

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 НОЦ И.Н. Бутакова

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Эффективные условия охлаждения элементов корпусов теплотехнического оборудования

УДК 621.1.002.5-214-046.47

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Хомутов Никита Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Стрижак Павел Александрович.	д.ф-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Пискунов Максим Владимирович	к.ф-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопрigора Игнат Валерьевич	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель профиля ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника	Антонова Александра Михайловна.	к.т.н		

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
Профессиональные компетенции	
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать

	опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

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

Подразделение: Инженерная школа энергетики

Направление подготовки: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Отделение: НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) Антонова А.М.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
5Б5Б	Хомутову Никите Андреевичу

Тема работы:

Эффективные условия охлаждения элементов корпусов теплотехнического оборудования	
Утверждена приказом ректора (дата, номер)	УДК 621.1.002.5-214-046.47

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2019

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

- объект исследования: физико-химические свойства исследуемых хладагентов связанные с эффективностью отведения избыточной тепловой энергии от теплонагруженных поверхностей ограждающих конструкций энергетического оборудования. Исследуемые объекты: водопроводная, морская вода, солевой раствор, суспензии глины и графита на основе воды.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Аналитический обзор литературы по тематике исследования. Исследование физико-химических свойств хладагентов. Обработка экспериментальных данных. Анализ результатов и формулировка выводов по результатам экспериментального исследования.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Основной раздел	Стрижак Павел Александрович
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Сотникова Анна Александровна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2019
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Стрижак П.А..	д.ф-м.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Хомутов Никита Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б5Б	Хомутову Никите Андреевичу

Школа		Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01.Теплоэнергетика и теплотехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Зарботная плата рассчитывается исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ Прочие и накладные расходы определяются исходя из суммы полной заработной платы исполнителей технического проекта.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент составляет 30%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления в социальные фонды – 28 % от ФЗП

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка потенциала и перспективности реализации ТП можно оценить с помощью SWOT-анализа и интегральной оценки ресурсоэффективности.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Для составления графика технико-конструкторских работ используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным строится график инженерных работ, позволяющий лучше спланировать процесс реализации ТП
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	В процессе формирования сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям: • материальные затраты ТП; • затраты на специальное оборудование; • полная заработная плата исполнителей; • отчисления во внебюджетные фонды; • накладные расходы.

Перечень графического материала

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.04.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Хомутов Никита Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б5Б	Хомутову Никите Андреевичу

Школа		Отделение	НОЦ Н.И. Бутакова
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 «Теплоэнергетика теплотехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: Эффективные условия охлаждения элементов корпусов теплотехнического оборудования

1. Характеристика объекта исследования	Объектом исследования являются элементы корпусов теплотехнического оборудования ТЭС и АЭС. Исследования проводились в лабораторных условиях.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. В соответствии с СН-245-71 в помещении должен быть организован воздухообмен. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Общие эргономические требования. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.
2. Производственная безопасность	5.1. Вредные факторы при функционировании теплотехнического оборудования. Отклонения температуры и влажности воздуха от нормы; недостаточная освещенность, воздействие электромагнитного излучения, термический ожог, движущиеся и работающие механизмы и оборудование, повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации 5.2. Факторы опасностей при функционировании теплотехнического оборудования: поражение электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	- воздействие на атмосферу (выбросы);
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС на объекте: техногенного характера - пожар;

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Б	Хомутов Никита Андреевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 105 с., 23 рис., 28 табл., 28 источников.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, распад, капли, высокотемпературные среды, газовые среды, поверхности, теплообмен, жидкости, отвод, энергия, теплонагруженные конструкции, металлические конструкции, испарения, воды, гетерогенная жидкость, интенсификация.

Объектом исследования являются элементы корпусов теплотехнического оборудования ТЭС и АЭС

Цель работы – экспериментальное исследование взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов на основе однородных жидкостей, растворов и суспензий с охлаждаемой поверхностью, а также создание технических рекомендаций, направленных на усовершенствование существующих мер по защите ограждающих конструкций теплоэнергетического оборудования от критических перегревов, приводящих к их физическому повреждению

Поставлены задачи по определению воздействия добавления растворимых и нерастворимых примесей в объём воды на характеристики процессов высокотемпературного испарения и кипения при охлаждении металлических поверхностей, а также на закономерности гидродинамического взаимодействия одиночных капель с нагретой поверхностью. Определить гидродинамические режимы взаимодействия одиночных капель хладагента с горизонтальной нагретой поверхностью. Определить оптимальные (ресурсоэффективные) условия охлаждения металлоконструкций при использовании в качестве хладагентов неоднородных жидкостей на основе воды в случае чрезвычайной ситуации на ТЭС, связанной с перегревом оборудования.

Выпускная квалификационная работа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Word 7.0 и представлена в распечатанном виде на листах формата А4.

Оглавление

Введение	11
Глава 1. Обзор научной литературы.....	14
Глава 2. Экспериментальное исследование процессов взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов на основе однородных жидкостей, растворов и суспензий с охлаждаемой поверхностью	26
2.1. Экспериментальный стенд и методика исследований эффективности применения различных хладагентов на основе воды для быстрого охлаждения металлических поверхностей	27
2.1.1. Процедура проведения экспериментального исследования с использованием спрейного охлаждения	29
2.2. Описание экспериментального стенда для изучения взаимодействий одиночных капель с поверхностью	32
2.2.1. Процедура проведения экспериментального исследования с одиночным падением капли на нагретую поверхность	36
2.3. Оценка погрешностей	39
Глава 3. Анализ результатов экспериментальных исследований	42
3.1. Эффективность спрейного охлаждения	42
3.2. Определение критериев подобию	48
3.3. Анализ падения одиночных капель хладагента на нагретую поверхность	54
3.4. Связь экспериментальных исследований взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов с нагретой поверхностью.	65
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	67
4.1. Swot-анализ.....	68
4.2. Календарный план-график выполнения работ	74
4.3. Смета бюджет-проекта	78
4.4. Ресурсоэффективность	82
Глава 5. Социальная ответственность	85
5.1. Социальная ответственность	85

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	88
5.3. Производственная безопасность	90
5.3.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов	90
5.3.2. Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя	95
5.4. Экологическая безопасность	97
5.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	98
Заключение.....	101
Список использованных источников	103

Введение

Современные тепловые агрегаты, в частности атомные станции, имеют очень высокие температуры тепловыделяющих и теплообменных поверхностей. Несмотря на постоянно модернизирующиеся системы контроля параметров реактора, аварийные ситуации на атомных станциях всё ещё могут произойти. Ярким примером служит авария на АЭС Фукусима-1 (2011), когда из-за ряда причин не удалось остановить рост температуры и давления внутри реактора. Потребовалось быстрое охлаждение сильно нагретых конструкций станции. Следствие подобных ситуаций – необходимость в возможности быстрого уменьшения температуры различного рода материалов.

Наиболее существенное влияние на время охлаждения оказывает явление, называемое плёночным кипением, когда между охлаждаемой поверхностью и охладителем появляется тонкая паровая прослойка. Плёночное кипение замедляет процесс охлаждения, при нём не наблюдается пузырькового кипения. Паровая прослойка служит своего рода изолятором между охладителем и нагретой поверхностью. Явление наблюдается лишь при достижении определённой температуры охлаждаемого материала. С понижением температуры паровая плёнка схлопывается, начинается кипение и интенсивное охлаждение. Если уменьшить время существования плёночного кипения или совсем его исключить, можно добиться более эффективного охлаждения.

Как уже было отмечено, плёночное кипение возникает при достижении определённой температуры охлаждаемой поверхности. В работах [1-3] показано, что такая минимальная температура для установления плёночного кипения (МТПК) является важным критерием для существования ещё одного явления, называемого паровым взрывом. В различных экспериментах этой области исследований измерялась данная минимальная температура для оценки эффективности.

Для решения данной задачи необходимо изучить протекание тепломассообмена при охлаждении поверхностей, а также гидродинамические

процессы при взаимодействии капель хладагента с сильно нагретой поверхностью. С помощью экспериментального моделирования, можно выявить определённые режимы, имеющие характерные общие признаки.

В данной работе по изучению гидродинамических режимов взаимодействия на первом этапе исследований, особое внимание уделялось визуальному выделению схожих по протеканию процессов. Каждому из полученных режимов давалось условное название, в большей мере характеризующее процесс. Далее проводилась обработка полученных режимов с использованием гидродинамических критериев подобия с целью дальнейшего идентифицирования подобных режимов в явлениях взаимодействия капель хладагента с нагретыми поверхностями.

В основе проведения экспериментов и классификации режимов использовались научные статьи, имеющие подобные темы исследований. Их краткий обзор представлен ниже.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов на основе однородных жидкостей, растворов и суспензий с охлаждаемой поверхностью, а также создание технических рекомендаций, направленных на усовершенствование существующих мер по защите ограждающих конструкций теплоэнергетического оборудования от критических перегревов, приводящих к их физическому повреждению. Для достижения поставленной цели были взяты такие условия исследования ($T \approx 1000 \text{ K}$), которые являются максимально приближенными к реальным ситуациям перегрева корпусов (ограждающих конструкций) теплонагруженного оборудования ТЭС.

В ходе исследования решались следующие задачи:

1. разработка и монтаж двух многофункциональных экспериментальных стендов для исследования взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов на основе однородных жидкостей, растворов и суспензий с охлаждаемой поверхностью;
2. создание экспериментальных методик исследования изучаемых процессов на основе метода высокоскоростной видеорегистрации;
3. экспериментальное исследование влияния добавления растворимых и нерастворимых примесей в объём воды на характеристики процессов высокотемпературного испарения и кипения при охлаждении металлических поверхностей, а также на закономерности гидродинамического взаимодействия одиночных капель с нагретой поверхностью;
4. определение и характеристика гидродинамических режимов взаимодействия одиночных капель хладагента с горизонтальной нагретой поверхностью;
5. определение критериев подобия Re и We для двух методик;
6. экспериментальное исследование влияния материала используемых металлических поверхностей на процесс охлаждения;
7. сравнение результатов экспериментальных исследований и объяснение их взаимосвязи;
8. установление оптимальных (ресурсоэффективных) условий охлаждения металлоконструкций при использовании в качестве хладагентов неоднородных жидкостей на основе воды в случае чрезвычайной ситуации на ТЭС, связанных с перегревом оборудования.

Глава 1. Обзор научной литературы

Рассмотрим некоторые научные работы, в которых изучались охлаждение распылением, плёночное кипение и собственно режимы кипения. Также рассмотрим научные работы, в которых изучались взаимодействия одиночных капель хладагента или иных жидкостей с горизонтальной нагретой поверхностью.

В исследовании [4] основное внимание уделяется действию капли воды на нагретую поверхность. Использовалась ИК-термография, толщину паровой плёнки определяли на основе оценок теплового потока. В результате исследования было выявлено, что тепловой поток и толщина паровой пленки обратно пропорциональны, поскольку в теплопередаче преобладает теплопроводность в паровой пленке. Измерения также показали, что паровая плёнка растёт со временем в зоне приземления капли до тех пор, пока капля не распадается.

В означенных экспериментах [5] водой (температурой 10-50 °С) охлаждалась пластина, нагретая до 1000 °С путём спрейного охлаждения. Также для охлаждения применялась смесь воздуха и воды.

Результаты показали, что с уменьшением температуры воды скорость отвода тепла возрастает в режиме переходного кипения из-за уменьшения действия плёночного кипения. С уменьшением температуры воды уменьшались числа Вебера и Био, паровая плёнка становилась более нестабильной.

Также было рассмотрено изменение скорости охлаждения с плотностью соударения и скоростью воздушного потока. Результаты показали, что при температуре воды 15 °С скорость охлаждения растёт с увеличением плотности соударения из-за уменьшения эффекта плёночного кипения и склонности к агломерации поступающих капелек с частично испарёнными каплями. Однако при температуре воды 50 °С из-за сильного эффекта плёночного кипения скорость теплоотдачи снижается с увеличением плотности распыления.

В работе [6] проводились исследования влияния начальной температуры поверхности на охлаждение распылением хладагента R21.

Температуры поверхности в ходе опыта варьировались от 71,8 до 132 °С. Удельный тепловой поток нагревателя составлял 56,18 Вт/см². Для температур меньше 112,3 °С наблюдалось быстрое падение температуры до равновесного состояния. Для более высоких температур наблюдалось появление пологого участка между двумя быстрыми падениями температур на графике.

В ходе исследования было выявлено, что скорость охлаждения уменьшается с увеличением теплового потока нагревателя и расстояния от сопла до охлаждающей поверхности. С увеличением расхода скорость охлаждения увеличивается.

В экспериментальном исследовании [7] стальную пластину AISI 304 толщиной 100 мм (100 × 100 мм) охлаждали распылением морской водой, а также водой с солью, водой с ПАВ и др. Поверхностный тепловой поток и температура поверхности были рассчитаны решением обратной задачи теплопроводности (ИНСР).

В работе изначально были определены такие показатели, как оптимальный расход и высота сопла. Проведены эксперименты с чистой водой, морской водой, а также другими хладагентами с различными добавками.

Результаты показали, что охлаждение морской водой повышает скорость теплопередачи из-за явления осаждения соли на горячей поверхности и создания более высокой площади теплообмена во время испарения капель. Усиление связано с приращением NaCl в смеси; кроме того, морская вода создает высокий тепловой поток из-за самого высокого осаждения соли. Критический поверхностный тепловой поток для морской воды в 1,28 раза выше, чем охлаждение струей чистой воды.

При увеличении высоты сопла скорость теплопередачи снижается из-за снижения импульса и увеличения зоны распыления. Оптимальная высота и скорость сопла получились равными 40 мм и 96,88 кг/м² с соответственно.

Среди всех хладагентов максимальный тепловой поток достигается в случае охлаждения водой с добавлением 0,4 М NaCl из-за максимального осаждения соли на горячей поверхности. При этом плёночное кипение исчезает или сильно уменьшается. Дальнейшее увеличение концентрации соли вызывает уменьшение теплового потока и ухудшение охлаждения.

Достигнутый критический тепловой поток в случае воды с добавкой соли в 1,6 раза выше, чем у чистой воды, тогда как при охлаждении морской водой прирост в 1,4 раза выше. Важно также отметить, что для всех хладагентов охлаждение происходит в режиме переходного кипения, за которым следует режим нуклеации.

В работе [8] для эффективного охлаждения воды её смешивают с бензолом, ацетоном и н-гексаном в разных сочетаниях, чтобы увидеть влияние удельного тепла и поверхностного натяжения на скорость теплопередачи. Стальную пластину нагревали до $\sim 950^\circ\text{C}$ в муфельной печи.

Результат показывает значительное увеличение скорости удаления тепла и увеличение теплового потока на 40, 30 и 20% с ацетоном, н-гексаном и бензолом соответственно. Также в работе рассчитывался массовый поток. Результат показал, что скорость отвода тепла увеличивается за счет увеличения массового потока от 46,55 до 96,88 кг/м² из-за образования капель в большом количестве, которые в свою очередь проникают в жидкие и паровые пленки. Максимальный тепловой поток достигался при расстоянии от сопла до плиты равным 40 мм. Поэтому оптимальный средний поток массы и расстояние от сопла до пластины составляют 96,88 кг/м² с и 40 мм соответственно.

В работе [9] для исследования характеристик теплопередачи за пределами критического теплового потока была изготовлена экспериментальная партитивная система охлаждения с замкнутым контуром. Безразмерные коэффициенты – число Рейнольдса, Вебера были получены согласно уравнениям и обозначались Re и We соответственно.

Как следствие, было выявлено, что эффективность теплопередачи значительно ухудшилась при достижении критического теплового потока. В этот момент температура поверхности увеличилась, а коэффициент теплоотдачи уменьшился до $0,17-0,2 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$. Когда тепловой поток уменьшался, способность к кипению теплоносителя восстанавливалась, и коэффициент теплопередачи увеличивался. Также был сделан вывод о влиянии в таком явлении паровой плёнки. Для анализа механизма охлаждения распылением были выбраны четыре безразмерных параметра, представляющих влияние капель, потока жидкой пленки, испарения теплопередачи и кипящего теплообмена. Когда критический тепловой поток был достигнут, с помощью этих параметров удалось выявить уменьшение коэффициента теплоотдачи.

В работе [10] экспериментально исследовали влияние геометрии и других характеристик поверхности на охлаждение капельным методом.

В экспериментах поверхностный материал представляет собой алюминиевый сплав (AlSi10Mg), жидкость – вода. Диаметр капли поддерживался на уровне 2,4 мм, использовались значения числа We 28, 122 и 202, а частоты капель варьировались от 0,79 Гц до 3,97 Гц. Все поверхности нагревались выше температуры Лейденфроста. Углы падения капель были 90° и 45° . Все результаты сравнивались с гладкой поверхностью. Используя высокоскоростную визуализацию, исследователи определяли динамику капель на нагретых поверхностях и выясняли влияние поведения капель на характеристики охлаждения модифицированных поверхностей. Результаты показали, что плотность поверхности играет важную роль в динамике капель. Когда плотность пластины была высокой, целостность капли может поддерживаться после удара. С другой стороны, увеличение высоты ребра обычно улучшает теплоотдачу капель на поверхности ребер. Наилучшие характеристики охлаждения достигались с поверхностью Globe при $We = 121$ и $\theta = 90^\circ$. Поверхность Globe представляет собой определенным образом спрофилированные ребра, расположенные на пластине (рисунок 1).

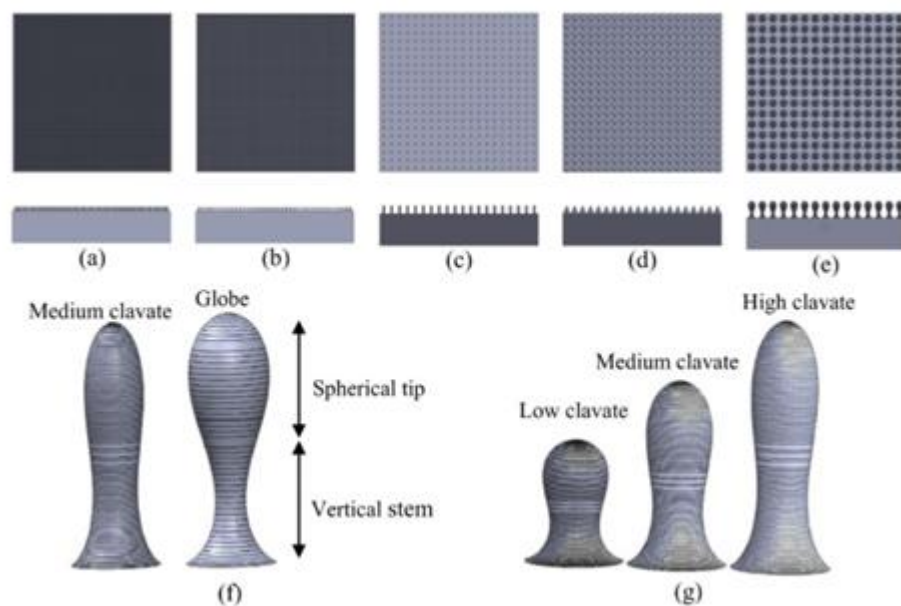


Рисунок 1 – типы поверхностей, используемых в исследовании [10]

В работе [11] экспериментальные измерения при охлаждении распылением проводились для двух нагреваемых поверхностей с разной шероховатостью и для двух разных типов сопел. В качестве охлаждающей жидкости использовался диэлектрический хладагент R134a.

