural gas hydrates: discovery and prospects // “Gas industry”, 2013. – № 5.

126. Makogon Y. F., G. A. Sarkisyants, Prevention of hydrate formation in the extraction and transportation of gas – M.: Nedra, 2016.

127. Makogon Yu. F., Holdich G. A., Makogon T. Yu. Kinetics and morphology of secondary crystals of gas hydrates // Gas hydrates (spec. issue.). Appendix to the journal “Gas industry”, 2013. – P. 51-54

128. V. P. Malyukov, Rysinov H TS and prospects of development of gas hydrate deposits // materials of the 2nd international conference. Strategy for the development of mineral resources in the 21st century. – M.: RUDN, 11-15 October 2013 – P. 139-140.

129. Malyukov V. P., Estiakuzaman M. M., Methods of prevention of formation of hydrocarbons hydrates // Proceedings of the 2nd international conference. Strategy for the development of mineral resources in the 21st century. – M.: RUDN, 11-15 October 2013 – P. 306-308.

130. Matveeva T. V., Soloviev V. A., Gas hydrates of the sea of Okhotsk: regularities of formation and distribution // Russian chemical journal. – 2003. – Vol. 47. – № 3. – P. 101-111.

131. Mingulov R. M., Lebedkova I. V., Baskakov A. P., Prevention of hydrate formation in the systems of collection and field preparation of gas of the polar field // Gas hydrates (spec. issue.). Appendix to the journal “Gas industry”, 2013. – Pp. 62-64.

132. Melnikov V. P., Nesterov A. N., Reshetnikov, A. M., the Dissociation of gas hydrates at atmospheric pressure // Gas hydrates. – 2014.

133. Musakaev N. G., Urazov RR, Preventive methods of dealing with hydrate formation in pipelines // Oil and gas. – 2015. – № 1. – P. 50-56.

134. Reliable A. M., Bondarenko V. I., Gas hydrates in Kamchatka-Paramushir part of the Okhotsk sea // Dokl. USSR ACADEMY OF SCIENCES – 2011. – Vol. 306. – № 5. – Pp. 1192-1196.
135. Nigmatullin R. I., Dynamics of multiphase media. – Vol. 1. M.: Science, 2014. – 464.
136. Nifantov A.V., Mathematical modeling of gas hydrate fields development // Gas industry, 2015. – № 1.
137. Perlova E. V., Leonov S. A., Mahonina N. Ah. Subaquatic gas hydrate deposits – from Geology to development. Problems of natural gas Geology in Russia and neighboring countries: Sat. science. Tr. – Moscow: VNIIGAZ, 2016. – P. 282-297.
138. Puzanov M. Yu., Unconventional gas source: natural gas hydrates, 2015 – P. 516-522.
139. Soloviev V. A., Gethydrocodone the depths of the World ocean // Gas industry. – 2014. – № 12.
140. Soloviev, global assessment of gas amount in submarine accumulations of gas hydrates. // Geology and Geophysics. – 2013. – Vol. 43 (7). – Pp. 609-624
141. Research of conditions of formation of hydrates of natural gases in a porous medium and their influence on the productive characteristics of wells: autoref. dis.... kand.doctor of technical Sciences. M., 2013
142. Tectonic zoning and hydrocarbon potential of the sea of Okhotsk: to the 60th anniversary of the Institute of marine Geology and Geophysics Feb RAS. – Moscow: Science, 2006. 130 p.
143. Unarokov K. L. Study of the process of dissociation of hydrates in the system of production and transport of natural gases: autoref. dis.... kand.doctor of technical Sciences. M., 2015
144. Larionov V. R., Fedoseev S. M., a New position in the qualification of hydrate-containing rocks // Mining information and analytical Bulletin. – Moscow: MGGU, 2002. – № 8. – P. 184-186.
145. Larionov V. R., Fedoseev S. M., Study of hydrate formation in porous rock // Appendix to the journal “Gas industry”, 2006 – C. 18 – 27.