Были испытаны две поверхности с двумя значениями шероховатости: сперва пластина с её первоначальной шероховатостью от завода, средняя шероховатость $\Delta = 0,56$ мкм; затем, после процедуры полировки, эксперименты проводились со средней шероховатостью $\Delta = 0,04$ мкм.

Несмотря на то, что в качестве релевантных были выдвинуты такие параметры как объемный расход, отношение шероховатости поверхности с трением, отношение трения и размера капель к времени пребывания жидкости над поверхностью, отношение механизма теплообмена испарения поверхности с временем пребывания жидкости над компонентом, нет четкого влияния этих параметров на средние изменения общей толщины пленки.

В означенном исследовании проанализировано и обсуждено влияние объёмного расхода, шероховатости поверхности и типа сопла (по параметрам распыления) на общую среднюю толщину пленки. Было обнаружено, что существует связь между изменениями среднего числа Нуссельта и толщины

пленки вдоль кривой кипения с распылительным охлаждением. Режимы теплообмена вдоль этой кривой связаны не только с изменением среднего числа Нуссельта, но и с изменениями толщины пленки.

Работа авторов [12] посвящена экспериментальному исследованию, направленному на изучение характеристик механизмов дезинтеграции, возникающих при воздействии отдельных капель воды и топлива на нагреваемые поверхности. В экспериментах рассмотрено использование упрощенной конфигурации потока и использование высокоскоростной визуализации вместе с методами обработки изображений для характеристики морфологии воздействия и количественной оценки результатов вторичного распыления с точки зрения размера и количества капель.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что топография поверхности, смачиваемость и свойства жидкости в комплексе изменяют поведение капель при ударе при различных температурах поверхности. Относительная значимость динамического давления пара, связанного со скоростью испарения и шероховатостью поверхности, возрастает с повышением температуры поверхности и становится доминирующей при режиме кипения пленки.

В работе [13] экспериментально представлены явления контактного испарения, включая сильное кипение зародышей, слабое кипение зародышей и испарение пленки при воздействии капли жидкости на нагретые поверхности. Также поведение пузыря обсуждается в отношении различных явлений. Вторичные капли при сильном кипении зародышей происходят не только от струй пагодоподобных пузырьков, но и в равной степени от растрескивания как простых, так и пагодоподобных пузырьков. При слабом кипении пузырьки подвергаются процессам расширения и отступления из-за воздействия испарения и конденсации. При испарении пленки все еще существуют маленькие растущие пузырьки внутри капли из-за начального захвата пузырьков. Во второй части представлены в основном геометрические параметры капли. Согласно результатам исследования разделенные стадии во

время испарения пленки, включая постоянную площадь смачивания в литературе, подходят только для воды. Её критический угол контакта, соответствующий резкому уменьшению диаметра контакта, составляет около $5-8^\circ$ градусов. Процесс удара оказывает незначительное влияние на капельное испарение и скорость испарения, а также средний тепловой поток линейно увеличиваются с температурой поверхности.

В статье [14] сообщается об экспериментальном исследовании воздействия одиночных миллиметровых капель воды на поверхность горячего алюминиевого сплава (AlMg3). Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы доказать влияние механизма теплопередачи на вторичное распыление. Помимо основной цели была дополнительная: изучить влияние скорости удара и характеристик поверхности на результаты удара.

Два не интрузивных метода измерения, а именно фазовый доплеровский анемометр и анализ изображений использовались для описания временной эволюции диаметров вторичной капли и для изучения влияния температуры поверхности, шероховатости поверхности и скорости удара на результаты воздействия. Морфология удара капли описана для двух различных режимов кипения, и представлены количественные результаты о среднем арифметическом и среднем значениях Саутера вторичных капель. Также сообщается о попытке соотнести средний диаметр вторичных капель по Заутеру с номинальной температурой поверхности.

Эксперименты в работе [15] проводились для оценки теплопередачи монодисперсных аэрозолей больших диаметров капель в диапазоне от 3 до 25 мм на высокотемпературных поверхностях. Этот диапазон размеров капель ранее не изучался, чем был вызван интерес определить их характеристики теплопередачи и то, как они относятся к брызгам более мелких капель. Параметрические испытания показали, что тепловой поток при распылении зависит от массового потока со степенной зависимостью и что эффективность распыления, которая связывает фактическую теплопередачу при распылении с максимальным потенциалом теплопередачи, изменяется в зависимости от d

– 1/2. Не было заметной связи между теплопередачей и скоростью капли. Эти результаты благоприятно согласуются с опубликованными результатами для более мелких капель. Текущие данные сравнивались с предыдущими тестами с меньшими каплями, используя числа Рейнольдса и Вебера. Этот анализ показал некоторую группировку с заметным разделением при $We = 80$, где было показано, что динамическое поведение капель изменяется для несмачивающего удара.

В работе [16] морфология удара вязкопластичных капель на нагретой поверхности в режиме Лейденфроста исследована экспериментально методом высокоскоростной визуализации. В частности, некоторые важные параметры, которые характеризуют морфологию удара (такие как максимальный диаметр разбрасывания, минимальный диаметр втягивания и максимальная высота отскока и т. Д.), измеряются путём анализа процесса удара, записанного с помощью высокоскоростной камеры. В означенном исследовании наглядно продемонстрировано, что с ростом предела текучести поверхностные силы больше не способны минимизировать свободную поверхность капли и инерционная деформация при ударе становится постоянной. При малых значениях предела текучести ударная морфология капель Лейденфроста из вязкопластика аналогична морфологии ньютоновских капель. Эти эффекты можно интерпретировать с точки зрения числа Бингама – Капилляра, которое сравнивает величину предела текучести и капиллярное (лапласовское) давление. Эти результаты предполагают, что основной вклад в отскок капли обусловлен поверхностными силами, а не внутренней упругостью паровой подушки между каплей и поверхностью, что является основным допущением в одной из существующих моделей.

В статье [17] влияние капель разбавленного раствора полимера (равновесный диаметр: ~ 3 мм) на горячую поверхность в режиме Лейденфроста изучается экспериментально с помощью высокоскоростной визуализации в диапазоне ударных чисел Вебера между 10 и 200 и сравнивается с воздействием капли воды в тех же условиях. В качестве

модельных вязкоупругих жидкостей использовались разбавленные растворы полиэтиленоксида (ПЭО) в деионизированной воде с массовой концентрацией полимера в диапазоне 100–400 м.л. Данные результаты подтверждают предыдущие, которые в свою очередь показывают, что полимерные добавки вызывают уменьшение максимального диаметра разбрасывания и увеличение максимальной высоты отскока капель уже при низких концентрациях полимера. Это говорит о различном распределении начальной ударной кинетической энергии по отношению к каплям чистой воды. Анализ колебаний капли не показывает значительного влияния концентрации полимера на динамическое поведение капли, которое одинаково в ньютоновских и вязкоупругих каплях.

В работе [18] неподвижные и высокоскоростные фотографические методы были использованы для регистрации ударных характеристик капель воды на горячей алюминиевой поверхности. Скорость падения и температура поверхности были двумя важными параметрами, определяющими как ударное поведение, так и последующую теплопередачу. Число Капли Вебера 20, 60 и 220 идентифицировало три основных класса поведения при ударе, в то время как температуры поверхности в диапазоне от 280 до 100 °C использовались для определения режимов теплопередачи, соответствующих кипению пленки, кипению перехода, кипению зародыша и испарению пленки. Температуры, соответствующие критическому тепловому потоку и точке Лейденфроста, показали небольшую чувствительность как к скорости капли, так и к частоте удара. Фотографические результаты и измерения теплопередачи были использованы для построения карт режимов удара капли, которые определяют различные режимы кипения для каждого из трех чисел Вебера. Эти карты служат новой полезной основой для понимания поведения удара капли, а также будущего аналитического или численного моделирования теплообмена капли и распыления.

В работе [19] экспериментальное исследование представлено для удара капель метоксинанафторбутана ($C_4F_9OCH_3$, HFE-7100) на нагретую

поверхность из нержавеющей стали. Процесс удара был записан с использованием высокоскоростной цифровой камеры со скоростью 1000 кадров в секунду. Первоначальный диаметр каплей был зафиксирован на уровне $1,7 \pm 0,1$ мм, и все эксперименты проводились в атмосферном воздухе. Скорость удара была зафиксирована на уровне 2,0 м/с, таким образом определяя ударное число Вебера, равное 750. Температура поверхности из нержавеющей стали варьировалась от 20 до 300 °С, выше температуры Лейденфроста HFE-7100. Эксперименты также проводились с использованием н-гептана с целью исследовать, была ли динамика столкновений схожей, если ударное число Вебера соответствовало HFE-7100, а столкновение рассматривалось в тех же режимах кипения, что и HFE-7100. Хотя динамика столкновений была качественно схожей, эволюция диаметра жидкой пленки во времени была другой. Существующие модели, используемые для описания эволюции диаметра жидкой пленки со временем, оказались неадекватными для описания воздействия HFE-7100 и н-гептана.

В исследовании [20] была разработана трехмерная модель для моделирования динамики жидкости, теплообмена и изменения фазы, которые происходят, когда капля расплавленного металла падает на плоскую подложку. Модель является продолжением модели, разработанной Bussmann [21] и объединяет дискретизацию контрольного объема с фиксированной сеткой уравнений потока и энергии жидкости с алгоритмом отслеживания объема для отслеживания свободной от капель поверхности и усовершенствованным методом фиксированной скорости для отслеживания фронта затвердевания. Поверхностное натяжение моделируется как объемная сила, действующая на жидкость вблизи свободной поверхности. Углы контакта применяются в качестве граничного условия на линиях контакта жидкость-твердое тело. Уравнения энергии в жидкой и твердой частях капли решаются с помощью метода энтальпии. Теплообмен внутри подложки осуществляется только за счет теплопроводности. Сопротивление теплового контакта на границе раздела капля-подложка включено в модель. Изучено

осаждение капель олова на поверхности из нержавеющей стали, используя как эксперименты, так и численное моделирование. Представлены результаты двух различных сценариев: нормальное воздействие оловянной капли диаметром 2,7 мм со скоростью 1 м/с и наклонное воздействие оловянной капли размером 2,2 мм со скоростью 2,35 м/с на поверхность, наклоненную под углом 45° к горизонтали. Изображения, полученные из числовой модели, были сравнены с экспериментальными фотографиями и были найдены хорошо согласующимися.

В исследовании [22] феномен разбрасывания капель важен для нескольких применений в технологическом процессе. В настоящей работе численное моделирование динамики удара и распространения капли на горизонтальных и наклонных поверхностях проводилось с использованием метода объема жидкости (VOF). Для горизонтальных поверхностей рассматривалась динамика воздействия и распространения капель глицерина на поверхности из воска и стекла, для которых были доступны экспериментальные измерения. Динамический угол смачивания распространяющейся капли [23] и воздействие капель на наклонные поверхности [24]. Влияние характеристик поверхностного смачивания было исследовано с использованием моделей статического угла контакта (SCA) и динамического угла контакта (DCA). Была также рассмотрена динамика удара и распространения капли на наклонных поверхностях, а также различные режимы удара и распространения капли. Кроме того, численно исследовано влияние наклона поверхности, характеристик смачивания поверхности, свойств жидкости и скорости удара на динамику удара и разбрасывания капли, а результаты проверены экспериментально. Было обнаружено, что модель SCA может предсказать ударное воздействие и поведение при падении в количественном согласии с экспериментами для менее смачиваемых поверхностей. ($SCA > 90^\circ$), однако для более смачиваемых поверхностей ($SCA < 90^\circ$) DCA, наблюдаемые в начальные времена контакта, были на порядок

выше, чем значения SCA, и, следовательно, модель DCA необходима для точного прогнозирования поведения распространения.

В работе [25] проведено экспериментальное исследование изменения скорости растекания капли жидкости в условиях ее свободного падения на нагретой поверхности. Изучено влияние температуры поверхности гибкой медной подложки на изменение скорости растекания капли жидкости в условиях ее свободного падения. В ходе исследования было установлено, что кривая скорости распространения капель жидкости изменяется экспоненциально. Скорость разбрасывания после момента времени 0,002 с принимает постоянные значения $V = 0,3 \div 0,5$ м/с и не зависит от температуры поверхности. Также установлено, что скорость распространения капель жидкости не зависит от температуры поверхности при температурах до 108 °С. Продолжительный нагрев приводит к увеличению скорости распространения капель жидкости и достигает максимальных значений при температуре 140 °С. При нагревании поверхности выше 140 °С происходит уменьшение скорости растекания.

Глава 2. Экспериментальное исследование процессов взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов на основе однородных жидкостей, растворов и суспензий с охлаждаемой поверхностью

Исследования проводились при температурных условиях, соответствующих или близких к реальным условиям перегрева корпусов (ограждающих конструкций) теплонагруженного оборудования ТЭС и АЭС. Исследование особенностей испарения и кипения неоднородных капель жидкости с детальной визуализацией процессов на внутренних и внешних границах раздела сред, а также эффективности применения различных хладагентов на основе воды для быстрого охлаждения металлических поверхностей выполнено с применением высокоскоростной видеосъемки. Программный комплекс «Phantom Camera Control», обеспечивающий работу высокоскоростной камеры, использовался для оценки временных характеристик процессов и определения линейных размеров капель и массивов жидкостей. Также рассмотрены гидродинамические режимы взаимодействия одиночной капли с поверхностями подложек, сделанных из разных материалов с использованием высокоскоростной съемки. Анализ видеозаписи проводился с использованием программного обеспечения «Phantom Camera Control». Определение и оценка количественных характеристик и гидродинамических режимов необходимы для связи исследований по падению одиночных капель и многочисленной группы капель (спрея) на нагретую поверхность.

2.1. Экспериментальный стенд и методика исследований эффективности применения различных хладагентов на основе воды для быстрого охлаждения металлических поверхностей

Появление режима пленочного кипения на нагретых поверхностях следует отнести к крайне нежелательным условиям при использовании воды для охлаждения металлических поверхностей (и других поверхностей с низкой шероховатостью) в условиях, соответствующих фазовому переходу. Паровой слой, который образуется при этом, значительно уменьшает коэффициент теплообмена между разогретой металлической поверхностью и рабочей жидкостью, используемой для понижения температуры.

Основными элементами установки являются высокоскоростная видеокамера, устройство нагрева охлаждаемых металлических шаров, термопары и механизм подачи хладагента на разогретую поверхность. В данной работе для регистрации процессов охлаждения металлического шара использовалась высокоскоростная монохромная камера *Phantom Miro M310* с частотой съемки 5000 кадров в секунду и разрешением 764×764. Задержка на программное обеспечение (определение времен процессов) – 0,01 с. Для детализации наблюдаемых явлений применен объектив *Macro Lens Nikon AF MICRO-NIKKOR 200MM F/4D IF-ED* с фокусным расстоянием 200 мм. Высокоскоростная видеорегистрация выполнялась с применением системы *LED* освещения. Расстояние от линзы до ближайшей точки шара составляло около 0,22 м. С помощью программного обеспечения *Phantom Camera Control*, при анализе записанного видеоматериала, определялся масштабный коэффициент (в мм/пкс), заданием известного размера объекта (толщина термопары 1,5 мм) в области наблюдения. Материал шаров: сталь марок AISI 420L (русская маркировка 20Х13) и 1044 (русская маркировка Сталь 45). На рисунке 2 представлена схема экспериментального стенда.

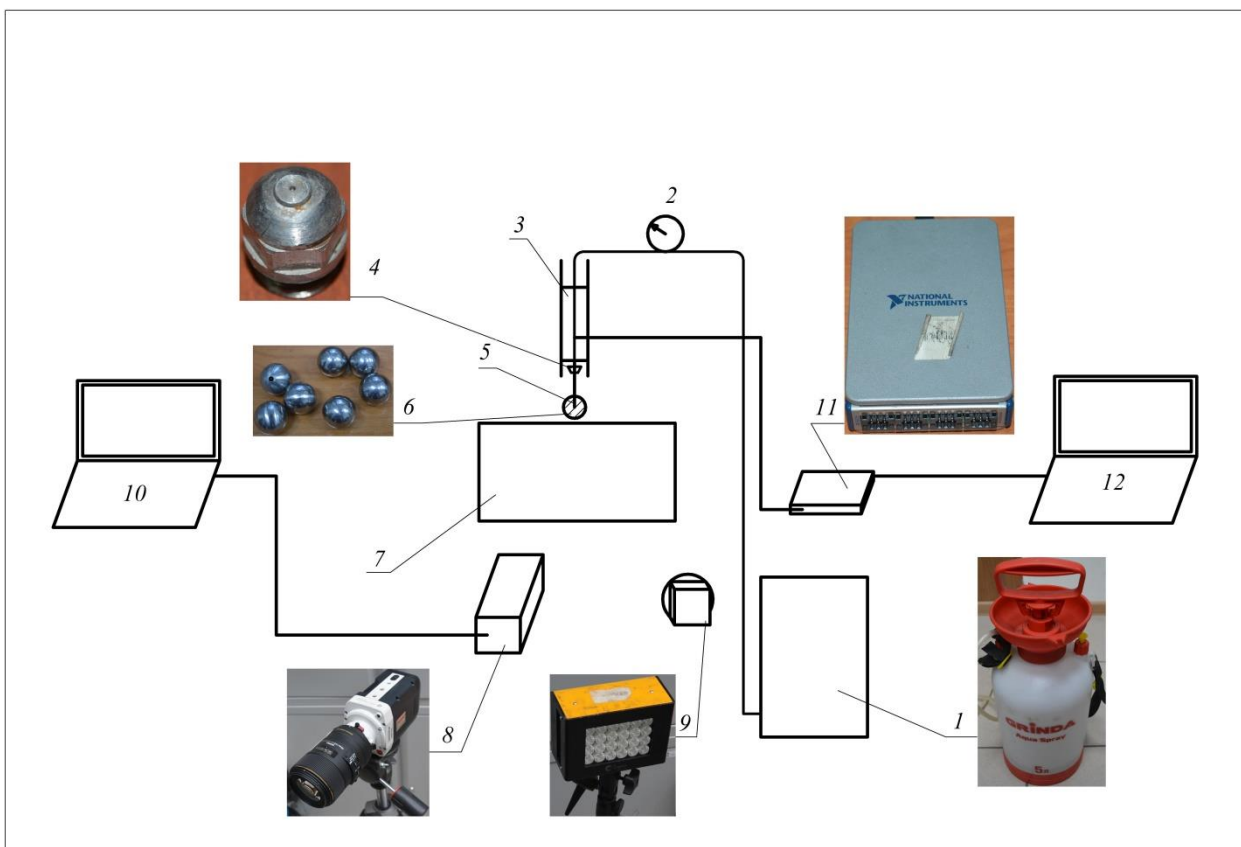


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда: 1– ёмкость с хладагентом с возможностью регулировки давления; 2 – манометр; 3 – держатель термопары; 4 –распылительная форсунка ФМТ-20; 5 – термопара; 6 – металлический шар; 7 – ёмкость для сбора воды; 8 –высокоскоростная камера; 9 – *LED* освещение; 10 – компьютер для управления камерой; 11 – модуль регистрации показаний температур; 12 – компьютер

Использованные в ходе экспериментов хладагенты и их характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Использованные хладагенты

Хладагент	Характеристики
Деионизированная вода	Отсутствуют примеси
Водопроводная вода	Повышенная концентрация катионов кальция и магния
Морская вода	Содержание солей натрия и магния составляет около 18 г/л; источник – Черноморская береговая линия в районе г. Геленджик, Россия
Суспензия графита	Массовая концентрация графита 0,05 % и 1 % в двух растворах. Размер частиц менее 100 мкм
Деаэрированная вода	Отсутствуют растворённые газы
Суспензия глины	Массовая концентрация глины 0,1 %. Размер частиц менее 50 мкм
Солевой раствор NaCl	Содержание соли NaCl 27 г/л

2.1.1. Процедура проведения экспериментального исследования с использованием спрейного охлаждения

На подготовительном этапе была осуществлена проверка целостности оборудования (рисунок 2), настраивались камера и освещение. Кроме этого, проверялось качество изображения, настраивался диаметр форсунки для равномерного распределения хладагента над поверхностью.