146. Khlystov O. V. New discoveries of gas hydrates in the bottom sediments of lake Baikal // *Geology and Geophysics* – 2012. – Vol. 47. – № 8. – P. 979-981.
147. Chersky, N. In. Tsarev V. P., Mikhaylov V. A. the Role of the zones of hydrate formation in the formation of resources of natural gas and evaluation of the exploitation of possible gas-hydrate deposits // *Search and resource evaluation of gas hydrate deposits.* – Yakutsk, 2014 – P. 3-68.
148. Shagapov V. sh., Urazov R. R. Characteristics of the gas pipeline in the presence of hydrate deposits // *Thermophysics of high temperatures* 2013. – Vol. 42. – № 3. – P. 461-468.
149. Chirps A.V. Field of gas hydrates: resources and possible methods of development // *Tekhnologii TEK.* – 2016. – № 4. <http://www.oilcapital.ru>.
150. Yakushev V. S., Istomin V. A., Perlova E. V. Resources and prospects of development of non-traditional gas sources in Russia: to the 55th anniversary of VNIIGAZ development. – M.: VNIIGAZ, 2017 (rotaprint of VNIIGAZ).
151. Yakushev V. S., Perlova E. V., Makhonina N. A. Leonov S. A., a Geographical and genetic classification of natural gas hydrate deposits. Problems of natural gas Geology in Russia and neighboring countries: Sat., science.Tr. – Moscow: VNIIGAZ, 2016. – P. 267-281.
152. Agalakov S. E., Kurchikov A. R. gas Resources in the stability zones of gas hydrates in the North of Western Siberia // *Science and technology in the gas industry.* - 2004. - N1-2. - P. 26-35. - Bibliogr.: 11 title.
153. Baklan V. Yu., Blayda I. A. Treasures of the Black sea: prospects of using resources of methane hydrate and hydrogen sulfide // *energy Saving (Ukraine).* - 2011. - No. 9. - P. 33-35.
154. Reliable A. M., Bondarenko V. I., Gas hydrates in Kamchatka-Paramushir part of the Okhotsk sea // *Gas hydrates (spec. issue.). Annex to the journal “Gas industry”,* 2006 – C. 18 – 27.
155. Davydova A. E. Prospects of production of aquamarine gas hydrates on the shelf and the continental slope of the World ocean // *New technologies - oil and*

gas region: materials vs. science.-prakt. Conf. Vol.1. - Tyumen: TSOGU, 2013. - P. 36-38. - Bibliogr.: 3 title.

156. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates of the sea shelf of the Eastern Arctic as a possible cause of "methane catastrophe": some results of complex research of 2011 / Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov, I. P. and others // proc. An. - 2012. - Vol. 446, N 3. - P. 330-335.

157. Dynamic, thermodynamic and mechanical properties of gas hydrates structures I and II / Narbaev T. M., Subbotin O. S., Belosludov V. R. and others // Rus. chem. journal. - 2003. - Vol. 47, N 3. - P. 19-27. - Bibliogr.: 65 title.

158. Dyadin, Y. A., Gushchin A. L. Gas hydrates // Soros. educated. journal. - 1998. - N 3. - P. 55-65

159. Dadaev, A. A., Carpenter, R. I., Morozov O. G. Combination usernameciocolata processing of gas hydrates // Fizika i tekhn. applications of wave processes: materials of the IX Intern. science.-tech. Conf., 13-17 Sept. 2010. - Chelyabinsk: Chelyabinsk state University, 2010. - P. 235.

## Приложение А

### Раздел 7 Natural gas hydrates

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ73	Слободин Виктор Алексеевич		

Консультант школы отделения (НОЦ) ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник.	Сыродой С.В.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Черемисина-Харпер И.А.	к.ф.н.		

## CHAPTER 7. NATURAL GAS HYDRATES

### 7.1 Burning methane hydrate using granules of different composition

Natural gas hydrates include accumulation of hydrates, formed without human intervention. Such accumulations are on Earth, as well as other on planets in the universe. Taking into account the fact that natural gas hydrates became widespread, having a huge potential of mineral energy, their presence on the Earth was proved only in the 60s of the last century [105-106]. The existence of gas hydrates and their discovery was facilitated by the skill of combating industrial hydrates collected in the Shebelinsky gas field, and their knowledge in the laboratory during the work on the first dissertation, and analyzing the unnatural conditions of hydrocarbon deposits in the cryolithozone, after detection of uncharacteristically in frozen rocks of Siberia sequences [107].

The grounds for the formation of hydrates are: the presence of gas, water, a certain pressure and temperature at the same time [108]. There are no chemical bonds between the molecules. Water molecules are combined by a hydrogen bond, which easily disintegrates when the pressure decreases or the temperature rises [109].

The recoverable reserves of hydrated gas depend on many factors, the most important of which include: the depth and size of the hydrate formation zone; the specific content of hydrate in the rock section; thickness of productive layers; size and degree of supercooling; total gas reserves in the reservoir; the effectiveness of the applied technology development [110].

Gas hydrates have unique properties. For example, 207 volumes of methane can be bound by a single volume of water during the transition to the hydrated state. At the same time, its specific volume increases by 26% (when water freezes, its specific volume increases by 9%). 1 m<sup>3</sup> of methane hydrate at  $P = 26$  atm and  $T = 0$  ° C contains 164 volumes of gas. In this case, the share of gas accounts for 0.2 m<sup>3</sup>, for water 0.8 m<sup>3</sup>. The specific volume of methane in the hydrate corresponds to a pressure of about 1,400 atm. The decomposition of hydrate in a closed volume is accompanied by a significant increase in pressure. Hydrates have high electrical resistivity and acoustic

conductivity. This allows you to create effective means of their search and intelligence. They are almost impermeable to water and gas, thereby contributing to the preservation of hydrocarbons in the bowels of the earth over time [111-112].