Эксперименты выполнялись согласно следующей последовательности действий. Шар 6, изготовленный из стали марки AISI 420L и 1044, диаметр

которого был заранее измерен и составлял 20 мм, нагревался с помощью бутановой горелки до температуры 1000 К на расстоянии 0,1–0,15 м от сопла горелки. Для избежание неоднородного прогрева металлической поверхности, прогрев осуществлялся с разных сторон. В качестве фиксирующего элемента для используемых объектов исследования использовался хромель-алюмелевый термоэлектрический преобразователь (тип К, диапазон измеряемых температур 233÷1273 К, предел допускаемых отклонений (ГОСТ 6616) в диапазоне температур от 607 до 1273 К – $\pm 0,0075 |T - 273|$, показатель тепловой инерции не более 1 с при диаметре защитной оболочки термоэлектрического преобразователя 1,5 мм), который крепился в заранее просверленном отверстии диаметром 1,5 мм и глубиной 10 мм. При установке термоэлектрического преобразователя 5 область присоединения термопары и шара заполнялся термостойким клеем «PENOSIL Premium +1500» для полной фиксации и исключения попадания хладагента в процессе охлаждения на чувствительный элемент термопары. С помощью термопары 5 были проведены измерения температуры в центре металлического шара 6. Когда температура, измеренная с использованием термоэлектрического преобразователя 5, доходила до нужного значения, а давление в баллоне с хладагентом 1 составляло два бара (контролировалось манометром 2), с помощью открытия клапана хладагент под давлением поступал в форсунку, а из форсунки непосредственно на раскаленную поверхность. Для достоверности результатов эксперимента при охлаждении объекта исследований суспензиями на основе глины и графита, баллон встряхивался для распределения включений по всему объёму. Поступление жидкости на поверхность происходило не мгновенно, время поступления рабочей жидкости на объекте исследования составляло приблизительно одну секунду, что компенсировалось показателем тепловой инерции хромель-алюмелевой термопары. Процесс охлаждения шара 6 регистрировался с помощью магистрально-модульной платформы для системах измерений National Instruments и высокоскоростной видеокамеры 8, максимальная скорость

записи которой составляет 5000 кадров/с. Анализ полученной видеозаписи проводился с использованием специализированного программного обеспечения «Phantom Camera Control», которое позволяло определять особенности режима протекания процесса, длительность, локализацию зон стока тепла и др. Процесс охлаждения металлической поверхности шара считалось завершенным, когда температура хладагента и объекта исследования в резервуаре 7 достигала комнатной температуры и устанавливалось тепловое равновесие $293 \div 295$ К. Температура хладагента внутри резервуара 7 контролировалась хромель-копелевыми термопарами (тип L, диапазон измеряемых температур $223 \div 873$ К, класс точности 2, систематическая погрешность измерения температуры 2,5 К). Температура рабочей жидкости перед началом эксперимента составляла около 293 К. Для изучения динамики охлаждения нагретого до 1000 К стального шара в каждом хладагенте проводилось не менее 5 опытов с последующим усреднением результатов эксперимента. Максимальное среднеквадратичное отклонение серии измерений температуры внутри стального шара при неизменных параметрах системы не превышало 4 К. Систематические погрешности измерения температур стального шара и хладагента в емкости обусловлены указанными выше пределами допускаемых отклонений термоэлектрических преобразователей.

2.2. Описание экспериментального стенда для изучения взаимодействий одиночных капель с поверхностью

Для проведения экспериментов применялся стенд, аналогичный использованному в работе [26]. Использовалась CMOS высокоскоростная камера монохромная камера *Phantom Miro M310* для записи соударения капли с подложкой. Были применены следующие настройки камеры: разрешение съемки 768×480 , частота дискретизации 8600 к/с. Для детализации наблюдаемых явлений применен объектив *Sigma AF 105/2.8 EX DG macro* с фокусным расстоянием 100 мм. Основные элементы стенда: система нагрева с регулируемой температурой, металлическая подложка (представляла твердую пластину), установка для генерирования капель, системы *LED* освещения, ПК.

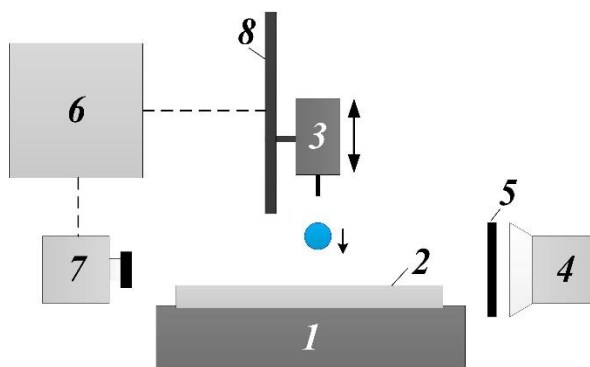


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки: нагревательная плитка (1), подложка (2), генератор капель (3), светодиодный прожектор (4), диффузор (5), ПК (6), видеокамера (7), модуль линейного перемещения (8)

В экспериментах использовались подложки, выполненные из двух марок стали. Первая подложка, изображённая на рисунке 4, сделана из нержавеющей стали. Её физико-химические свойства и шероховатость представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.



Рисунок 4 – Подложка из нержавеющей стали

Таблица 2 – Физико-химические свойства подложки из нержавеющей стали

Плотность, кг/м ³	$8 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	16,2
Удельная теплота при 100 °С, Дж/(кг · К)	500
Тепловое расширение при 0-100 °С	17,2
Электросопротивление, Н/м ²	720
Теплоёмкость, Дж/(кг · К)	$0,473 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3 – Шероховатость подложки из нержавеющей стали

	R _a , мкм	R _q , мкм	R _p , мкм	R _v , мкм	R _t , мкм	R _{sk} , мкм	R _{ku} , мкм	R _z , мкм	RTp, %	RHTp, мкм
Нерж. сталь	1,5	1,87	4,57	5,08	11	0,324	3	9,65	0,3	3,05 (20-80%)

Измерение шероховатости поверхности выполнено с использованием бесконтактного профилометра Micro Measure 3D station (STIL, Франция).

Вторая подложка выполнена из стали AISI 430. Данный вид сплава является самым востребованным из коррозионностойких ферритных сталей, предназначенных в основном для изготовления оборудования на предприятиях. Сталь марки AISI 430 классифицируется как жаростойкая при эксплуатации до температуры 850 °С. В экспериментах подложка из данного материала была зеркально полированная и имела меньшую шероховатость,

чем подложка из нержавеющей стали. В дальнейшем будем обозначать нержавеющую сталь как неполированную поверхность, а сталь AISI 430 как полированная поверхность. Механические свойства AISI 430 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Механические свойства стали AISI 430

Предел прочности (временное сопротивление разрыву), мин., МПа	450
Предел текучести, 0,2 %, МПа	205
Твёрдость по Роквеллу, HRB макс.	88
Твёрдость по Бриннелю, HB тип.	160
Магнитные свойства	Ферромагнетик
Относительное удлинение, мин., %	22

В качестве нагревателя применена нагревательная плитка мощностью 1,8 кВт со стеклокерамической поверхностью. Параметры нагревателя: диапазон рабочих температур 40–500 °С, точность установки температуры ± 1 °С, неравномерность распределения температуры 5 °С. Поскольку толщина подложки составляла около 5 мм, а материал, из которого она изготовлена, является высокотеплопроводным, в качестве температуры поверхности подложки перед взаимодействием T_0 указывалось значение, установленное на регуляторе температуры нагревателя. По предварительным оценкам неточность показаний температуры T_0 не превышала 10 °С. Температура поверхности подложки перед взаимодействием с каплей T_0 может варьироваться от 40 °С до 500 °С.

Для генерации капель использовалась система, включающая микронасос, шприц с полый иглой диаметром 0,6 мм. Высота расположения системы генерирования капель над подложкой регулировалась модулем линейного перемещения, управляемым с помощью ПК. Предложенный метод позволял получать следующие параметры капель перед взаимодействием с

разогретой подложкой: $D_0 = 2$ мм и $U_0 = 2$ м/с. Неточность определения D_0 и U_0 не превышала 8–10%.

Данные эксперименты проведены с использованием эмульсий на основе воды (таблица 5).

Таблица 5 – Используемые хладагенты

Хладагент	Характеристики
Морская вода	Содержание солей натрия и магния составляет около 18 г/л; источник – Черноморская береговая линия в районе г. Геленджик, Россия
Суспензия глины	Массовая концентрация глины 0,1 %. Размер частиц менее 50 мкм
Дистиллированная вода	Отсутствие растворённых минеральных солей, органических веществ и других примесей

Для расчета безразмерных критериев (Re , We) использовались значения свойств (плотность, вязкость и поверхностное натяжение) хладагентов, которые приведены в таблице 5.

Для нахождения вязкости суспензии использована формула Эйнштейна:

$$\eta = \eta_0(1 + 2,5\varepsilon),$$

где η – вязкость суспензии;

η_0 – вязкость жидкой фазы суспензии;

ε – объёмная доля твёрдых частиц.

Плотность суспензии находилась по закону аддитивности. Для этого были найдены плотность воды при комнатной температуре и плотность компонента.

$$\rho = \sum \rho_i \cdot g_i, \text{ кг/м}^3,$$

где ρ_i – плотность i -го компонента;

g_i – массовая доля i -го компонента;

ρ – плотность суспензии.

Поверхностное натяжение всех хладагентов, за исключением морской воды, принято равным поверхностному натяжению водопроводной воды в связи со следующими причинами:

1) твёрдые частицы суспензии имеют довольно большие размеры, поэтому вносят пренебрежимо малое изменение в поверхностное натяжение основы суспензии, т.е. воды;

2) морская вода относится к морским и солоноватым солевым растворам, поэтому её поверхностное натяжение равно $1,05 \cdot \sigma(\text{вода})$.

Начальная температура капель перед проведением экспериментов составляла 20–25 °С (контролировалась термопарой).

2.2.1. Процедура проведения экспериментального исследования с одиночным падением капли на нагретую поверхность

На подготовительном этапе настраивались камера 7 и освещение 3. Для достижения монотонного фона для предотвращения попадания посторонних объектов при съёмке, перед прожектором ставился диффузор. Проверялось качество изображения, с помощью настройки фокуса объектива. Проверялась высота и скорость падения, точность попадания капли хладагента на подложку. Для этого делались пробные опыты без подогрева подложки с дальнейшей ее фиксацией.

Для удобства замера диаметров капель камера 7 устанавливалась на одном уровне с подложкой 2. Камера выравнивалась с использованием уровня, чтобы избежать искривления изображения, которое может повлиять на конечные результаты. Установка насоса проводилась с условием, что капля будет падать строго вертикально вниз. Объём падающей капли был постоянен и контролировался с помощью программного обеспечения непосредственно в самом насосе. Перед началом каждого эксперимента

шприц и игла промывались дистиллированной водой, чтобы избежать смешения используемых хладагентов.

Производилась съёмка объекта, размер которого известен, например, шкалы линейки. Он помещался в область падения капли на подложку. С помощью программного обеспечения *Phantom Camera Control* находился масштабный коэффициент (в мм/пкс), с помощью которого производились дальнейшие замеры отделившихся от первоначальной капли фрагментов. Также, задавшись найденным масштабным коэффициентом проверялось условия обязательные в экспериментальных исследованиях, а именно: скорость и высота падения капли. Изменение высоты падения капли менялось с использованием координатного устройства и программного обеспечения *Motomaster*. В данной программе выбирались такие параметры как: скорость перемещения модуля и шаг, с которым устройство поднималось или опускалось. При достижении оптимальной высоты заданный уровень фиксировался.

Поверхность нагреваемой подложки перед каждым экспериментом проверялась на наличие окалин, царапин, а также накипаемого слоя суспензий и растворов. Ранее перечисленные позиции могут серьезно повлиять на ход экспериментов и на дальнейшие результаты при обработке информации, поэтому в случае их обнаружения производилась чистка и полировка подложки с использованием алмазной пасты разной дисперсности или её замена.

При достижении необходимой для полного температурного баланса между подложкой и греющим элементом температуры отводилось некоторое количество времени, а именно не менее 2-3 минут. Опыты начинались проводиться с высоких температур для того, чтобы избежать недогрева металлической пластины.

Процедура эксперимента заключалась в следующем. Заранее включался светодиодный прожектор 4 и камера 7. При достижении необходимых условий, насос 3 вырабатывал заданный объём хладагента в виде капли. С

началом падения капли включалась запись камеры. Все действия по запуску оборудования производились «вручную». Для обеспечения синхронизации падения капли и работы камеры, в программном обеспечении *Phantom Camera Control* выставлялась задержка съёмки.

После сказанного выше измерялись диаметр и скорость капли D_0 и U_0 перед взаимодействием с подложкой. По видео визуально определялся гидродинамический режим взаимодействия капли хладагента и подложки. Данные заносились в таблицу. Затем температура менялась и цикл повторялся.

2.3. Оценка погрешностей

Расчет погрешностей производился по методике [Практикум по технической термодинамике и тепломассообмену [Электронный ресурс] : учебное пособие / Б. В. Борисов, А. В. Крайнов, В. Е. Юхнов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 1 компьютерный файл (pdf; 2.2 MB). — Томск: Изд-во ТПУ, 2010.].

2.3.1. Оценка погрешностей при проведении опытов по спрейнному охлаждению

1. Составляем таблицу измерений. В данных экспериментах измеряется динамика охлаждения металлических поверхностей. Для достоверной оценки погрешности измерений при расчете будут использоваться три температуры с каждой серии экспериментов с использованием различных хладагентов. Пример расчета будет проведен для водно-солевого раствора NaCl при температуре, взятой из экспериментальных данных, после трех секунд охлаждения.

Таблица 6 – Измерения температуры на 3 секунде для стали 45

Порядковый номер измерений	1	2	3	4	5
Результат измерений, К	996,4	996,8	998,2	998,5	993,7

2. Найдем среднее арифметическое значение величин:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{(996,4 + 996,8 + 998,2 + 998,5 + 993,7)}{5} = 996,7 \text{ К.}$$

3. Найдем среднюю квадратичную погрешность отдельного результата при n измерениях (погрешность метода измерений)

$$S^n = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = 1,8$$

4. Отбраковываем результаты (исключаем промахи)

4.1. Находим относительное уклонение «подозрительного» (x_k) измерения, выраженного в долях S^n :

$$\vartheta_k = \left| \frac{\bar{x} - x_k}{S^n} \right| = \left| \frac{996,7 - 993,7}{1,8} \right| = 1,6$$

4.2. Найдем значения ϑ_{min} и ϑ_{max} по известному количеству измерений в таблице 7.

Таблица 7 – Зависимость значения максимального и минимального отклонения от количества опытов.

β	n	3	4	5	6	7	8
0,1	ϑ_{min}	1,41	1,65	1,79	1,89	1,97	2,04
0,01	ϑ_{max}	1,41	1,72	1,96	2,13	2,27	2,37

4.3. Сравниваем ϑ_k с ϑ_{min} и ϑ_{max} для отбраковки. Так как пятый эксперимент имеет наибольшее отклонение от остальных величин, то проверку ведём именно для него. Отклонение пятого результата экспериментов не превышает минимального табличного значения, поэтому данный результат не будет отброшен. Расчет остальных не превышает минимального значения отклонения, поэтому все результаты усредняются для получения одной зависимости.

5. Найдем погрешность результата серии измерений.

$$S_{\bar{x}}^n = \frac{S^n}{\sqrt{n}} = \frac{1,8}{\sqrt{5}} = 0,8.$$

6. Находим доверительный интервал Δx для $\bar{x}$

6.1. Задаем значение коэффициента Стьюдента α (примем $\alpha = 0,95$).

6.2. Найдем табличное значение коэффициента Стьюдента $t(\alpha, n)$

Таблица 8 – Табличные значения коэффициента Стьюдента.

n	2	3	4	5	6	7	8
$t(\alpha, n)$	12,71	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36

6.3. Определяем :

$$\Delta x = S_{\bar{x}}^n \cdot t(\alpha, n) = 0,8 \cdot 2,78 = 2,2$$

7. Если Δx сравнима с $\Delta x_{\text{пр}}$ (для термопары типа К равная $\pm 2,5$ °C), то в качестве доверительного интервала следует взять величину:

$$\Delta x_{\Sigma} = \sqrt{t(\alpha, n)^2 \cdot S_{\bar{x}}^2 + \left(\frac{t(\alpha, n)}{3}\right)^2 \cdot \Delta x_{\text{пр}}^2} = 4,1,$$

Где

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{S^n}{5} = \frac{1,8}{5} = 0,4$$

8. Найдем относительную погрешность результата серии эксперимента:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} = \frac{2,2}{996,7} = 0,2\%$$

Таким методом был проведен анализ для представленных в таблице 1 хладагентов. Погрешность измерений не превысила 7-10%.

Глава 3. Анализ результатов экспериментальных исследований

3.1. Эффективность спрейного охлаждения

В ходе экспериментов были получены функциональные зависимости температуры от времени и видеоматериалы по охлаждению. На рисунке 5 представлены кривые спрейного охлаждения шара из стали 20Х13 в зависимости от времени охлаждения и вида используемого хладагента; температура шара перед процессом охлаждения около 1000 К.

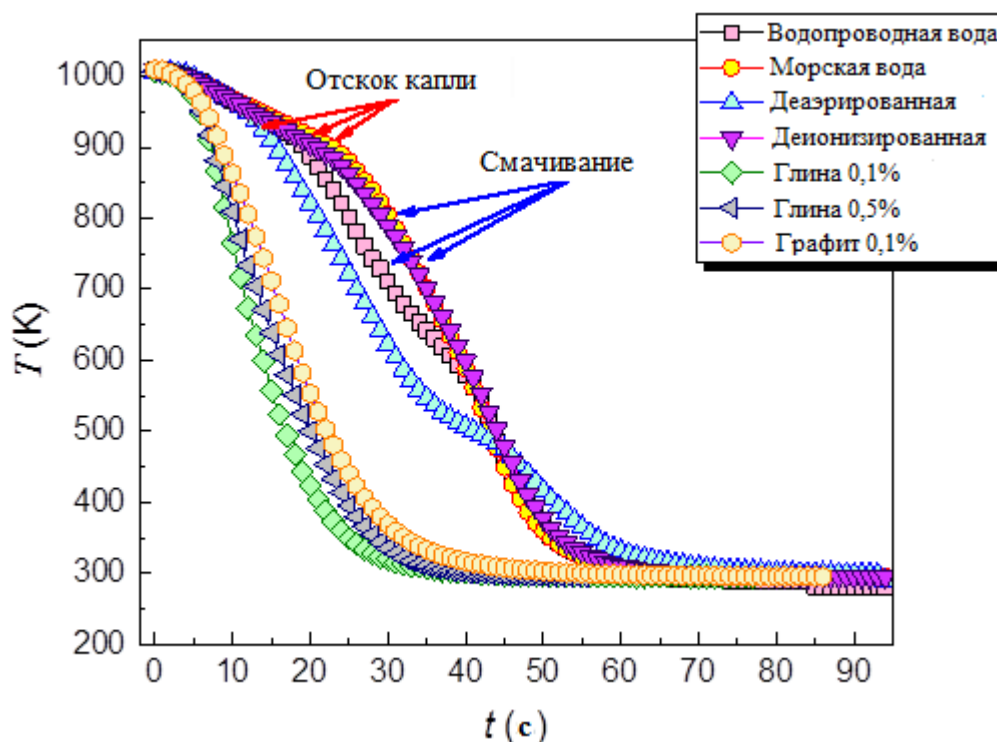


Рисунок 5 – Кривые спрейного охлаждения шара из стали 20Х13 в зависимости от времени охлаждения и вида используемого хладагента; температура шара перед процессом охлаждения около 1000 К.