Gas hydrates under natural and artificial conditions are formed at high ambient pressures or low temperatures, which ensure their equilibrium states. Their structures are of the following types: cubic (sI); cubic (sII); and hexagonal (sH) [113]. Gas hydrate deposits found on Earth have enormous reserves of natural gas. In the near future, enhanced extraction of gas from hydrate deposits is planned. Some articles describe the preparation of hydrates from marine sediments [114].

Now the coverage of gas hydrates extends both to global energy resources and to the latest efficient technologies [115]. High-energy technologies using engines-generators with gaseous CO<sub>2</sub> hydrate were considered. Special attention was paid to the problems of storage and transportation of hydrated materials in tanks, as well as to the issue of safety.

There is currently no physico-mathematical model that describes the process of dissociation of CH<sub>4</sub> hydrate. This in turn, prevents us from moving forward. Be sure to reduce shipping costs. The storage temperature of hydrated granules is closely related to the cost of technology. Achieving the smallest decomposition rates of CH<sub>4</sub> hydrate was possible at a temperature of about 263 K. In addition, there is a dependence of the enhancement of the decomposition of gas hydrates on the grain size, the thickness of the powder layer, and the difference in temperature and pressure. Factors such as the large influence of the layer thickness and particle diameter strongly influence on the self-preservation mechanism. It is necessary to indicate different types of diffusion during the formation of CH<sub>4</sub> hydrate and during its decomposition. The inertia of the medium and the gas diffusion flow to a large extent limit the rate of gas hydrate formation and its growth both in the solid granule and through the aqueous film. Misyura and Koneko presented external heat exchange, which has a great influence on the decomposition of the CH<sub>4</sub> hydrate. It was demonstrated that there is a dependence of both the quantitative nature of the decomposition and the qualitative character of dissociation on heat exchange. Vlasov conducted an experimental study

showing the growth of gas hydrate with diffusion [116]. The activation energy and internal kinetic constant will play an important role. They determine the decomposition of gas hydrate on the surface of particles at positive temperatures. In this case, the gas hydrate is transferred to water and gas. There is no pore in the sample. Quite the opposite behavior of gas hydrate is observed at negative temperatures. The formation of porosity is due to the formation of gas hydrates and their decomposition.

Experimental studies on the formation of meso- and macropores on the surface of solid granules using scanning electron microscopy have been demonstrated by Kuhs et al. The size of the pore depends on the type of guest. A guest molecule (in this case, a water molecule) is embedded in the host framework. Porosity controls the kinetic behavior of samples [117]. When modeling the following factors must be considered: natural gas hydrates possess meso- and macropores, the extraction of which takes place both on the seabed and on the continent [118]. The specific surface area will influence on the rate of reaction between the gas and the solid porous particle. Porosity regulates the rate of dissociation of clathrate hydrate during self-preservation. The main factor that will be a limitation for the decay behavior is the filtration inside the porous particle [119]. Porosity must be taken into account during chemical transformations and during the combustion of solid fuels. The coverage of gas hydrate combustion concerns both the issue and safety issues.

Critical concentration of flammable gas can cause many detrimental effects (spontaneous ignition of CH<sub>4</sub> and its explosion). With the formation of a water film on the surface of a solid powder, ice and methane, the decomposition of gas hydrate begins [120]. Here is a heterogeneous system with a hydrate-ice-water-methane gas.

Combustion of CH<sub>4</sub> hydrate in the presence of a forced near-wall laminar flow was studied in the works. Flame propagation rates were changed from 6 mm / s to 1 m / s, when the sample temperature changed from 193 K to 263 K [121]. This fact is associated with self-preservation.

## 7.2 Technologies of impact on unconventional hydrocarbons

The stability of gas hydrates is observed under some temperature and pressure conditions of gas and water. They are typical for permafrost areas, and for precipitation under the bottom of water bodies, which depth is about 450-500 mm. Typically, the place of their discovery is some continental margin and sedimentary basins. In the latter, compressive stresses function, the main cause of which is the extension of shear faults.

The peculiarity of gas hydrates is that they can accumulate a large amount of gas in small volumes. Therefore, they have a large resource reserve [122]. But all estimated data on the potential of gas hydrates were estimated approximately. The range of variation ranges from the maximum, which appear to be exaggerated, and made without taking into account the geological and geochemical restrictions, to the minimum, which were made, given the considerable number of factors that are restrictions for gas hydrate formations. Despite all this, all current estimates made by scientists in various ways agree that geological reserves of gas in hydrate form are enormous:  $3.1 * 10^{13}$ - $3.4 * 10^{16}$  on land  $3.1 * 10^{16}$ - $7.6 * 10^{18}$  m<sup>3</sup> are oceanic hydrates. If at least an insignificant part (10%) of these reserves is taken as recoverable, they will still surpass modern reserves of natural gas throughout the Earth, approximately two times [123].

According to many scientists, the carbon content in natural methane hydrates, compared to coal, is almost 2 times higher. From this it follows that methane hydrates are the main source of carbon in the earth's crust. Today, it can be said that methane hydrates in pallet rains are possible sources of energy in the future [124].

Another significant argument in favor of the exploration and development of gas hydrate deposits (GGZ) are small depths of location (when compared with traditional gas), as well as their widespread occurrence in the near-surface layers of the lithosphere [125].

At the same time, the mechanisms and conditions for the formation of gas hydrate deposits in the world, and the nature of their behavior in the geophysical time range, are largely unclear. The lack of ways to search for gas hydrate deposits and

sorting of gas hydrate deposits by reservoir properties should be considered an important constraint for research. Today there is no approach to the ranking of gas hydrate deposits by the methods of their development [126].

The most likely approach to solving the problems described above is the classification of gas hydrate deposits according to principles that reflect the geophysical ability of a particular type of gas hydrate accumulations, as well as the resource of their production.

In addition, the classification must contain information that allows you to choose one or another way to create gas hydrate deposits, depending on its type [127].

Methane hydrates exhibit metastability in the vicinity of the soles of the stability zone. If there is a rise in sea level and an increase in hydrostatic pressure at its bottom or a fall in the temperature of precipitation, the thickness of the layer begins to increase. It contains gas hydrates, if the dissolved methane in the right quantities in the water will be below the boundary of the stability zone.

When the sea level falls (the hydrostatic pressure decreases) or the temperature of precipitation increases, which include gas hydrates, the clathrate stability conditions may be violated. In this case, the lower limit of stability will be displaced upward, and therefore the process of dissociation of gas hydrates located here will begin [128].

Gas hydrates will dissociate, accompanied by the release of free gas, which accumulates itself under the lower boundary of the stability zone. Up to 164 m<sup>3</sup> of methane (gas phase) and 0.87 m<sup>3</sup> of water are present in 1 m<sup>3</sup> of gas hydrate. From this it follows that this is much more, compared to methane, in a unit volume of gas tanks, say at depths up to 1.5 km below the bottom. When clathrates dissociate in sediments, unnaturally high porosity will occur at a suitable depth. It also leads to the release of a huge amount of water [129]. Therefore, destabilization of gas hydrates will cause the deterioration of the strength properties of sediment formations at the dissociation site. The consequences will be catastrophic: these include the collapse of the slope, the subsidence and the huge landslides on the continental slope. Many of these phenomena have manifested themselves in some areas of the World Ocean. Gas hydrates will dissociate, accompanied by the release of free gas, which accumulates

itself under the lower boundary of the stability zone. Up to  $164 \text{ m}^3$  of methane (gas phase) and  $0.87 \text{ m}^3$  of water are present in  $1 \text{ m}^3$  of gas hydrate. From this it follows that this is much more, compared to methane, in a unit volume of gas tanks, say at depths up to 1.5 km below the bottom. When clathrates dissociate in sediments, unnaturally high porosity will occur at a suitable depth. It also leads to the release of a huge amount of water [129]. Therefore, destabilization of gas hydrates will cause the deterioration of the strength properties of sediment formations at the dissociation site. The consequences will be catastrophic: these include the collapse of the slope, the subsidence and the huge landslides on the continental slope. Many of these phenomena have manifested themselves in some areas of the World Ocean.

If there is a way to pass methane in the precipitation environment (zone of intensive formation of faults at the place of dissociation of gas hydrates), then it can rise up into the water and affect its biological community, and further into the atmosphere. Penetrating methane into the upper atmosphere, greatly enhancing the greenhouse effect, plays a significant role in climate change throughout the world. Its ability to influence global warming is almost 25 times greater than the equivalent ability of carbon dioxide.

The main geological method, indicating the presence of gas hydrates, and the ability to obtain them, is seismic modeling of the DOM. Usually on seismic sections in the form of a specific reflecting boundary, the lower boundary of the gas hydrates stability zone appears [130]. It was called the BSR (bottom simulating reflector), the apparent reflecting boundary on seismic records. It can be identified on a number of some distinguishing features. The correspondence of the position to the depth of the sole of the thermobaric zone of stability of gas hydrates is an indispensable sign of BSR. It is determined from geothermal data and, in most cases, is located at depths of 250-500 m below the sea bottom [131].

Despite the global prevalence of the zone in which gas hydrates could have stability in it, yet their distribution is presented in the form of accumulations, deposits of which are located in the indicated depths.

Another type of accumulation includes those that are located directly at the bottom of the outlets of fluid discharge, in the case that there are thermobaric conditions for the stability of gas hydrates. Considering the fact that under the lower boundary of these clusters, there may be no free gas in the sediments, the conditions of forming, clear and specific seismic reflections that are similar to BSR do not appear [132].

Many natural gases (propane, butane, ethane, hexane, isobutane, etc.) form hydrates that exist under certain temperature and pressure conditions. The main and widespread gas hydrates found in nature include methane hydrates, as well as carbon dioxide [133].