По рисунку 5 можно сделать вывод, что при охлаждении стали 20Х13 наиболее эффективными хладагентами оказались суспензии глины и графита. При их использовании не наблюдалось плёночного кипения, что отчётливо видно на графике. У суспензий нет характерной пологой области, в которой происходит плёночное кипение. Для оставшихся хладагентов на рисунке эти участки подписаны как «Отскок» и «Смачивание». При «Отскоке» наблюдается плёночное кипение, непосредственного контакта хладагента с

шариком нет. Это замедляет скорость охлаждения и увеличивает его время. При «Смачивании» наблюдается равномерное растекание хладагента по поверхности шара, скорость охлаждения увеличивается. Иллюстрация процессов приведены на рисунках 6-9.

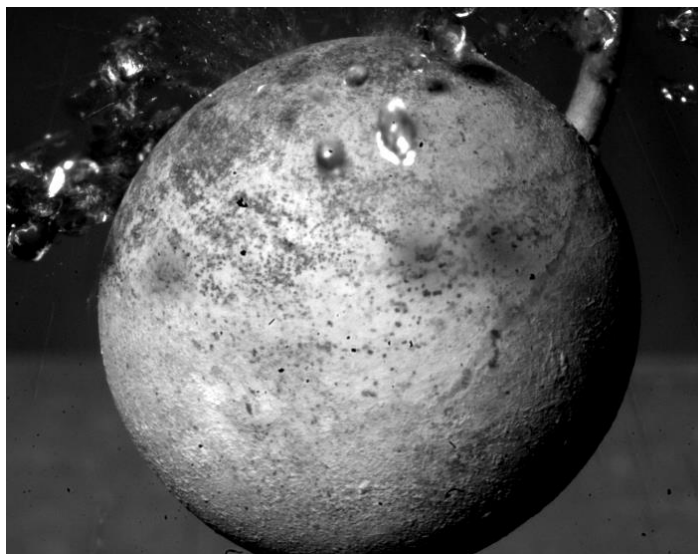


Рисунок 6 – Иллюстрация пленочного кипения (отскока) на поверхности шара из стали 20Х13 при использовании водно-солевого раствора NaCl.

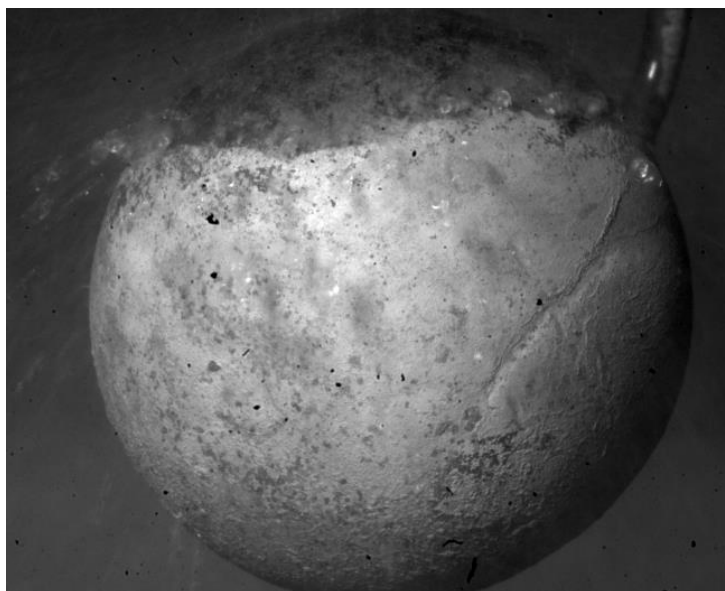


Рисунок 7 – Иллюстрация перехода от пленочного кипения к пузырьковому (неравномерное смачивание поверхности) на поверхности шара из стали 20Х13 при использовании водно-солевого раствора NaCl.



Рисунок 8 – Иллюстрация стабильного пузырькового кипения (равномерное смачивание) на поверхности шара из стали 20Х13 при использовании водно-солевого раствора NaCl.

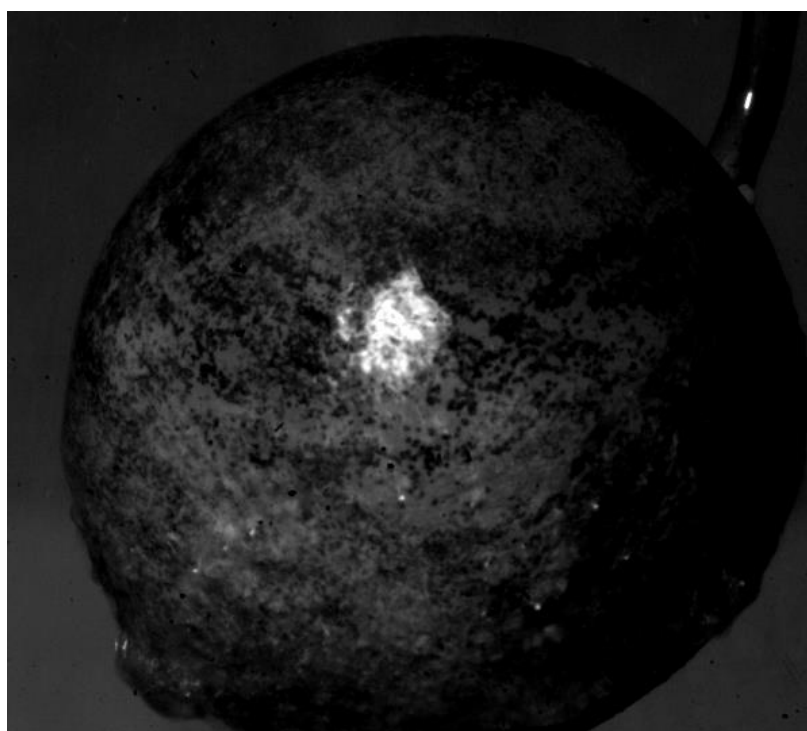


Рисунок 9 – Иллюстрация полностью охлажденного шара из стали 20Х13 при использовании водно-солевого раствора NaCl.

На рисунке 10 представлены кривые спрейнго охлаждения шара из стали 45 в зависимости от времени охлаждения и вида используемого хладагента, температура шара перед процессом охлаждения около 1000 К.

По рисунку 10 можно сказать, что результаты эксперимента по спрейнгому охлаждению стали 45, также показывают наибольшую эффективность суспензий графита и глины. У морской воды и солевого раствора NaCl хорошо видны области плёночного кипения, сильно тормозящие процесс охлаждения.

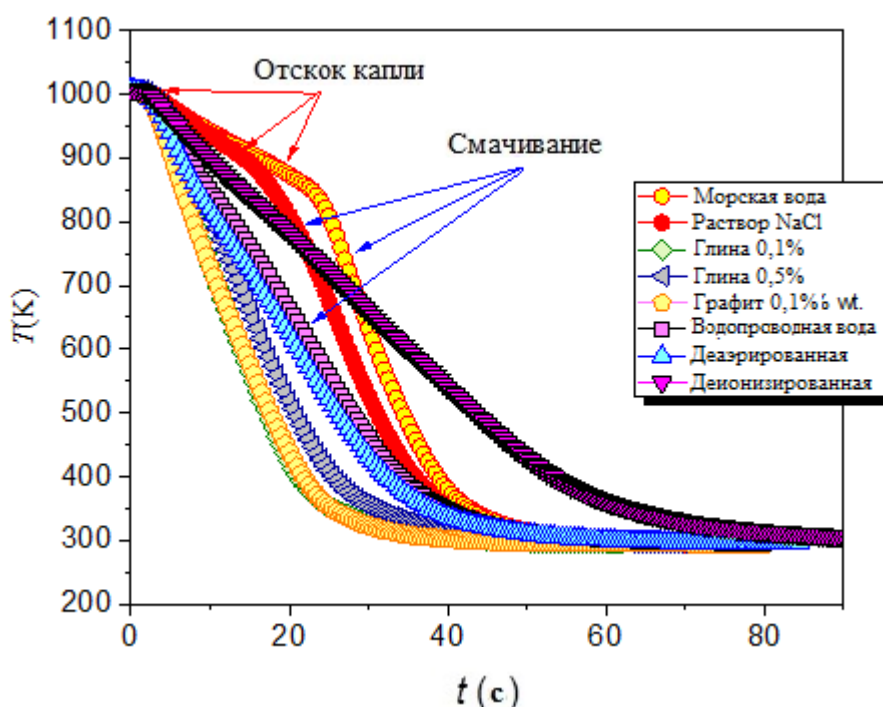


Рисунок 10 – Кривые спрейнго охлаждения шара из стали 45 в зависимости от времени охлаждения и вида используемого хладагента; температура шара перед процессом охлаждения около 1000 К.

На рисунке 11 показана эффективность спрейнго охлаждения стали 20X13, то есть зависимость изменения температуры от времени процесса. Этот показатель можно упрощённо назвать «скоростью» охлаждения шарика.

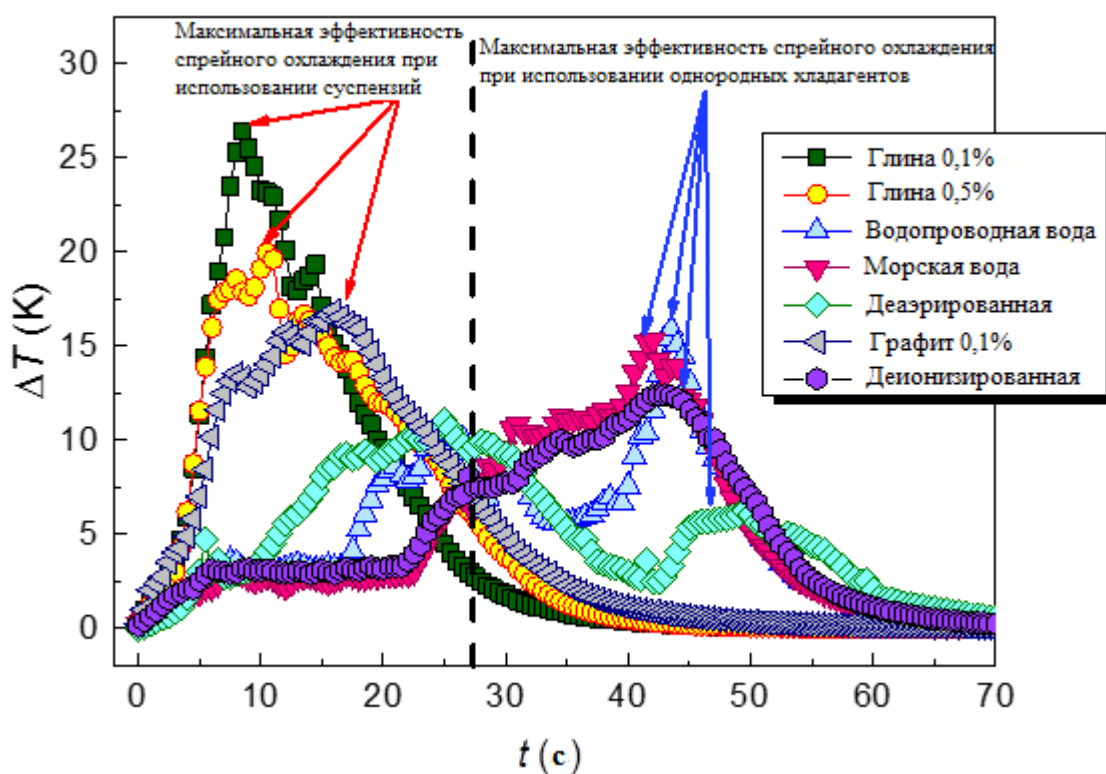


Рисунок 11 – Эффективность спрейнгого охлаждения шара из стали 20X13 однородными и неоднородными хладагентами

По графикам рисунка 11 видно, что суспензии имеют высокую скорость в начале охлаждения, так как у них отсутствует плёночное кипение. Остальные хладагенты в начале охлаждения не могут эффективно охлаждать образец из-за образования на нагретой поверхности паровой плёнки. Пунктирной линией показано время, при котором скорости суспензий и однородных хладагентов совпадают.

На рисунке 12 аналогичный график эффективности спрейнгого охлаждения стали 45.

В начале охлаждения также наблюдается большее изменение температуры при использовании суспензий.

Отсутствие паровой плёнки при использовании суспензий можно объяснить большим количеством мелких частиц в них, служащих центрами парообразования.

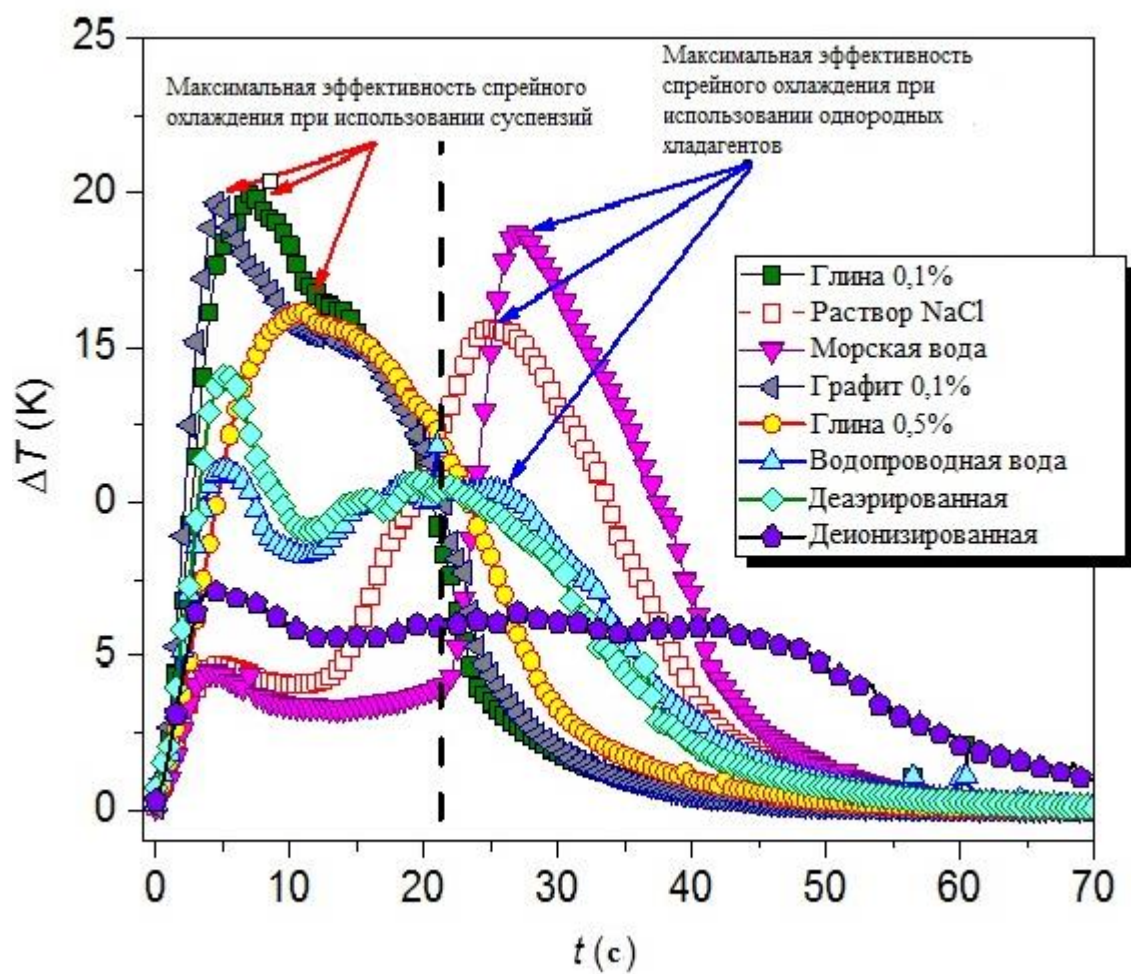


Рисунок 12 – Эффективность спрейного охлаждения шара из стали 45 однородными и неоднородными хладагентами

3.2. Определение критериев подобия

Одной из задач работы является нахождение чисел Рейнольдса и Вебера. Число Рейнольдса (Re) характеризует отношение сил инерции к силам вязкости. Оно определяет режим течения жидкости.

$$Re = \frac{\omega d}{\nu},$$

где ω – характерная скорость м/с;

d – определяющий размер или гидравлический диаметр (в нашем случае – диаметр капли), м;

ν – кинематическая вязкость среды, м²/с.

Число Вебера (We) определяет отношение сил инерции жидкости к силам поверхностного натяжения.

$$We = \frac{\rho d \omega^2}{\sigma},$$

где ρ – плотность, кг/м³;

d – определяющий размер (в нашем случае – диаметр капли), м;

ω – характерная скорость, м/с;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Скорость определялась по записанным видео с помощью программного обеспечения *Phantom Camera Control*. Для определения масштабного коэффициента за опорный размер принят известный диаметр шарика (20 мм). Всего произведено 10 замеров скорости с различных кадров для каждого хладагента, затем данные усреднялись.

Таблица 9 – Значения скоростей капель рассматриваемых хладагентов

Хладагент	ω , м/с
Водопроводная вода	8,29
Деионизированная вода	7,88
Деаэрированная вода	7,88
Морская вода	8,23
Солевой раствор NaCl	7,83
Глина 0,1 %	8,67
Глина 0,5 %	8,69
Графит 0,1 %	8,68

Скорости капель деионизированной и деаэрированной воды приняты равными, так как их физические свойства довольно схожи.

Диаметр капли как характерный размер для критериев подобия определялся также по видео охлаждения с помощью программного обеспечения *Phantom Camera Control*.

Таблица 10 – Диаметры капель рассматриваемых хладагентов

Хладагент	d , м
Водопроводная вода	$2,47 \cdot 10^{-4}$
Деионизированная вода	$2,04 \cdot 10^{-4}$
Деаэрированная вода	$2,04 \cdot 10^{-4}$
Морская вода	$2,14 \cdot 10^{-4}$
Солевой раствор NaCl	$1,53 \cdot 10^{-4}$
Глина 0,1 %	$2,54 \cdot 10^{-4}$
Глина 0,5 %	$2,06 \cdot 10^{-4}$
Графит 0,1%	$2,54 \cdot 10^{-4}$

Для нахождения вязкости суспензий использована формула Эйнштейна:

$$\eta = \eta_0(1 + 2,5\varepsilon),$$

где η – вязкость суспензии;

η_0 – вязкость жидкой фазы суспензии;

ε – объёмная доля твёрдых частиц.

Для использования формулы Эйнштейна найдена молярная масса суспензии:

1. Для суспензии глины массовой концентрацией 0,1%:

Глина состоит преимущественно из: 47% SiO_2 , 39 % Al_2O_3 и 14 % H_2O .