During gas production, hydrates are usually formed in industrial communications, highways, and in wells. Throughput is rapidly reduced during hydrate deposits on pipe walls. Various inhibitors are introduced into the pipelines as a fight against the formation of hydrates in all enterprises of the gas industry. These include methanol, various glycols, a solution of  $\text{CaCl}_2$ . Also try to stick to what would be the temperature of the gas stream was higher, compared with the temperature of formation of hydrates. This is done through heaters, insulation materials for pipelines, as well as the choice of operating mode. All of them are necessary to ensure that the temperature is at the maximum of the gas stream. To prevent the occurrence of hydrate formation in gas pipelines, gas drying is most often used [133].

### **7.3 Properties of gas hydrates**

Natural gas hydrate is a metastable substance. During the formation process, as well as their pyrolysis, gas hydrates are dependent on certain parameters [134]. These include: temperature, pressure, chemical composition of gas and water, etc.

Characteristic hydrates has a great variety. At the moment there are three main types of crystals:

- Massive crystals. Here, sorption of gas and water is involved in the formation of the crystal on its entire surface.

- Whisker crystals. Here the main role is played by tunnel sorption of molecules to the bottom of the growing crystal.

- Gel crystals. Formed in the volume of water from gas soluble in it, and in that case, if the conditions for the occurrence of hydrates will be achieved.

In the rock layers, hydrates are usually distributed differently. They can be a microscopic inclusion, and also have the appearance of forming particles of large size, practically up to lengthy layers of multimeter thickness.

The volume of gas hydrates has a clathrate structure. From this it follows that the composition of one unit of its volume includes on average 165-175 volumes of pure gas. The density of water and hydrate have different values, the latter is lower and amounts to about 900 kg / m [135-136].

#### **7.4 Research in the study of gas hydrates**

Recently, there has been a great increase in interest in the problem of gas hydrates throughout the world [137]. The increase in activity in relation to research can be explained on the basis of certain factors:

1. Activation of the search for finding alternative sources of hydrocarbon raw materials in the states that do not have energy reserves, since gas hydrates are related to unconventional sources of hydrocarbon raw materials, industrial research, which most likely will be launched in the near future;

2. The need to evaluate the role of gas hydrates on surfaces in geospheric layers, mainly given their likely impact on climate change throughout the world;

3. Study of the patterns of formation and pyrolysis of gas hydrates in the bowels of the Earth, with the task of arguing for prospecting and exploration of traditional hydrocarbon deposits (natural markers can be used as markers for simple oil and gas deposits, which are located very deeply);

4. Activity associated with the development of hydrocarbon deposits in difficult natural conditions (deep-water shelf, arctic zone), in which the problem of technogenic gas hydrates is very aggravated;

5. The reasonableness of reducing operating costs in the event of hydrates in the gas industry, thanks to the transition to energy-saving, as well as environmentally friendly technologies [138-139];

6. Possible consumption of gas hydrate technologies during storage and transportation of natural gas.

The development and construction of two special chambers, with the help of which experiments were conducted to study gas hydrates and rocks containing hydrates, were conducted in 1986-1988. Thanks to one of them, using a special optical microscope, it was possible to observe the processes of formation and decomposition of hydrocarbon gas hydrates [140]. It was possible to study the processes of formation and decomposition of hydrates, the structure of which was determined by the shift of the inner liner in rocks of different composition, with the help of the second chamber.

## **7.5 Gas hydrates of Lake Baikal**

### **7.5.1 Gas hydrates in the surface layer of deep-water sediments of Lake Baikal**

Among the most significant current achievements of Russian scientists who are investigating gas hydrates is undoubtedly the discovery of methane hydrate in the place where Baikal precipitates. By this time, deposits of methane hydrates were known in the sediments of the seas on the outskirts. At the end of the twentieth century, a large organization that included teams of researchers from Belgium, Russia, the USA and Japan experimentally proved the presence of methane hydrates in the sediments of Lake Baikal [141].

The formation of gas hydrates in the sediments of water bodies is accompanied by a combination of certain conditions:

1. Low temperature, which may not be below zero.
2. High pressure.
3. The required amount of gas (for example, methane) and water.

The gas hydrates stability zone, the boundaries of which can be found on the basis of phase diagrams, is determined by thermobaric conditions. Having accumulated data on the relief, temperature, and heat flux through the bottom, they were identified in the sediments of the Lake in the 1970-1980s. At the moment it is known that at depths greater than 300 m, the average annual temperature varies slightly, and is

approximately  $(33 + 0.2) \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Judging by the phase diagram, the possibility of hydrate formation of methane, at a given temperature, can occur at a pressure of 3.5 MPa [142].

This pressure can be provided by a layer of water, the thickness of which is about 350-400 m. Thus, the thermobaric conditions necessary for the formation of methane hydrates are present in the bottom sediments throughout the deep water (approximately 450 m) in Lake Baikal. Moreover, there is a coincidence of the bottom surface with the upper boundary of the stability zone [143]. The location of the lower boundary of the stability zone can be analyzed by means of a phase diagram of the precipitation temperature. It should be emphasized that, based on the values of the heat flux, the determination of which today was found at about 800 points of the day of Lake Baikal, the calculation of pallet temperatures is very unreliable [144].

In 1997, for the first time, a projected map of the depth of the location of the lower boundary of the gas hydrate stability zone in the sediments of the entire Lake Baikal was published. The substantial power of the methane hydrates stability zone is inherent in Baikal. In total, there is a correlation of power with the entire depth of the lake: according to forecasts, the highest values of the stability zone's power (more than 600 m) are in the Central Deep Depression, if we speak about the Northern hollow, then in its sediments such layer exceeds 250 m only in some places. The pinch-out of the gas hydrate layer is observed on the lakes whose depth is less than 400 m and in the zones of geothermal anomalies. It should be noted that the geothermal forecast can only produce a designation of the precipitation layer, in which there are thermobaric conditions necessary for the formation of gas hydrates, but not providing information on the presence or absence of real hydrates [145].

Six underwater wells were drilled during the implementation of the international program "Baikal-Drilling" in 1993-1999. In 1997, one of these wells was drilled in the central part of the South Baikal depression. Judging by the forecasts of geophysical data, this is the place where the most powerful gas hydrate layer (300-350m) was located. It is worth emphasizing that due to the complexity of the conditions of geology, the well was passed only to a depth of 225 m. From the upper part of the wellbore (up to 42 m) and from a depth of 121 and 161 m, it was possible to lift the

core upwards. The geological section, which was restored by core fragments, and according to the logging data, appeared to be composed of mainly sandy turbidites (a layer of granular sand with a thickness of 3-90 cm) with interlayers of thin clays. Turbidite deposits become natural gas traps due to the presence of dense clay interlayers. The gas can pass into the gas hydrate form if it accumulates under favorable temperature and pressure conditions [145]. Detection of gas hydrates in the upper part of the section was not crowned with success, however, from time to time enhanced gas evolution (in particular, methane, 74% by volume) was noted from the wellbore. And only the core samples, raised from the depths of 121 and 161 m, the temperature of which was above 8–9 g., were frozen sand-silt materials. This material was released during the heating of the gas. Thawing, these samples lost strength and eventually crumbled. Considering that this core was taken from the regions of positive temperatures, it was frozen when it reached the surface. This was the most obvious sign of the presence of gas hydrates in the sediment [146]. Raising samples to the surface, decomposition of gas hydrates occurred with the absorption of heat, leading to a fall in precipitation temperature of 10-15 grams, freezing them, as well as slowing down further decomposition of hydrates due to the conservation effect. Most likely, these phenomena began to occur while drilling the BDR-97 well. Investigating one of the core samples, actually on board the drilling complex, we came to the conclusion that the gas output from this sample exceeded the gas release from the sediments of the remaining subsea wells 10 times. Due to the aggregate data, it was concluded that the core samples contain gas hydrates. Measures were taken to preserve them and give the opportunity to conduct comprehensive studies [147].

The first few days the core samples were in the freezer, then they were placed in liquid nitrogen. Further, this material was sent to the laboratories of the Research Institute of Irkutsk, Novosibirsk, and Japan. There it was studied using various physicochemical methods.

In the course of comprehensive studies, measurements were made of the volume of gas that was released during the thawing of the precipitate, and of the gas

mixture by chromatographic, isotopic, and some other methods. The electrical conductivity and ion composition of pore tubes were found [148].

Ammonium cations and bicarbonate anions, which are indicative of the presence of reducing conditions in the sediment, are dominant in the composition of the aqueous extract of the core. The content of chloride ions here is about 1.5–2 times lower when compared to cedar pore waters taken from the BDR-93 well at a depth of more than 50 m, which do not include gas hydrates. Low concentration of chloride ions in the pore waters of sediments is considered an indirect sign of the presence of gas hydrates in sediments.

Comprehensive studies have confirmed the presence in the core of methane hydrates ( $\text{CH}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) with a content of about 3.3% (mass). In addition, carbon dioxide is available, and ethane and propane (<0.005%) in small quantities. There is no doubt that most of the gas hydrate in the rock was decomposed during storage and during transportation. Its actual content in situ is much higher, and probably amounts to 10-20% (mass).

Table 7.5.1 – Ionic composition of pore waters

Jonah	Content, mcg / g	Jonah	Content, mcg / g
pH	6,28	$\text{HCO}_3^-$	151
$\text{NH}_4^+$	48	$\text{F}^-$	6
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	18	$\text{Cl}^-$	17
$\text{Na}^+$	12	$\text{NO}_3^-$	2,5
$\text{K}^+$	12	$\text{SO}_4^{2-}$	7
$\Sigma$ cations	90	$\Sigma$ anions	184
The total content of ions - 274 $\mu\text{g}$ / g of the original rock			

## 7.6 Search and discovery of pallet gas hydrates

In 1998-1999 after conducting geophysical work in the southern basin of Lake Baikal, researchers were able to identify the bottom section within which all the conditions exist for the formation of gas hydrates in the sub-sediments [148].