Тогда молярная масса глины равна 70,5 г/моль.

$$\begin{aligned} \mu(\text{суспензии}) &= \frac{1}{\frac{g(\text{глина})}{\mu(\text{глина})} + \frac{g(\text{вода})}{\mu(\text{вода})}} = \\ &= \frac{1}{\frac{0,001}{70,5 \text{ г/моль}} + \frac{0,999}{18 \text{ г/моль}}} = 18,01 \frac{\text{г}}{\text{моль}}. \end{aligned}$$

Найдена объёмная доля твёрдых частиц в суспензии глины 0,1 %:

$$\varepsilon = g(\text{глина}) \cdot \frac{\mu(\text{суспензии глины } 0,1 \%) }{\mu(\text{глина})} = 2,55 \cdot 10^{-4},$$

где $\eta_0 = 1,004 \cdot 10^{-6}$ – кинематическая вязкость воды при 20 °С.

По формуле Эйнштейна получена кинематическая вязкость суспензии:

$$\eta = 1,004 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 2,5 \cdot 2,55 \cdot 10^{-4}) = 1,0046 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. Для суспензии глины массовой концентрацией 0,5%:

Глина состоит преимущественно из 47% SiO_2 , 39 % Al_2O_3 и 14 % H_2O . Тогда молярная масса глины равна 70,5 г/моль.

$$\mu(\text{суспензии глины } 0,5 \%) = \frac{1}{\frac{0,005}{70,5} + \frac{0,995}{18}} = 18,07 \text{ г/моль}$$

Найдена объёмная доля твёрдых частиц в суспензии глины 0,5 %:

$$\varepsilon = g(\text{глина}) \cdot \frac{\mu(\text{суспензии глины } 0,5 \%) }{\mu(\text{глина})} = 0,0013,$$

где $\eta_0 = 1,004 \cdot 10^{-6}$ – кинематическая вязкость воды при 20 °С.

По формуле Эйнштейна получена кинематическая вязкость суспензии:

$$\eta = 1,004 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 2,5 \cdot 0,0013) = 1,073 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Для суспензии графита массовой концентрацией 0,1%:

Малярная масса графита равна 12 г/моль.

$$\mu(\text{суспензии графита } 0,1 \%) = \frac{1}{\frac{0,001}{12 \text{ г/моль}} + \frac{0,999}{18 \text{ г/моль}}} = 17,99 \text{ г/моль}$$

Найдена объёмная доля твёрдых частиц в суспензии глины 0,1 %:

$$\varepsilon = g(\text{графита}) \cdot \frac{\mu(\text{суспензии графита } 0,1 \%) }{\mu(\text{графит})} = 0,0015 ,$$

где $\eta_0 = 1,004 \cdot 10^{-6}$ – кинематическая вязкость воды при 20 °С.

По формуле Эйнштейна получена кинематическая вязкость суспензии:

$$\eta = 1,004 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 2,5 \cdot 0,0015) = 1,008 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

4. Для солевого раствора NaCl с содержанием соли 27 г/л:

$$g(\text{NaCl}) = \frac{27 \text{ г}}{1000 \text{ г} + 27 \text{ г}} = 0,026$$

$$\mu(\text{солевого раствора NaCl}) = \frac{1}{\frac{0,026}{58,5 \text{ г/моль}} + \frac{0,974}{18 \text{ г/моль}}} = 18,33 \text{ г/моль}$$

Найдена объёмная доля твёрдых частиц в солевого раствора NaCl:

$$\varepsilon = g(\text{NaCl}) \cdot \frac{\mu(\text{солевого раствора NaCl})}{\mu(\text{NaCl})} = 0,0081,$$

где $\eta_0 = 1,004 \cdot 10^{-6}$ – кинематическая вязкость воды при 20 °С.

По формуле Эйнштейна получена кинематическая вязкость суспензии:

$$\eta = 1,004 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 2,5 \cdot 0,0081) = 1,024 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Для остальных хладагентов использовалась вязкость воды, так как их физические свойства схожи.

Плотность суспензий находилась по закону аддитивности. Для этого были найдены плотность воды при комнатной температуре и плотность компонента.

$$\rho = \sum \rho_i \cdot g_i, \text{ кг/м}^3,$$

где ρ_i – плотность i -го компонента;

g_i – массовая доля i -го компонента;

Таблица 11 – Плотности рассматриваемых хладагентов

Хладагент	$\rho, \text{ кг/м}^3$
Водопроводная вода	998,2
Деионизированная вода	998,2
Деаэрированная вода	998,2
Морская вода	1011
Солевой раствор NaCl	1028,4
Глина 0,1 %	999
Глина 0,5 %	1002,2
Графит 0,1%	999,4

Поверхностное натяжение всех хладагентов, кроме морской воды и солевого раствора NaCl 27 г/л, принято равным поверхностному натяжению водопроводной воды, так как:

1. физические свойства водопроводная воды, деионизированной воды и деаэрированной воды довольно близки;
2. твёрдые частицы суспензий имеют довольно большие размеры, поэтому вносят пренебрежимо малое изменение в поверхностное натяжение основы суспензии, т.е. воды;
3. морская вода и солевой раствор NaCl относятся к морским и солоноватым солевым растворам, поэтому их поверхностное натяжение равно $1,05 \cdot \sigma(\text{вода})$.

Таблица 12 – Поверхностное натяжение рассматриваемых хладагентов

Хладагент	σ , Н/м
Водопроводная вода	$726,9 \cdot 10^{-4}$
Деионизированная вода	$726,9 \cdot 10^{-4}$
Деаэрированная вода	$726,9 \cdot 10^{-4}$
Морская вода	$763,2 \cdot 10^{-4}$
Солевой раствор NaCl	$763,2 \cdot 10^{-4}$
Глина 0,1 %	$726,9 \cdot 10^{-4}$
Глина 0,5 %	$726,9 \cdot 10^{-4}$
Графит 0,1%	$726,9 \cdot 10^{-4}$

Рассчитав все необходимые свойства рассматриваемых хладагентов, были определены соответствующие числа подобия (см. Таблицу 13).

Таблица 13 – Критерии подобия

Хладагент	Re	We
Водопроводная вода	2031,98	232,79
Деионизированная вода	1598,82	174,06
Деаэрированная вода	1598,82	174,06
Морская вода	1769,23	194
Солевой раствор NaCl	1166,96	126,09
Глина 0,1 %	2194,08	262,56
Глина 0,5 %	1670,84	214,81
Графит 0,1%	2184,94	262,87

3.3. Анализ падения одиночных капель хладагента на нагретую поверхность

Анализ отснятого видеоматериала проведенных экспериментов по одиночному взаимодействию капель хладагента различного состава (Морская вода, суспензия глины, дистиллированная вода) и разогретых до температур от 100 до 500°C стальных подложек, изготовленных из нержавеющей стали и стали AISI 430 позволил установить некоторые особенности процессов тепломассообмена на границе раздела сред «жидкость – металлическая подложка». Видеокадры стадий кипения и испарения капель жидкостей на поверхности разогретой подложки представлены на рисунке 13.

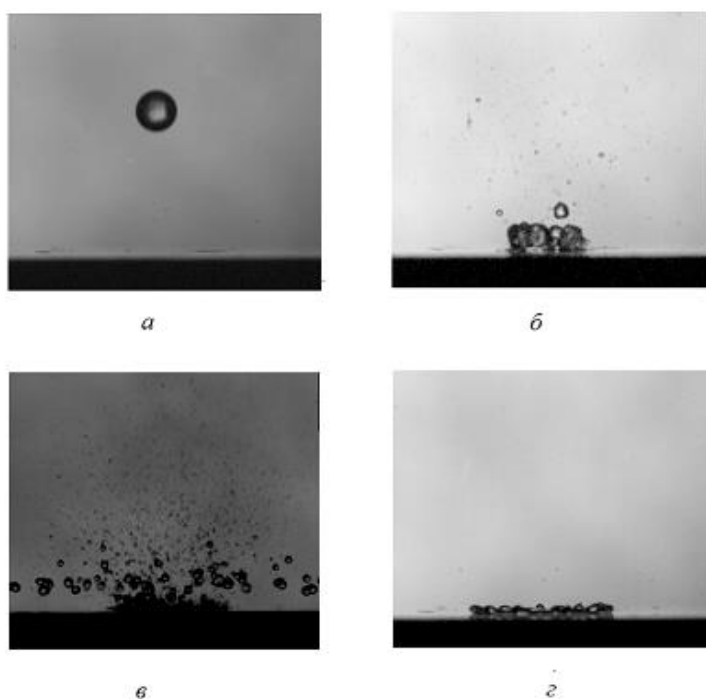


Рисунок 13 – Иллюстрация процессов, происходящих при падении одиночной капли на нагретую поверхность (а) – капля до соприкосновения с подложкой, (б) – второй гидродинамический режим(растекание), (в) – третий гидродинамический режим(разрушение). (г) – первый гидродинамический режим(прыгание).

Для капель хладагентов исследованы гидродинамические режимы взаимодействия с разогретой твердой стенкой и построены соответствующие режимные карты. Основываясь на видео материалах, было выделено три гидродинамических режима (рисунок 13). Первый – растекание, когда капля равномерно растекается и кипит. Второй – прыгание, когда капля не растекается, а вертикально вытягивается, совершая колебательные движения с выделением множества мелких фрагментов. Третий режим (разрушение) характеризуется разрушением капли на фрагменты разного размера, в том числе довольно большие. Одним из критериев третьего режима являлось отсутствие прикипания хладагента к поверхности подложки, относившееся к характерному признаку второго режима.

Однако не во всех опытах удавалось определить чёткую границу между этими тремя режимами. В связи с этим были приняты две схемы реализации режимов (таблица 14). Первая схема означала существование однозначного разделения режимов на первый, второй и третий. Вторая схема учитывала ситуацию, когда на полученном видео присутствовали критерии сразу двух режимов, тогда соответствующим диапазонам температур присваивалось сразу два режима. Полученные для режимных карт данные, а также свойства хладагентов представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Гидродинамические режимы и соответствующие им диапазоны температур, а также свойства хладагентов

Нержавеющая сталь (неполированная поверхность)				
Режим		Дистиллированная вода	Морская вода	Суспензия глины 0,1 %
№	Наименование	Диапазон температур, °С		
1	Растекание	110-150	100-150	120-170
1,2	Растекание-прыгание	150-180	-	-
2	Прыгание	-	160-180	180-230
2,3	Прыгание - разрушение	190-270	190-240	-
3	Разрушение	270-500	250-500	230-500
Сталь AISI 430 (полированная поверхность)				
№	Наименование	Диапазон температур, °С		
1	Растекание	110-160	110-150	100-150
1,2	Растекание-прыгание	-	-	-
2	Прыгание	170-180	160	160-180
2,3	Прыгание - разрушение	190-250	170-290	190-310
3	Разрушение	260-500	300-500	320-500
Свойства хладагентов				
	Кинематическая вязкость, м ² /с	$1,004 \cdot 10^{-6}$	$1,004 \cdot 10^{-6}$	$1,0046 \cdot 10^{-6}$
	Плотность, кг/м ³	998,2	1011	999
	Поверхностное натяжение, Н/м	$726,9 \cdot 10^{-4}$	$763,2 \cdot 10^{-4}$	$726,9 \cdot 10^{-4}$

После анализа таблицы 14 были построены режимные карты для вышеперечисленных хладагентов и подложек. На рисунке 14 изображена режимная карта для капель суспензии глины 0,1 %, взаимодействующих с полированной поверхностью (AISI 430). На рисунке 15 изображена режимная карта суспензии глины 0,1 %, но для неполированной поверхности. Режимы

взаимодействия каплей остальных хладагентов с поверхностями приведены в Таблице 14.

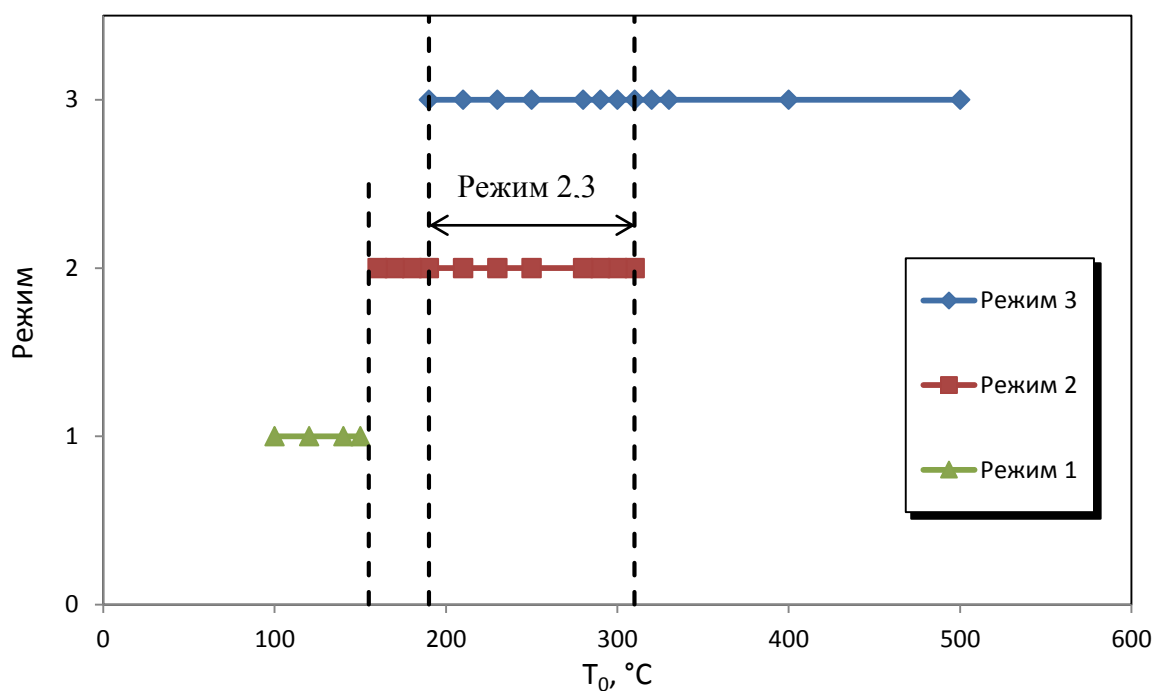


Рисунок 14 – Карта режимов взаимодействия капель суспензии глины 0,1 % с нагретой полированной поверхностью (сталь AISI 430).

При анализе рисунка 14 можно заметить, что переход от второго режима к третьему происходит при малых температурах, в отличие от остальных хладагентов для данной подложки. Также стоит заметить наличие переходного режима 1-2 с характерными признаками: растекание капли и активное выделение множества фрагментов мелких и средних размеров. При анализе видеоматериала наблюдалось разрушение капли на довольно крупные фрагменты, при этом её часть прикипала к подложке, для данной температуры принимался 2-3 переходный режим.

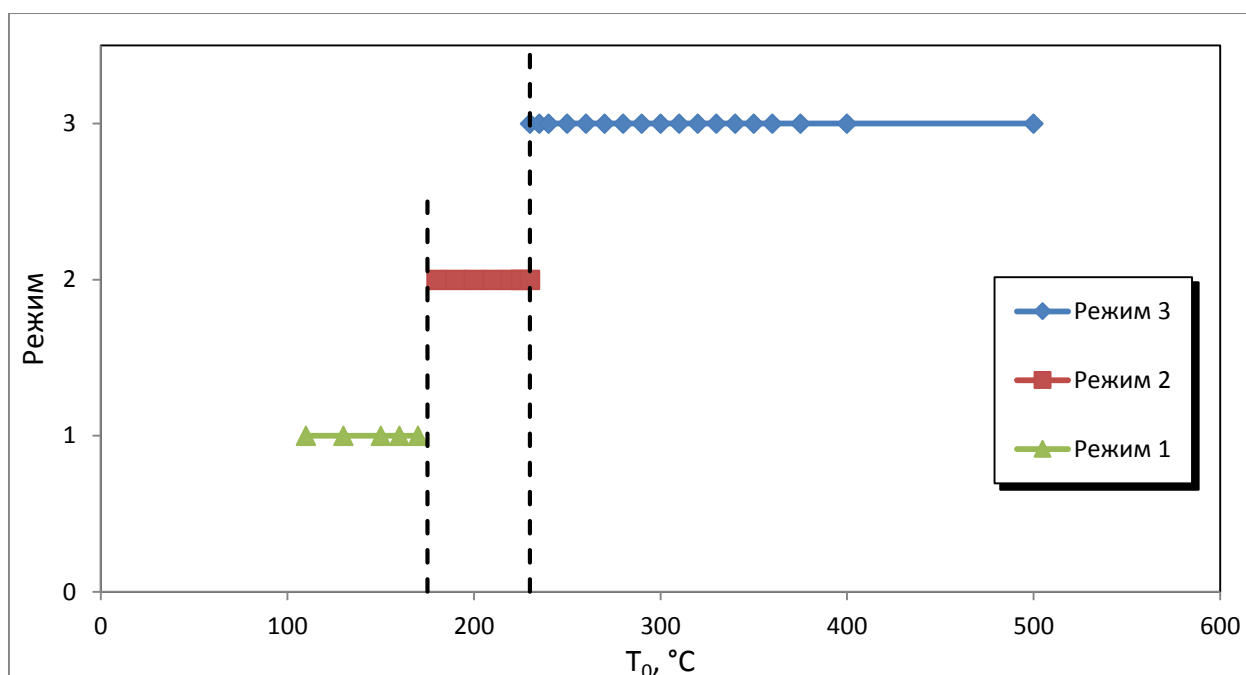


Рисунок 15 – Карта режимов взаимодействия капель суспензии глины 0,1 % с нагретой неполированной поверхностью (нержавеющая сталь).

Как видно на рисунке 15, в отличие от экспериментальных данных для стали AISI 430, при всех температурах у нас отсутствуют переходные режимы. Переход от режима к режиму происходит при больших температурах, в отличие от использования полированной поверхности. Важно заметить, что продолжительность перехода между 1 и 2, 2 и 3 режимом существенно различаются (уменьшается), при сравнении со сталью AISI 430.

В ходе обработки результатов экспериментов установлены значения чисел Вебера и Рейнольдса, характеризующие условия проведения этих конкретных опытов. Означенные значения представлены в Таблице 15. Скорость капель составляла 2 м/с, диаметр капли – $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Таблица 15 – Числа Вебера и Рейнольдса для капель рассматриваемых хладагентов

	Дистиллированная вода	Морская вода	Суспензия глины 0,1 %
Re	3984,1	3984,1	3981,7
We	109,86	105,97	109,95

Дальнейшая обработка экспериментальных данных заключалась в построении зависимостей среднего диаметра и количества отделившихся фрагментов от температуры подложки с учетом геометрии ее поверхности.

На рисунках 16, 17 представлены графики зависимостей среднего диаметра отделившихся фрагментов при взаимодействии капли хладагента с подложкой от температуры подложки (рассматривается диапазон температур, характерный разрушению – третьему режиму). График на рисунке 16 выполнен для неполированной поверхности, а на рисунке 17 – для полированной поверхности.

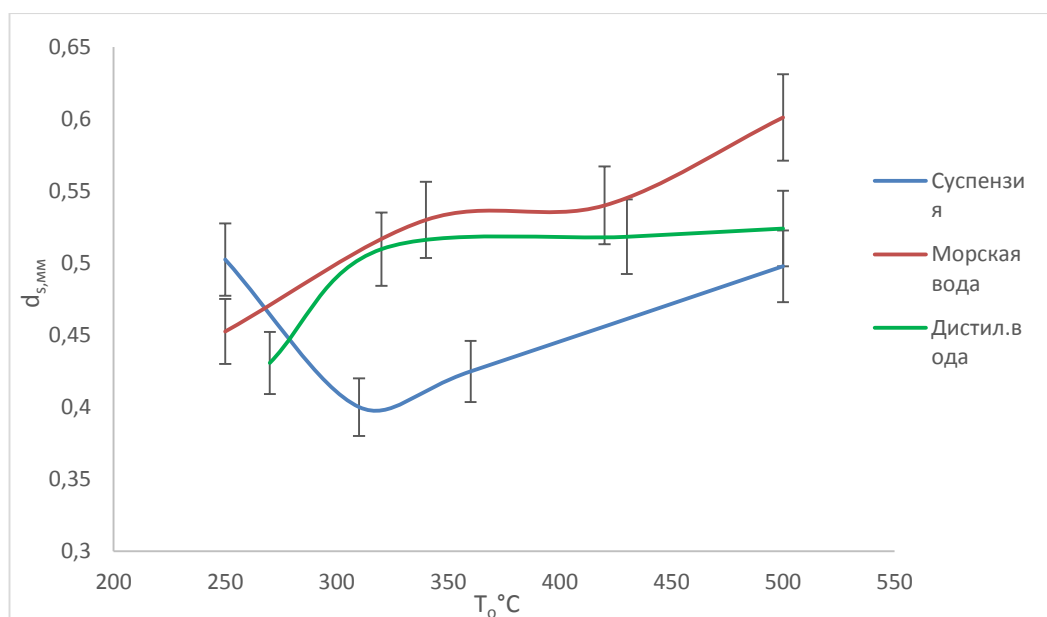


Рисунок 16 – График зависимостей среднего диаметра отделившихся фрагментов от температуры подложки с неполированной поверхностью

Из рисунка 16 видно, что для морской и дистиллированной воды в режиме 3, с увеличением температуры средний диаметр фрагментов растёт. Для суспензии глины 0,1 % сперва средний диаметр фрагментов наоборот уменьшается, а при достижении некоторой температуры начинает расти и зависимость становится схожей с другими хладагентами. Это связано с отсутствием у суспензии глины 0,1 % режима 2,3, о существовании которого было сказано выше.

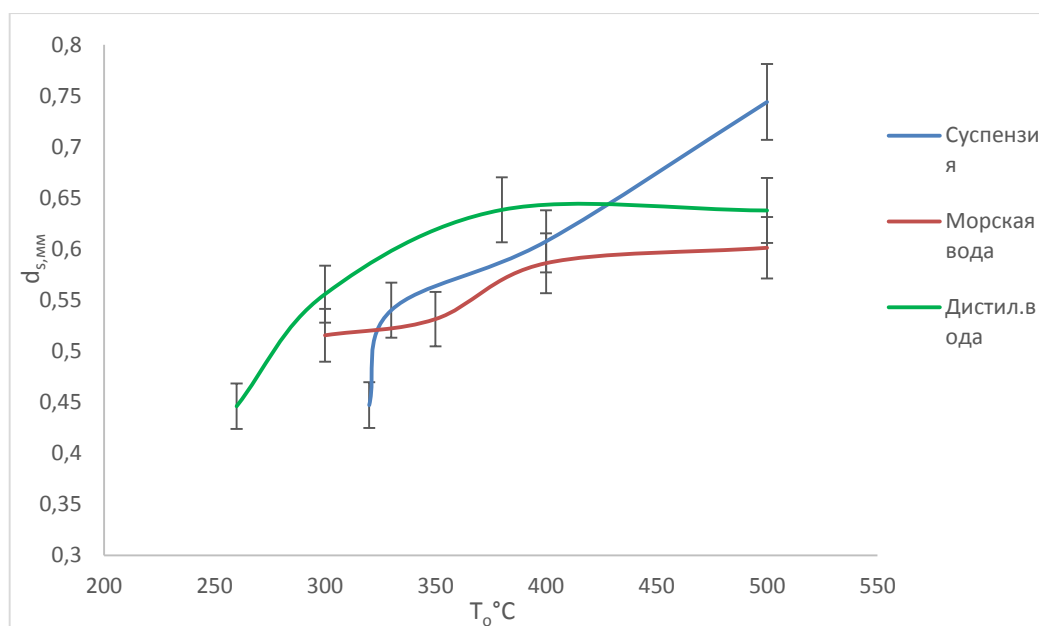


Рисунок 17 – График зависимостей среднего диаметра отделившихся фрагментов от температуры подложки для полированной поверхности (из стали AISI 430)

Для полированной поверхности с увеличением температуры средний диаметр сформированных фрагментов для всех хладагентов увеличивается. При этом режим 2,3 наблюдался у всех хладагентов.

На рисунках 18 и 19 представлены зависимости количества отделившихся фрагментов при взаимодействии капли хладагента с подложкой от температуры последней. График на рисунке 18 выполнен для неполированной поверхности, а на рисунке 19 – для полированной.

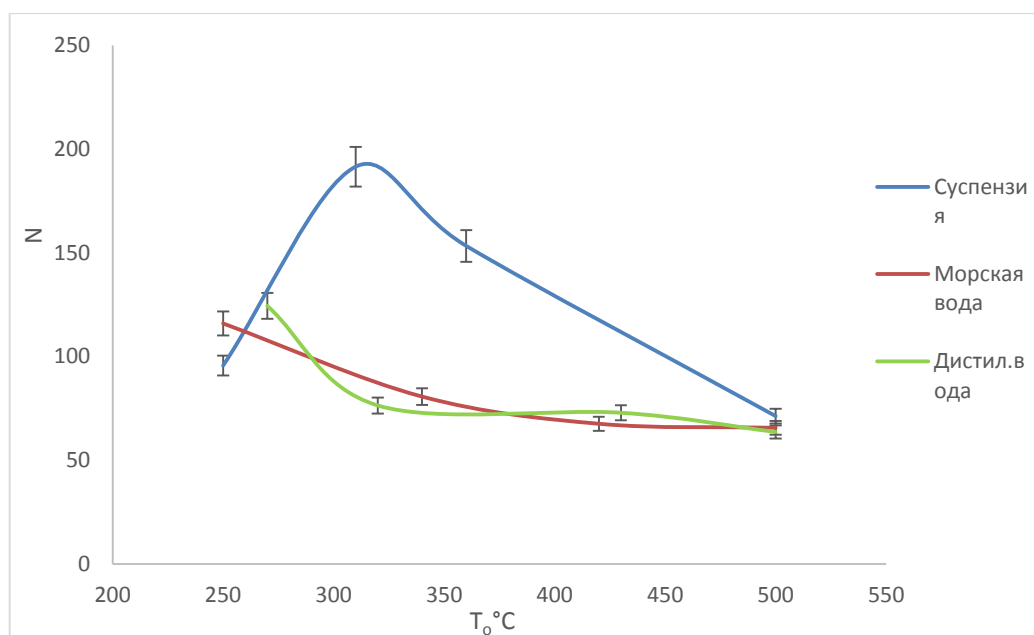


Рисунок 18 – Зависимость количества отделившихся фрагментов от температуры подложки (неполированная поверхность)

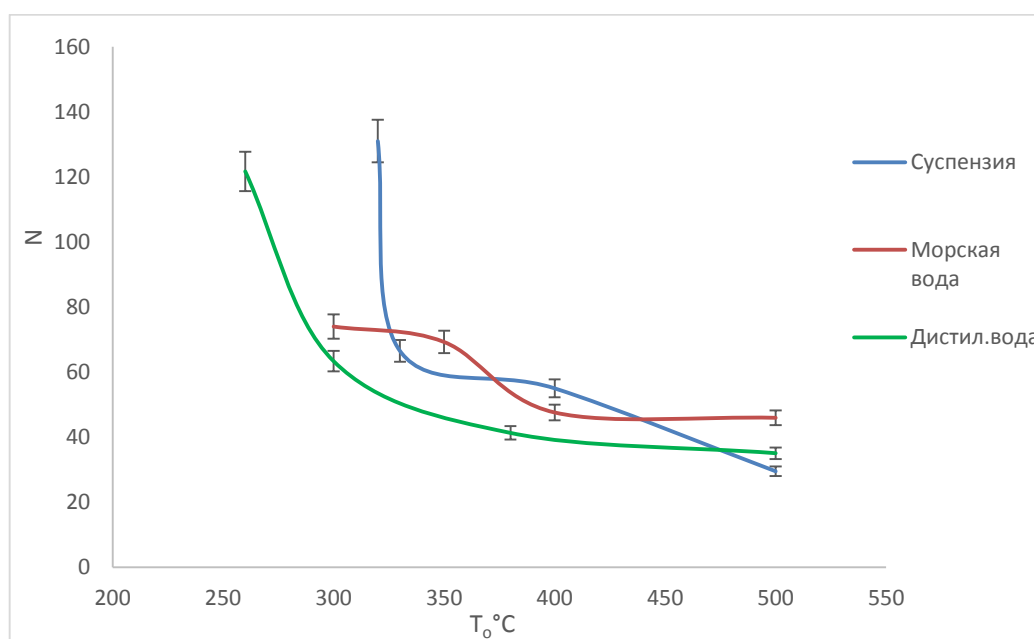


Рисунок 19 – Зависимость количества отделившихся фрагментов от температуры подложки для полированной поверхности (из стали AISI 430).

Как видно из рисунков 18 и 19, характеры зависимостей количества отделившихся фрагментов от температуры противоположны двум предыдущим зависимостям. С увеличением температуры количество отделившихся фрагментов уменьшается, что весьма логично, так как (при

учёте примерно равных объёмов первоначальных капель) чем больше фрагментов, тем меньше размер каждого из них. На рисунке 18, как и на рисунке 16, видно смену характера зависимости для капель суспензии глины 0,1 %, что объясняется отсутствием у данного хладагента режима 2,3 в случае неполированной поверхности.

На рисунках 20 и 21 представлены зависимости отношения суммарной площади поверхности фрагментов хладагента после дробления капли (S_n) к начальной площади поверхности капли (S_0) от безразмерной температуры подложки, равной отношению температуры подложки к температуре окружающей среды (T_0/T_{cp}). График на рисунке 20 выполнен для неполированной поверхности, а на рисунке 21 – для полированной.

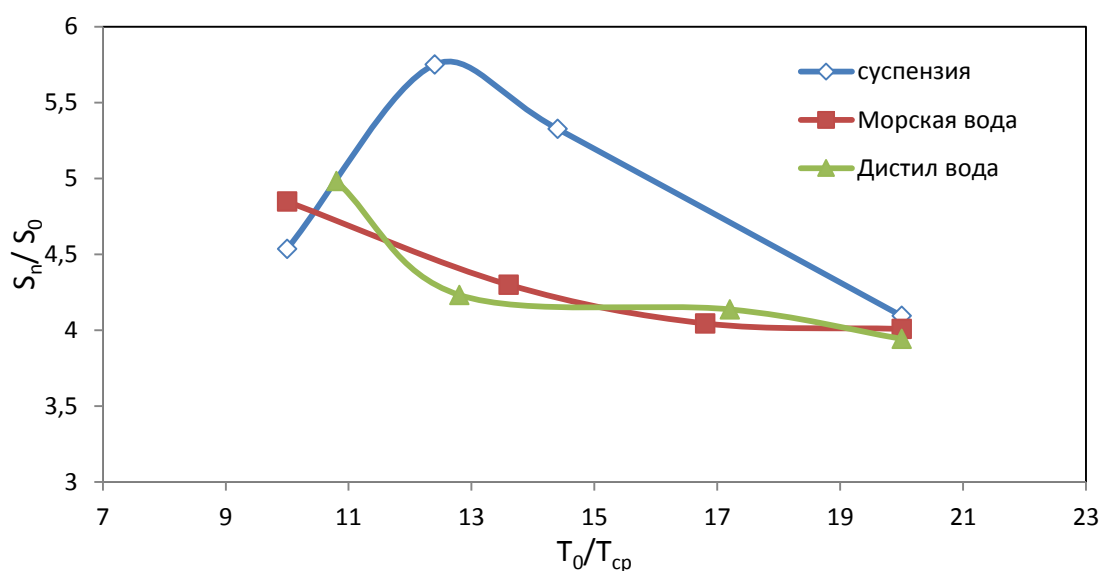


Рисунок 20 – Зависимость безразмерной площади (отношение суммарной площади поверхности фрагментов хладагента после дробления капли S_n к начальной площади поверхности капли S_0) от безразмерной температуры (отношение температуры подложки T_0 к температуре окружающей среды T_{cp}) для неполированной поверхности.

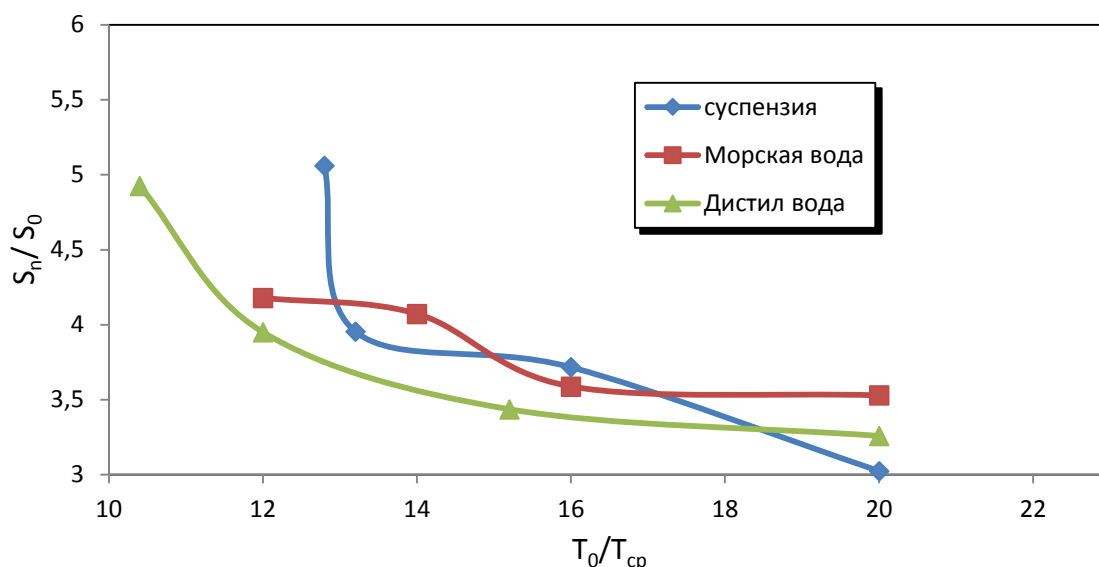


Рисунок 21 – Зависимость безразмерной площади (отношение суммарной площади поверхности фрагментов хладагента после дробления капли S_n к начальной площади поверхности капли S_0) от безразмерной температуры (отношение температуры подложки T_0 к температуре окружающей среды T_{cp}) для полированной поверхности (из стали AISI 430).

Из рисунков 20 и 21 видно, что с увеличением температуры суммарная площадь поверхности фрагментов хладагента после дробления капли уменьшается. На рисунке 21 для суспензии глины 0,1 %, как и на предыдущих изображениях, наблюдается смена характера зависимости, причина которой оговорена ранее. После достижения температуры равной 315-325°C зависимости для капель суспензии глины 0,1 % становится аналогичным другим хладагентам.

3.4 Связь экспериментальных исследований взаимодействия одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов с нагретой поверхностью.

В результате анализа всех экспериментальных данных по взаимодействию одиночной капли и многочисленной группы капель (спрея) хладагентов с нагретой поверхностью можно сделать выводы о связи данных экспериментов:

1. При использовании суспензий на основе воды в двух экспериментальных методиках было показано, что наиболее эффективное охлаждение нагретых поверхностей происходит при использовании в качестве хладагента суспензий с добавлением частиц глины или графита. По рисункам 11-12 видно, что максимальная эффективность охлаждения происходит при условии использования суспензий графита и глины. Также по таблице 14 можно увидеть, что при использовании суспензии глины происходит переход из режима «Разрушения» в режимы «Прыгание и Растекание» при более высоких температурах. Так как смачивание (переход от «Разрушения» к «Прыганию и Растеканию») поверхности начинается при сравнительно более высоких температурах в экспериментах с одиночными каплями, то и пузырьковое кипение при спрейном охлаждении начинается быстрее, способствуя максимальной эффективности охлаждения.

2. Исследования показали, что эффективность использования суспензий и растворов на основе воды зависит от материала металлических поверхностей. На рисунке 11 показано, что при охлаждении нагретого шара из стали 20Х13, максимально эффективное охлаждение наблюдалось при использовании в качестве хладагента суспензии глины. При использовании другого материала (стали 45), помимо суспензии глины, эффективное снижение температуры наблюдалось при использовании в качестве хладагента суспензии графита (рисунок 12). Стоит также отметить, что при изменении материала подложки изменялась пороговая температура перехода из одного режима в другой (таблица 14).

3. Появление переходных режимов при исследовании одиночных капель характеризует замедление процесса охлаждения при взаимодействии многочисленной группы капель (спрея) хладагентов с нагретой поверхностью. В особенности это наблюдается при переходе от режима «Разрушения» к режиму «Прыгание». Именно режим «Разрушения» характеризует пленочное кипение, которое уменьшает теплоотдачу от нагретой поверхности окружающей среде. Данное явление было замечено при изменении материала подложки и шероховатости ее поверхности. Полученные результаты по гидродинамическим режимам могут быть полезны не только в рассматриваемой области исследований, но и в ряде других теплотехнических технологий, например в нефтехимических и металлургических областях.

.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время современные тепловые агрегаты, такие как атомные станции, имеют очень высокие температуры тепловыделяющих и теплообменных поверхностей. Несмотря на постоянно модернизирующиеся системы контроля параметров реактора, аварийные ситуации на атомных станциях всё ещё могут произойти. Примером может послужить инцидент на станции Фокусима-1, когда из-за ряда причин не удалось остановить рост температуры и давления внутри реактора. Потребовалось быстрое охлаждение сильно нагретых конструкций станции. В связи с этим появляется необходимость в возможности быстрого уменьшения температуры различного рода материалов.

Исследования показали, что применение растворов NaCl и суспензий глины и графита на основе воды способствует более эффективному в сравнении с водопроводной водой охлаждению элементов поверхностей технологического оборудования АЭС и ТЭС. За счет полного или частичного исключения пленочного режима кипения на начальной стадии процесса охлаждения.

4.1. Swot-анализ

SWOT-анализ предназначен для выявления сильных, слабых сторон проекта, а также возможностей создаваемого проекта и его угроз. Анализ проводится в два этапа: на первом этапе описываются сильные и слабые стороны разрабатываемой технологии, выявляются возможности и угрозы при реализации проекта; на втором этапе анализа строятся интерактивные матрицы для оценки вариантов стратегического выбора.

Сильные и слабые стороны проекта, а также возможности и угрозы реализации представлены в таблице 16

После составления матрицы необходимо составить интерактивные матрицы, для выявления сильных и слабых сторон разработанной системы.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

«+» – сильное соответствие;

«-» – слабое соответствие.