For the study of gas-emitting structures, geological and geophysical studies were organized in March 2000. Their diameter was 100–200 m at depths greater than 1,300 m. It is rather difficult to explore such small objects at the bottom of a drifting vessel. The presence of a very powerful layer of ice in wintertime was undoubtedly an advantage for Baikal, compared to other waters, if we take into account the possibility of studying them. In the future, studies in the area of all found volcanoes included sampling of sediments in the central parts of the crater with groundwater pipes 1-2 m long. They also included sampling of water and gas for chemical analyzes [149].

Of particular interest were the results obtained in the crater of the Small volcano. 17 cores were selected there on an area of 150 m in radius, the length of which did not exceed 15-67 cm. Still, white crystals of gas hydrate went up after a dirt tube was lowered several times, at one of the stations from the center of the surveyed area. Thus, for the first time, a visual observation of gas hydrate crystals occurred in the sediments of Lake Baikal. At the bottom of the core, the thickness of the hydrated layer is 10 cm. Above was a 25 cm layer of aleurite-pelitic diatom silt with traces of recent processing [150]. Most likely, they revealed only the uppermost part of the gas hydrate deposits. Due to the limited penetration of the soil pipes, it was not possible to pass through the hydrate layer. Gas hydrates crystals were preserved in liquid nitrogen. After conducting laboratory studies, the researchers came to the conclusion that they contain methane of biogenic origin. Since 2002, quite often methane hydrates have been taken from the ship here in the summer [151].

In addition to the sampling of sediments, vertical sounding of the bottom water layer was also carried out using a CDT instrument. It calculated autonomous temperature changes, electrical conductivity, water transparency at the bottom, as well as its oxygen content [152].

## **7.7 Gas hydrates of the Sea of Okhotsk: patterns of formation of their distribution**

### **7.7.1 Features of gas hydrate manifestations in the outlets of fluids in the Sea of Okhotsk**

One of the goals of the expedition of the Institute of Oceanology of the Academy of Sciences of the USSR in 1986 was the study of the proposed hydrotherm near Paramushir Island, a feature of which was considered a gas “torch” on echo sounders, repeatedly observed since 1982. In addition, the increased content of dissolved hydrogen, methane, and silicic acid have also been considered as a sign of hydrothermal discharge on the seabed [152]. During the expeditionary research, it was found that the “torch” observed on the echogram was not the result of hydrothermal activity, but was caused by exits at the bottom of gas bubbles.

In the coast near Paramushir gas outlets were located at the top of the rampart (768 m depth of the sea) about 400 m wide, 800 m long and 15 m in height. The seabed in the area of the discharge point is characterized by the presence of holes and craters, ground depletion, and also the presence of massive carbonate crusts covered with white scurf, often hanging over the pits and forming irregularly shaped plates and cavernous bumps. It is assumed that such carbonate crusts were formed as a result of the saturation of water with carbon dioxide that is released during the ascent of methane flows [153]. It should be noted that, to date, many foci of submarine discharge of gas-saturated fluids have been identified, where autogenic mineral formation is observed. In particular, in the Black Sea, in the Oregon coast, in the area of the Varing Plateau in the Norwegian Sea, deposits in fluid discharge sites include numerous hydrate formations (crusts, tinkers, carbonized shells, etc.) often combined with bacterial mats (communities of methanotrophic organisms), similar in appearance to the white bloom found on carbonate crusts in the coastal zone of Fr. Paramushir [154].

In the expedition since 1986, samples of new gas hydrates were raised at two stations. At one of the stations, gas hydrates were found at a pallet depth of 185 cm — there was a layer of a continuous snow-white hydrate 2 cm thick at the tip of the earth

pipe. It is assumed that the raised unit was cut off by a tube from a more powerful hydrated body. Above the gas hydrate layer, a layer of loosened (crumbling) over a thickness of about 10 cm is observed, at the bottom of which fast-decomposing lenses (millimeter) gas hydrates were found [155]. At another station, a layer with thin shallow lenses of hydrates was found in the bottomhole interval of depths of 220–240 cm, and a meter-thick layer of loosened sludge was located above. Gas hydrate-bearing sediments are black, siliceous diatomic-volcanoclastic silty silts with thin layers (up to 1-2 cm) of silt; sediments have a strong odor of hydrogen sulfide. Chemical analysis of the hydrated gas composition showed that it consists of 97.8% methane and contains 0.045% ethane, 0.0001% propane, 0.0896% carbon dioxide [155]. Methane carbon was relatively “light” in isotopic composition: the  $\delta^{13}\text{C}$  value was -54 PDB (PDB - *Belemnitella Americana* from the Pidi Formation of Minor Age in South Carolina is the generally accepted standard for the isotopic composition of the hydrocarbon) [156].