Таблица 16 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научноисследовательского проекта (С): С1. Экологичность технологии С2. Эффективность охлаждения С3. Безотходность технологии. С4. Быстрая реализуемость технологии. С5. Надежная работа технологии. С6. Доступность хладагента	с стороны научноисследовательского проекта (С): Сл1. Стоимость хладагента. Сл2. Отсутствие у компании квалифицированных кадров для работы с технической разработкой. Сл3. Отсутствие у компании персонала, способного оборудовать предприятие данной технологией. Сл4. Большая стоимость оборудования.
Возможности (В): В1. Возможность долговременной эксплуатации технологии. В2. Обслуживание новых групп потребителей и товарных сегментов. В3. Появление спроса на разработанную технологию у других предприятий. В4. Обновление оборудования работающего в данной технологии. В5. Повышение стоимости конкурентных разработок		

Угрозы (У): У1. Отсутствие спроса на разработанную технологию. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Непригодность предприятия для реализации технологии. У4. Неблагоприятные изменения курсов валют или торговой политики в других странах У5. Несвоевременное финансовое обеспечение данного проекта.		
---	--	--

Таблица 17 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности проекта	Сильные стороны проекта						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	-	-	-	+	-
	B2	+	+	+	+	+	+
	B3	+	-	+	+	-	-
	B4	-	+	-	-	+	-
	B5	-	-	-	+	-	-
Возможности проекта	Слабые стороны проекта						
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	B1	-	-	-	-		
	B2	+	-	-	-		
	B3	+	-	-	-	+	
	B4	+	-	-	-	+	
	B5	+	-	-	-	+	

Таблица 18 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	+	+	-	-	+	+
	У2	-	+	+	-	+	-
	У3	+	-	-	-	+	-
	У4	+	+	-	-	+	+
	У5	-	-	-	+	-	-
	Слабые стороны проекта						
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	У1	+	-	-	+		
	У2	+	-	-	+		
	У3	-	+	+	-		
	У4	+	-	-	+		
	У5	+	-	-	+		

По интерактивным матрицам, представленных в таблицах 17 и 18, видно, что наиболее всего сильные стороны коррелируют с возможностью оборудования всего завода данной технологией и возможным появлением спроса на разработанную технологию у других предприятий. Наиболее часто коррелирующие слабые стороны и возможности не были выявлены.

Полученные результаты анализа заносятся в таблицу 19, для наглядной демонстрации возможных корреляционных вариантов.

Таблица 19 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научноисследовательского проекта: C1. Экологичность технологии C2. Энергоэффективность технологии C3. Безотходность технологии. C4. Быстрая реализуемость технологии. C5. Надежная работа технологии. C6. Необходимость минимального количества персонала для эксплуатации технологии.	Слабые стороны научноисследовательского проекта: Сл1. Доля рынка продаж Сл2. Отсутствие у компании квалифицированных кадров для работы с технической разработкой. Сл3. Отсутствие у компании персонала, способного оборудовать предприятие данной технологией. Сл4. Большая стоимость оборудования.
Возможности: B1. Возможность долговременной эксплуатации технологии. B2. Обслуживание новых групп потребителей и товарных сегментов B3. Появление спроса на разработанную технологию у других предприятий. B4. Обновление оборудования работающего в данной технологии. B5. Повышение стоимости конкурентных разработок	B1C1C5 B2C1C2C3C4C5C6 B3C1C3C4 B4C2C5 B5C4	- B2Сл1 B3Сл1Сл4 B4Сл1Сл4 B5Сл1Сл4

Угрозы:		
У1. Отсутствие спроса на разработанную технологию.	У1С1С2С5С6	У1Сл1Сл4
У2. Развитая конкуренция технологий производства.	У2С2С3С5	У2Сл1Сл4
У3. Непригодность предприятия для реализации технологии.	У3С1С5	У3Сл2Сл3
У4. Неблагоприятные изменения курсов валют или торговой политики в других странах	У4С1С2С5С6	У4Сл1Сл4
У5. Несвоевременное финансовое обеспечение данного проекта.	У5С4	У5Сл1Сл4

SWOT-анализ показал, что самыми перспективными возможностями при реализации данного проекта являются: возможность оборудования всего завода данной технологией и появление спроса на разработанную технологию у других предприятий. А главными угрозами при реализации являются: неблагоприятные изменения курсов валют или торговой политики в других странах и отсутствие спроса на разработанную технологию.

По полученным результатам можно сделать вывод, что разрабатываемая технология является перспективным проектом, что свидетельствует большое количество сильных сторон и маловероятные угрозы.

4.2. Календарный план-график выполнения работ

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

В таблице 20 представлен перечень работ и участников в рамках проведения научного исследования.

Таблица 20 – Перечень работ и определение участников каждой работы

№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Составление ТЗ	Руководитель
2	Выбор темы и направления проведения эксперимента	Руководитель, студент
3	Теоретические исследования , проведение обзора	Студент
4	Составление плана проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	Руководитель, студент
5	Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей. Заказ дистиллированной воды	Руководитель, студент
6	Установка и подключение оборудования.	Руководитель, студент
7	Проведение предварительного эксперимента	Студент
8	Обработка результатов предварительного эксперимента	Студент
9	Корректирование работы оборудования	Руководитель, студент
10	Проведение эксперимента	Студент
11	Обработка результатов	Студент

12	Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов	Руководитель, студент
13	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	Студент
14	Проверка проекта	Руководитель

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни.

Согласно производственному календарю на 2019 год:
В 2019 году 365 календарных дней. При пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями будет 247 рабочих дней, в том числе 5 сокращенных на один час предпраздничных рабочих дней, и 118 выходных и нерабочих праздничных дней.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,477.$$

Продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях.

Рассчитанные значения в календарных днях округляем до целого числа.

Результаты расчетов сведем в таблицу 21.

Таблица 21 - Временные показатели проведения научного исследования

№ раб	Содержание работ	T_{pi}	T_{ki}	На- чало	Ко- нец
1	Составление ТЗ	1	2	0	2
2	Выбор темы и направления проведения эксперимента	2	3	2	5
3	Теоретические исследования , проведение обзора	14	21	5	26
4	Составление плана проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	1	2	26	28
5	Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей. Заказ дистиллированной воды	1	2	28	30
6	Установка и подключение оборудования.	1	2	30	32
7	Проведение предварительного эксперимента	10	15	32	47
8	Обработка результатов предварительного эксперимента	3	5	47	52
9	Корректирование работы оборудования	1	2	52	54
10	Проведение эксперимента	31	46	54	100
11	Обработка результатов	7	11	100	111
12	Обобщение и оценка результатов исследований, написание выводов	2	3	111	114
13	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	4	6	114	120
14	Проверка проекта	1	2	120	122

График Ганта строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках ВКР проекта на основе табл. 21 за период времени дипломирования.

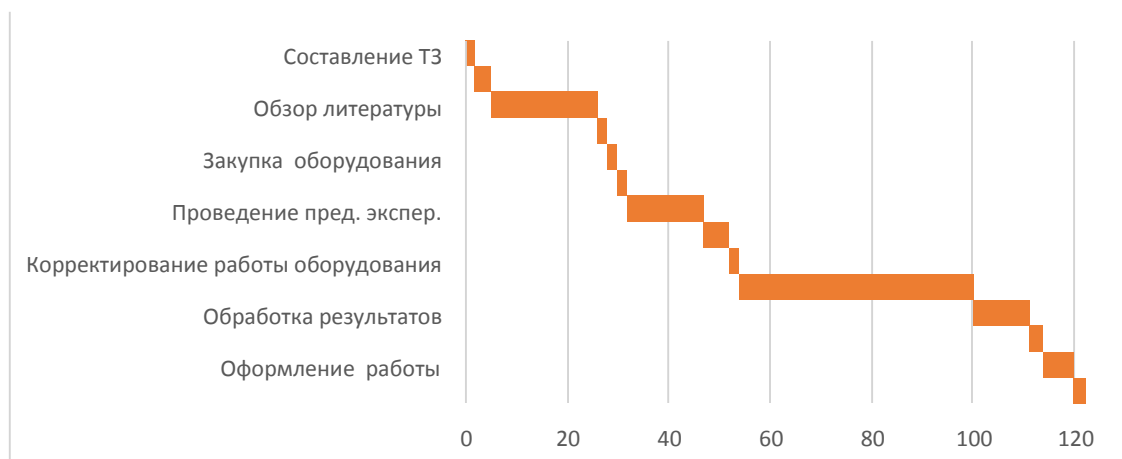


Рисунок 22 – График Ганта

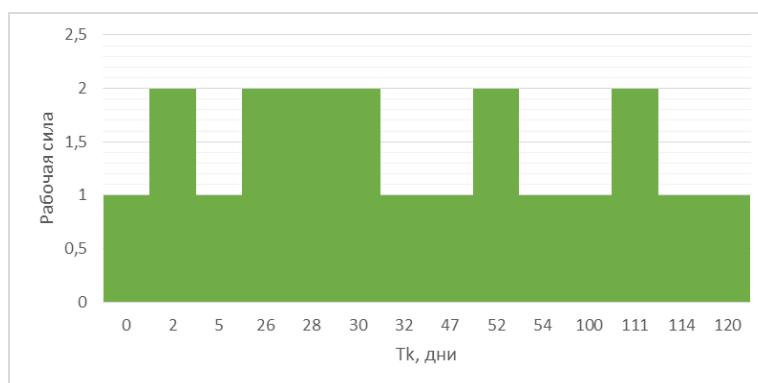


Рисунок 23 – Диаграмма использования рабочей силы

4.3 Смета бюджет-проекта

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

- затраты на специальное оборудование для научных(экспериментальных) работ;
- полная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);

Таблица 22 - Материальные затраты

Наименование расхода	Единицы измерения	Объём	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Phantom V411, высокоскоростная видеокамера	шт	1	300000	300000
Фотоаппарат Nikon D7100	шт	1	39000	39000
Объектив Sigma	шт	1	22000	22000
Механизированное координатное устройство	шт	1	65000	65000
Термоэлектрический преобразователь ХА	шт	1	3485	3485
Термоэлектрический преобразователь ХК	шт	1	3485	3485
Алюминиевый каркас	шт	1	4000	4000
Устройство сбора данных	шт	1	23500	23500
Комплекс осветительного оборудования	шт	1	12154	12154
Насос	шт	1	58900	58900

Продолжение таблицы 22

Наименование расхода	Единицы измерения	Объём	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Блок питания	шт	1	19655	19655
Горелка	шт	1	300	300
Канцелярские товары	-	-	-	500
Заправка картриджа	шт.	1	500	500
Бумага	шт. пачек	1	250	250
Компьютер	шт	1	40000	40000
Электроэнергия	КВт·ч	162,1	4,25	688,93
Итого:				592729

В затраты на электроэнергию входит потребление света и использование различного оборудования в течении проекта.

Расходы на электроэнергию представлена в таблице 23.

Таблица 23 - Потребление электроэнергии.

Источники потребления	Мощность потребления , КВт	Кол-во часов работы, ч	Расход, КВт·ч
Компьютер	0,5	144	72
Освещение	0,07	90	6,3
Фотоаппарат	0,1	60	6
Видеокамера	0,25	60	15
Комплекс осветительного оборудования	0,23	60	13,8
Термопары	0,1	40	4
Блок питания	1	40	40
Насос	0,5	10	5
Итого, КВт*ч	162,1		

Амортизация – перенесение по частям стоимости основных средств и нематериальных активов по мере их физического или морального износа на стоимость производимой продукции (работ, услуг).

Таблица 24 – Амортизация

Объекты	Норма аморти- зации	Первич. стоимость	Величина амортизации в год	Кол- во часов работы в год	Амортизац ия в час	Кол-во часов работы	С _{Аморт}
Компьютер	20	40000	8000	1720	4,651	144	669,77
Принтер	20	5100	1020	10	102	1	102
Фотоаппарат	20	39000	7800	675	11,555	60	693,33
Видеокамера	20	300000	60000	675	88,88	60	5333,33

Продолжение таблицы 24

Комплекс осветительного оборудования	20	12154	2430	675	3,60	60	216
Термопары и устройство сбора данных	20	30470	6094,6	338	18,031	60	1081,88 2
Блок питания	20	19655	3931	338	11,630	40	465,21
Насос	20	58900	11780	169	69,70	10	697,04
Объектив Sigma	20	22000	4400	675	6,518	60	391,11
Механизированное координатное устройство	20	65000	13000	675	19,25	60	1155,56
Итого							10805,3 1

Зарплата руководителя ВКР бакалавра определяется по условию часовой оплаты. Норма времени на руководство ВКР бакалавра составляет 25 часов, в соответствии с положением о порядке нормирования труда научнопедагогических работников. Тариф на почасовую оплату составляет 350 р./час для доцента. Поэтому расходы на оплату труда составят:

$$C_{з.п.} = 25 \cdot 350 = 8750 \text{ руб.}$$

Отчисление на социальные нужды:

$$S_{с.н.} = 8750 \cdot 0,28 = 2450 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на вознаграждение работников составляют:

$$C_{з.п.} = 8750 + 2450 = 11200 \text{ руб.}$$

По полученным данным можно сделать вывод, что общая стоимость данного технического проекта составляет 603929 рублей, большая часть которой затрачивается на приобретение технических средств.

4.4. Ресурсоэффективность

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по трем вариантам исполнения приведено в таблице 25, где исполнение 2 включает в себя использование сверхскоростной видеокамеры для научных исследований Phantom Miro M/R/LC310 стоимостью 1339477 рублей, вместо нынешней Phantom V411, а исполнение 3 характеризуется тем, что установка (стенд) уже собран и докупать оборудование не надо.

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Материальные затраты проекта	592729	1632206	2003,93
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	11200	11200	11200
Накладные расходы (16 % от суммы ст. 1-2)	96628	262944	2112
Бюджет затрат проекта (Сумма ст. 1-3)	689357	1895150	4115

Интегральные показатели финансовой эффективности научного исследования:

$$I^1_{\text{исп.}} = \frac{689357}{1895150} = 0,36; I^2_{\text{исп.}} = \frac{1895150}{1895150} = 1; I^3_{\text{исп.}} = \frac{4115}{1895150} = 0.002$$

В таблице 26 представлена оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Таблица 26 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Скорость выполнения проекта	0,25	5	5	1
2. Финансовая возможность выполнения проекта	0,3	4	1	5
3. Точность результатов	0,25	4	5	3
4. Энергосбережение	0,05	2	2	2
5. Надежность	0,15	5	5	5

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{\text{исп1}}^p = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,15 = 4,3$$

$$I_{\text{исп2}}^p = 5 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,15 = 3,65$$

$$I_{\text{исп3}}^p = 1 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,15 = 3,35$$

Наиболее ресурсоэффективным оказалось исполнение 1.

Заключение

В курсовом проекте для ВКР произведены: SWOT-анализ, раскрывающий сильные и слабые стороны работы; календарный план, отражающий технологическую зависимость и последовательность выполнения комплекса работ; расчет бюджета проекта; оценка ресурсоэффективности.

Можно сказать, что разрабатываемая технология является перспективным проектом, что свидетельствует большое количество сильных сторон и маловероятные угрозы.

Общая продолжительность работы над проектом составляет 122 календарных дня. Основной объем работы выполняется студентом.

Использование суспензий и растворов на основе воды для охлаждения поверхностей теплонагруженного оборудования АЭС и ТЭС в теплоэнергетике экономически обосновано. Высокие баллы надежности, материалоемкости и удобства эксплуатации, позволяют судить о правильной разработке системы.

Глава 5. Социальная ответственность

5.1 Социальная ответственность

Введение

Под социальной ответственностью понимается сознательное отношение субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, гражданского долга, социальных задач, норм и ценностей, понимание последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества. В свою очередь социальная ответственность может быть, как корпоративная, так и индивидуальная.

Социальная ответственность может проявляться на любом уровне – от индивида до государства. Конечно, мера и основания ответственности будут различаться. Корпоративная социальная ответственность — это концепция, в соответствии с которой организации учитывают интересы общества, возлагая на себя ответственность за влияние их деятельности на фирмы и прочие заинтересованные стороны общественной сферы.

Наименее изученным в настоящее время является феномен индивидуальной социальной ответственности, которая отличается тем, что данную ответственность несет не организация, а отдельная личность.

В процессе выполнения данной работы вопросы социальной ответственности затронули как непосредственных исполнителей работы (индивидуальная), так и Томский политехнический университет (корпоративная).

Данная выпускная квалификационная работа посвящена экспериментальному исследованию эффективных условий охлаждения элементов корпусов теплотехнического оборудования с использованием эмульсий и суспензий на основе воды, в случае аварийного перегрева.

Объектом исследования является теплотехническое оборудования на ТЭС и АЭС. Несмотря на огромное количество ежегодно проводимых теоретических и экспериментальных исследований, проблема, связанная с необходимостью быстрого охлаждения поверхностей технологического оборудования АЭС и ТЭС, в случае аварийного перегрева достаточно актуальна. В первую очередь это связано с возникновением стабильной паровой пленки (пленочное кипение) на поверхности сильно нагретого металлического объекта. Эта пленка существенно замедляет теплообмен. Ускорение перехода от пленочного кипения к пузырьковому является крайне важным для изучаемых процессов. Такого эффекта добиваются, например, за счет добавления частиц различного размера, происхождения и концентрации в охлаждающую жидкость или применения морской воды, а также водно-солевых растворов.

Для повышения надежности оборудования на станциях были определены массовые концентрации мелких включений в суспензиях и их размеры, а также массовые концентрации солей в водных растворах. Это позволило подобрать наиболее ресурсоэффективный вариант хладагента, для отведения теплоты от ограждающей конструкции теплотехнического оборудования на станциях в случае аварийного перегрева (ЧС). В связи с этим надежность станции значительно увеличивается.

Результаты экспериментального исследования являются информационной базой для разработки и применения технологии, эффективного и быстрого охлаждения теплонагруженных поверхностей ограждающих конструкций энергетического оборудования (за счет создания вспомогательного теплообменного слоя между теплонагруженной поверхностью и наружной средой на основе суспензий и растворов с высокой теплоемкостью и теплопроводностью). А также находят свое применение в теплоснабжении, системах пожаротушения, термической очистки жидкостей, закалки и обработки металлов, очистки

различных поверхностей высокотемпературными гетерогенными потоками, охлаждения оборудования различного назначения и их ограждающих конструкций или корпусов (например, в электронных устройствах, двигателях автомобилей, ядерных реакторах и др.)

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78:

1. рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество;
2. рабочий стул должен иметь дизайн, исключающий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте;
3. рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.

В соответствии с СН-245-71 в помещении должен быть организован воздухообмен. Для улучшения воздухообмена необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования: общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки; правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции.

В соответствии с СН-181-70 рекомендуются следующие цвета окраски помещений: потолок - белый или светлый цветной; стены - сплошные, светло-голубые; пол - темно-серый, темно-красный или коричневый. Применение указанной палитры цветов обусловлено ее успокаивающим воздействием на психику человека, способствующим уменьшением зрительного утомления. При выполнении интерьера, обычно выбирают не более трех основных цветов небольшой насыщенности. Окраска оборудования и приборов, в основном, имеет светлые цвета с высококонтрастными органами управления и надписями к ним.

Согласно ТК РФ, ФЗ № 197 - каждый работник имеет право на:

1. обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
2. получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
3. отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
4. обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
5. повышенные или дополнительные гарантии и компенсации за работу с вредными и опасными условиями труда;

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса. Рабочее место является основной подсистемой производственного процесса.

Эргономичность и комфорт рабочей зоны персонала данного производства регулируются СП 2.2.2.1327-03.