Gas hydrate manifestations in the coastal area of Paramushir was also investigated in the VNIIOkeanologiya expedition in 1991. The gas “torch” was crossed by five survey profiles and fifteen profiles with sampling and geothermal measurements, which made it possible to clarify its location [156]. The diameter of the “torch” near the seabed, according to the echo sounder intersection, is 350-400 m. Gas hydrates were found at two stations located near the western edge of the “torch”, and one of them was outside. At a number of other stations, indirect signs of hydrates were detected (low concentration of chloride ions in pore water, increased gas content and flooding of sediments, smell of sulfur, carbonation of sediments) [156]. Gas hydrates in the form of simplified irregular fragments (ranging in size from a few millimeters to 7 cm along the long axis) were found at a palmar depth of 10-40 cm in clay-aleuritic sediments with numerous inclusions of carbonate crusts, strains, carbonated shells of bivalve mollusks and their fragments [157]. The gas chromatography data confirmed the prevalence of methane in the composition of the hydrated gas, whereas the  $\delta^{13}\text{C}$  value of methane carbon was significantly lower than that obtained for the hydrated gas on the expedition of 1986, and amounted to -67.3% [157].

On the coast near Sakhalin carried out ground sampling was carried out on three fields of a submarine gas unloading. The most interesting results were obtained in the area of one of the fields where gas hydrates were found at five soil stations. Alevropelites enclosing gas hydrates were predominantly represented by diatom silts with an insignificant admixture of terrigenous material. The depth of the roof of gas-hydrate-containing sediments varied from 0.3 to 1.2 m, and their exposed thickness ranged from 0.1 to 1 m. At all stations, gas hydrates were traced down to slaughter [158].

### **7.7.2. Mechanisms of formation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk**

The confinement of known accumulations of gas hydrates in the Sea of Okhotsk to the sources of gas unloading is beyond doubt [3]. Accumulations of this type have a number of features. Let us consider them within the framework of the geological model of gas hydrate formation in the discharge sites proposed in the works, taking into account some other published data and new materials [158].

Gas hydrates in the clusters under consideration are formed at very small palmar depths, in particular, in the coastal zone of Fr. Sakhalin they were found in the range of palmar depths from 0.3 to 1.2. The existence of gas in the hydrate phase in the immediate vicinity of the seabed is possible only under conditions of its constant inflow from below. This is evidenced by the significant content of gas hydrates in sediments noted in some cases (up to 40%). The depth of the sea near Sakhalin and Paramushir ranges from 600 to 1000 m, hydrostatic pressure varies from 6 to 10 MPa, and the bottom temperature varies in the range of 2.2-2.3 °C and 1.7-2.2 °C, respectively. The stability zone of methane hydrates at such values of temperature and pressure at the bottom can extend to palmar depths of at least 100 m [159]. The position of the lower boundary of this zone is determined by the magnitude of the geothermal gradient, whereas the depth of hydrate-containing sediments depends primarily on the intensity of the upward flow of gas. The more intense the gas flow, the gas hydrates can form at a lower palmar depth. The increase in the depth of the roof of hydrate-containing

sediments found during recent expeditions is probably evidence of a decrease in the intensity of the upward flow of gas with the time [159].

The coexistence of gas hydrates and various formations of autogenic carbonates (nodules, crusts, etc.) in the free gas discharge zone are most likely due to methane oxidation leading to water saturation with carbon dioxide and subsequent precipitation from carbonate solutions [160].

### **7.7.3. Thermobaric parameters and reserves of gas hydrates of the Sea of Okhotsk**

Initially, it was assumed that the submarine gas hydrates are formed as a whole, from the autigenic biochemical gas, and all the generating, biochemical and canagenetic gas enters the zone of formation of gas hydrates, where it is stabilized in hydrate form. In addition, it was assumed that gas hydrates are mainly distributed in the ocean almost everywhere within the entire thermobaric zone of their stability, and their deposits are in the form of a continuous layer. In this layer, impervious to free gas, free hydrocarbons are formed [161]. From these assumptions it followed that the amount of gas hydrate gas is much higher than the equivalent total resources of coal, oil and natural gas on the planet. Estimates of the amount of methane in submarine gas hydrate accumulations are based on the distribution of the seismic horizon BSR (Bottom Simulating Reflector), marking the sole of the stability zone of gas hydrate waters. Clarification of estimates of gas hydrate gas resources requires more careful consideration of the specifics of the presence of gas hydrates in the waters of the World Ocean.

Thermobaric conditions of their existence are typical for most of the bottom of the World Ocean with water depths of more than 300-400 m on the Arctic shelf. The zone of stability of gas hydrates is associated with the presence of a submarine cryolithozone and can exist at a much smaller water depth if the base of the cryolithozone is at a depth of more than 260 m from sea level. The bottom depth of the gas hydrate stability zone averages 400-600 m [162].

The most common natural gas-hydrate forming agent in submarine conditions is methane.

Geothermal assessment of the depth of the gas hydrate layer base is an example of the integration of geophysical methods. In those areas of the World Ocean, where there is a fairly dense study of heat flow and reliable data obtained on the temperatures at the bottom of the reservoir, as well as the density characteristics of sedimentary rocks, the pressure and temperature parameters at the bottom of the hydrate-containing layer were used to calculate the pressure in the sediments.