5.3. Производственная безопасность

Таблица 27 – Выявленные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
	+	+	+	1. В соответствии с характером выполняемых работ температура на наружной поверхности изоляции согласно СНиП 41-03-2003[27].
1. Термический ожог.		+	+	2. Защитные ограждения движущихся частей оборудования должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.062-81[28].
2. Движущиеся и работающие механизмы и оборудование.		+	+	3. С точки зрения электробезопасности (ГОСТ 12.1.030-81) оборудование, запитываемое напряжением выше 42 В.[29].
3. Воздействие электрического тока.	+	+	+	4. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88[30]
4. Отклонение показателей микроклимата в помещении.	+	+	+	5. В соответствии с характером выполняемых работ освещенность рабочего места по СНиП II-4-79[31].
5. Недостаточная освещенность рабочей зоны.	+	+	+	6. Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03[32]
6. Воздействие электромагнитного излучения.		+	+	7. Оценки радиации МСанПиН 001-96[33].
7. Повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации.			+	

5.3.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.

Экспериментальная часть исследования связана с работой на специализированных стендах, включающая в себя следующие антропогенные факторы:

- движущиеся и работающие механизмы и оборудование;
- термический ожог;
- воздействие электрического тока;

- повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации.

Обработки информации исследований непосредственно связано с компьютером, а, следовательно, с дополнительным воздействием целой группы вредных и опасных факторов, что существенно снижает производительность труда. К таким факторам можно отнести:

- отклонение показателей микроклимата в помещении;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- воздействие электромагнитного излучения;

Инфракрасное излучение является составной частью солнечного спектра, имея в непосредственной близости от земли длину волны от 760 нм, до 2800–6000 нм в зависимости от количества содержащихся в воздухе водяных паров. В производственных помещениях источниками инфракрасной радиации может служить различное технологическое оборудование.

Инфракрасная радиация может явиться этиологическим фактором не только при возникновении некоторых профессиональных поражений (ожоги, дерматиты, катаракта), но и влияет на ухудшение показателей микроклимата – температуры и влажности воздуха. При наличии в производственных помещениях мощных источников инфракрасного излучения значительно возрастает общее количество тепловыделений, поступающих в цех.

Измерение напряжения (интенсивности) лучистой энергии производят с помощью прибора актиометра, который регистрирует напряжение радиации в малых калориях, получаемых в течение минуты на 1 см² поверхности, расположенной перпендикулярно к источнику лучей. Принцип работы актиометров основан на поглощении энергии черным телом и превращении таким путем лучистой энергии в тепловую.

Таблица 28 – Шкала субъективной оценки радиации

0,4–0,8 кал/см ² ·мин.	радиация слабая
0,8–1,5 кал/см ² ·мин.	радиация умеренная
1,5–2,3 кал/см ² ·мин.	радиация средняя
2,3–3,0 кал/см ² ·мин.	радиация повышенная
3,0–4,0 кал/см ² ·мин.	радиация значительная
4,0–5,0 кал/см ² ·мин.	радиация сильная
Более 5,0 кал/см ² ·мин.	радиация очень сильная

Под ультрафиолетовой (УФ) радиацией понимается электромагнитное излучение спектрального диапазона (10-400 нм) УФ лучи характеризуются значительной фотобиологической и фотохимической активностью, связанной с большой энергией их квантов, передающихся поглощающей молекуле. При длине волны менее 315 нм световой квант обладает энергией, достаточной для разрушения молекулы белка, т.е. обладает бактерицидностью.

УФ радиация оказывает не только общебиологическое влияние, но и обладает специфическим действием, свойственным определенной длине волны электромагнитного излучения. В этом отношении обычно различают четыре ее области:

- область А (400-320нм) – флуоресцентное действие;
- область В (320-280нм) – эритемно-загарное действие;
- область С (280-20нм) – бактерицидное действие;
- область Д (285-265нм) – антирахитическое действие.

К производственным вредностям относятся ультрафиолетовые лучи, которые могут влиять на рабочих. Ультрафиолетовые лучи являются причиной острого профессионального заболевания глаз, а также могут вызывать дерматиты с явлениями отека, жжения, зуда, иногда

сопровождающимися общими симптомами: повышением температуры тела, головной болью и др. явлениями.

Для индивидуальной защиты рабочих используются щитки, шлемы, очки со специальными стеклами. Применяют также кабины, защитные экраны, ширмы. Важную профилактическую роль играет санитарнопросветительная работа, особенно среди подсобных рабочих, которые не всегда пользуются средствами индивидуальной защиты глаз.

Движущиеся части оборудования, являющиеся источником опасности, ограждают. Если оборудование эксплуатируют без ограждения, то в этом случае устанавливают предупредительную сигнализацию о пуске и остановке агрегата и отключения от источника энергии. Органам управления оборудованием предъявляют следующие основные требования: безопасные и удобные в работе размеры, и формы, доступность выполнения отдельных операций. Конструкция должна исключать самопроизвольный пуск или остановку оборудования. Для защиты от действия опасных факторов применяют следующие основные средства защиты: предохранительные и сигнализирующие устройства, а также дистанционное управление. Защитные ограждения движущихся частей оборудования должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.062-81.

Источником термических ожогов могут быть части оборудования, выбросы газов жидкостей, имеющих высокую температуру. Защита от воздействия на человека поверхностей с высокой температурой выполняется путем их тепловой изоляции. Существует несколько видов ожогов: термические, электротермические, солнечные и химические ожоги. Наиболее часто встречаются термические ожоги. Термический ожог - это ожог, который появляется в результате воздействия на тело пламени, прямого контакта кожи с предметами или жидкостями, нагретыми до высоких температур. В соответствии с характером выполняемых работ

температура на наружной поверхности изоляции согласно СНиП 41-03-2003. Первое что необходимо сделать при термическом ожоге, это заблокировать термическое воздействие посредством имеющихся в доступности подручных материалов в виде песка, снега, воды. После чего требуется охладить пораженные участки путём промывания холодной водой или прикладыванием холодных компрессов на протяжении 20 минут. Третьим заключительным этапом является нанесение на рану любого антисептического препарата.

Отклонения температуры и влажности воздуха от нормы могут возникнуть при неблагоприятных метеоусловиях. Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания либо обморожения. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой же температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек и дыхательных путей работающего. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88. Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяются следующие мероприятия: устройство систем вентиляции, кондиционирование воздуха и отопление

Недостаточная освещенность способствует возрастанию нагрузки на органы зрения и приводит к утомляемости организма. В соответствии с характером выполняемых работ освещенность рабочего места по СНиП II-479 должна быть 200 Лк – общая освещенность и 300 лк — комбинированное освещение. Нормы естественного освещения установлены с учетом обязательной регулярной очистки стекол световых

проемов не реже двух раз в год (для помещений с незначительным выделением пыли, дыма и копоти). Учитывая, что солнечный свет оказывает благоприятное воздействие на организм человека, необходимо максимально продолжительно использовать естественное освещение..

При работе за компьютером инженер-исследователь подвергается воздействию электромагнитного излучения. Оно пагубно влияет на костные ткани, ухудшает зрение, повышает утомляемость, а также способствует ослаблению памяти и возникновению онкологических заболеваний. Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. С целью снижения вредного влияния электромагнитного излучения при работе за компьютером необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования: продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должна превышать 2 ч; обязательные перерывы в работе, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата; экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии $60 \div 70$ см, но не ближе 50 см; для ослабления влияния рассеянного рентгеновского излучения от монитора рекомендуется использовать защитные фильтры (экраны).

5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя.

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

1. случайное прикосновение к токоведущим частям;
2. появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;
3. появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;

4. освобождение другого человека, находящегося под напряжением; воздействие атмосферного электричества, грозových разрядов.

С точки зрения электробезопасности (ГОСТ 12.1.030-81) оборудование, запитываемое напряжением выше 42 В, должно быть заземлено или занулено. При приближении грозы необходимо оперативно закончить работу на компьютере и отключить его от сети. Кроме того, обязательно должна быть предусмотрена возможность быстрого отключения напряжения с разделительного щита.

5.4. Экологическая безопасность

Защита окружающей среды представляется собой комплексную проблему, требующую максимальных усилий для достижения экологической безопасности при проведении определенной работы. Особое значение имеет количественная оценка последствий загрязнения окружающей среды и ущерба, причиняемого населению страны.

Безопасность окружающей среды подразумевает под себя включение комплекса мероприятий который ограничивает выбросов промышленного производства с последующей утилизацией или захоронением отходов. Все отходы должны сортироваться и накапливаться для дальнейшей переработки. В частности, люминесцентные лампы, использующиеся для освещения рабочей зоны, должны быть утилизированы. Утилизация данных ламп производится специализированной компанией, с которой подписывается договор об утилизации.

Немаловажным фактором является потребление электроэнергии. С увеличением компьютерных систем, внедряемых в производственную сферу, увеличивается и объем потребляемой ими электроэнергии, что влечет за собой увеличение мощностей электростанций и их количества. И то и другое не обходится без нарушения экологической обстановки.

Негативное воздействие объекта на окружающую среду практически отсутствует кроме небольшого количества отходов в виде отработанных материалов для исследований. Активной формой защиты окружающей среды является переход к безотходным и малоотходным технологиям: разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы. Пассивные методы защиты окружающей среды включают комплекс мероприятий по ограничению выбросов промышленного производства с последующей утилизацией и захоронением отходов.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее типичной ЧС являются пожары. В целях предотвращения возгорания необходимо соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием, а легко воспламеняемые материалы хранить по возможности в подземных складах.

Для повышения устойчивости объекта к пожарам необходимо использовать огнеупорные материалы, а также ознакомить персонал с режимом работы объекта в случае возникновения ЧС и обучить выполнению конкретных работ по ликвидации очагов поражения. Основными мероприятиями, обеспечивающими успешную эвакуацию людей и имущества из горящего здания, являются: составление планов эвакуации; назначение лица, ответственного за эвакуацию, которое должно следить за исправностью дверных проемов, окон, проходов и лестниц; ознакомление работающих в лаборатории сотрудников с планом эвакуации, который должен висеть на видном месте. Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02-85): огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, пожарный кран с рукавом и ящик с песком (в коридоре). Кроме того, каждое помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.

В случае возникновения пожара спасательные формирования гражданской обороны (ГО) должны как можно быстрее приступить к работам по спасению людей, действуя совместно с формированиями ГО медицинской службы. Спасатели ГО немедленно начинают эвакуацию, обеспечивают работников средствами индивидуальной защиты, оказывают при необходимости первую медицинскую помощь, вызывают противопожарную охрану. При недостатке сил своего объекта для спасательных работ распоряжением старшего начальника могут привлекаться территориальные формирования ГО и другие силы. До

прибытия пожарной охраны возгорание ликвидируется по возможности первичными средствами пожаротушения.

Водопроводная вода является самым надежным, доступным и простым средством для пожаротушения. Для более эффективного тушения очага воспламенения используют пожарные рукава и стволы, которые находятся в специальных шкафах, расположенных в коридоре. Набор первичных средств огнетушения включает в себя ящик с песком, топор и пожарное ведро.

Для устранения возгорания в электроустановке, используется огнетушитель углекислотного типа ОУ-2 или ОП-5. Эвакуация людей должна организовываться параллельно устранению самого очага пожара.

Заключение по главе

Как известно, энергетика является наиболее опасной энергетической отраслью. Последствия аварий на атомных, тепловых электростанциях может нанести колоссальный ущерб окружающей среде и человечеству. Социальная роль экспериментального и численного исследования заключается в превентивных мерах по обеспечению безопасной эксплуатации оборудования, а также в сведении к минимуму последствий аварий на электростанциях.

Учитывая данные обстоятельства, необходимость совершенствования технологического процесса аварийного охлаждения с помощью суспензий и растворов на основе воды становится все более очевидной. Новые технологии охлаждения в экстренных ситуациях позволяют существенно повысить эффективность теплоотвода от энергетических объектов, что приводит к экономии ресурсов, а также к снижению влияния вредных выбросов на окружающую среду. К таким хладагентам относятся графитовая и глиняная суспензия, а также солевые растворы NaCl на основе воды в различных концентрациях. Результаты экспериментального и численного исследования являются информационной базой для разработки и применения технологии, эффективного и быстрого охлаждения теплонагруженных поверхностей ограждающих конструкций энергетического оборудования (за счет создания вспомогательного теплообменного слоя между теплонагруженной поверхностью и наружной средой на основе суспензий и растворов с высокой теплоемкостью и теплопроводностью).

Заключение

Выполненные эксперименты позволили установить возможность резкого снижения температуры сильно нагретых ($T \approx 1000$ К) стальных шаров при охлаждении спреями различных хладагентов.

Показано, что при использовании в качестве хладагента суспензий глины и графита при охлаждении поверхностей металлических шаров отсутствует режим условного пленочного кипения (выраженный в «отскоке» распыленных капель от нагретой поверхности); происходит смачивание (режим пузырькового кипения) нагретой поверхности практически (1-2,5 с) с самого начала процесса охлаждения.

Показана целесообразность использования для экстренного аварийного охлаждения энергетического оборудования (в том числе используемого на электрических станциях) водных растворов солей и суспензий. Данная рекомендация является основной для технического или технологического характера для рассматриваемой области исследований.

С учётом данных обстоятельств можно утверждать наличие необходимости совершенствования технологического процесса аварийного охлаждения с помощью суспензий и растворов на основе воды становится все более очевидной. Новые технологии охлаждения в экстренных ситуациях позволяют существенно повысить эффективность теплоотвода от теплоэнергетического оборудования, что приводит не только к экономии ресурсов, но также и к снижению влияния вредных выбросов на окружающую среду. К таким хладагентам можно отнести графитовую и глиняную суспензии, а также солевые растворы NaCl на основе воды в различных концентрациях.

Приведены безразмерные параметры (числа Re и We), характерные процессу спрейнго охлаждения хладагентами (Водопроводная вода, деионизированная вода, деаэрированная вода, морская вода, солевой раствор NaCl, Глина 0,1, 0,5%, Графит 0,1 %).

В ходе выполнения исследовательской работы по изучению гидродинамических режимов взаимодействия одиночных капель хладагента с горизонтальной нагретой поверхностью был проведен ряд опытов и получены необходимые для дальнейшего анализа видео материалы; выполнены измерения площади поверхностей испарения, средних диаметров отделившихся фрагментов и их количество. Данные были использованы для построения зависимостей, показывающих влияние вида подложки, её температуры, а также природы жидкости на поведение одиночной капли на нагретой поверхности. Выявлены и охарактеризованы гидродинамические режимы взаимодействия одиночных капель хладагента с горизонтальной нагретой поверхностью. Найдены безразмерные критерии гидродинамического подобия Re и We для случаев взаимодействия одиночной капель хладагентов с нагретой поверхностью.

Список использованных источников

1. D. Ciloglu, A. Bolukbasi, The quenching behavior of aqueous nanofluids around rods with high temperature // Nucl. Eng. Des.– 2011. – V 241. – P. 2519–2527.
2. K.S. Liang, S.C. Chiang, Y.F. Hsu, H.J. Young, B.S. Pei, L.C. Wang, The ultimate emergency measures to secure a NPP under an accidental condition with no designed power or water supply // Nucl. Eng. Des. – 2012. – V 253. – P. 259–268.
3. H. Jouhara, B.P. Axcell, Film boiling heat transfer and vapour film collapse on spheres, cylinders and plane surfaces // Nucl. Eng. Des. – 2009. – V 239. – P. 1885–1900.
4. W. Chaze, O. Caballina, G. Castanet, J.F. Pierson, F. Lemoine, D. Maillet, Heat flux reconstruction by inversion of experimental infrared temperature measurements – Application to the impact of a droplet in the film boiling regime // Int. J. Heat Mass Transf. – 2019. – V 128. – P. 469–478
5. A. Panda, A.R. Pati, S. Pradhan, B. Saha, A. Kumar, S.S. Mohapatra, High mass flux air atomized spray with subcooled water: A novel methodology to enhance the heat transfer rate in film boiling regime // Int. J. Heat Mass Transf. – 2018. – V 120. – P. 1287–1304
6. C. Peng, X. Xu, X. Liang, Experimental study on temperature variation patterns and deterioration of spray cooling with R21 // Int. J. Heat Mass Transf. – 2018. – V 121. – P. 1159–1167.
7. A.R. Pati, Lily, A.P. Behera, B. Munshi, S.S. Mohapatra, Enhancement of heat removal rate of high mass flux spray cooling by sea water // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2017. – V 89. – P. 19-40.
8. N.H. Bhatt, A.R. Pati, A. Kumar, A. Behera, B. Munshi, S.S. Mohapatra, High mass flux spray cooling with additives of low specific heat and surface tension: A novel process to enhance the heat removal rate // Appl. Therm. Eng. – 2017. – V 120. – P. 537–548.

9. Y. Wang, Y. Jiang, W. Chen, B. Zhou, Heat transfer characteristics of spray cooling beyond critical heat flux under severe heat dissipation condition // *Appl. Therm. Eng.* – 2017. – V 123. – P. 1356–1364
10. X.W. Wang, J.Y. Ho, K.C. Leong, An experimental investigation of single droplet impact cooling on hot enhanced surfaces fabricated by selective laser melting // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2018. – V 120. – P. 652–670.
11. E. Martínez-Galván, J.C. Ramos, R. Antón, R. Khodabandeh, Influence of surface roughness on a spray cooling system with R134a. Part II: Film thickness measurements // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013. – V 48 – P. 73–80.
12. A.S.Moita, A.L.N Moreire, Drop impacts onto cold and heated rigid surfaces: morphological comparisons, disintegration limits and secondary atomization // *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2007. – V 28 – P. 735-752.
13. G.Liang, X. Mu, Y. Guo, S. Shen, S.Quan, J. Zhang, Contact vaporization of an impacting drop on heated surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2016. – V 74 – P. 73-80.
14. G.E. Cossali, M. Marengo, M.Santini, Thermally induced secondary drop atomisation by single drop Impact onto heated surfaces // *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 2008. – V 29 – P. 167-177.
15. T.L.Cox, S.C. Yao, Heat transfer of sprays of large water drops impacting on a high temperature surfaces // *Journal of heat transfer.* 1999. – V 121 – P. 446-450.
16. S.Chen, V. Bertola, The impact of impact of viscoplastic drops on a heated surface in the leidenfrost regime // *Soft matter.* 2016. – V 12 – P. 7624-7631.
17. V.Bertola, Effect of polymer concentration on the dynamics of dilute polymer solution drops impacting on heated surfaces in the leidenfrost regime // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2014. – V 52 – P. 259-269.
18. J.D. Bernardin, C.J. Stebbins, I. Mudawar, Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface // *International journal of heat and mass transfer.* 1997. – V 40 – P. 247-267.

19. S.L.Manzello, J.C.Yang, An experimental study of high weber number impact of methoxy-nonafluorobutane $C_4F_9OCH_3$ (HFE-7100) and n-heptane droplets on a heated solid surface // International journal of heat and mass transfer. 2002. – V 45 – P. 3961-3971.
20. M.Pasandideh-fard, S.Chandra, Mostaghimi J., A three-dimensional model of droplet impact and solidification // International journal of heat and mass transfer. 2002. – V 45 – P. 2229-2242.
21. M.Bussmann, J.Mostaghimi, S.Chandra, On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact // International journal of heat and mass transfer. 1999. – V 11 – P. 1406-1417.
22. S.F. Lunkad, V.V. Buwa, K.D.P. Nigam, Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces // Chemical engineering science. 2007. – V 62 – P. 7214-7224.
23. S. Sikalo, C.Tropea, E.N. Ganic, Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces // Dynamic wetting angle of a spreading droplet. 2005. – V 29 – P. 795-802.
24. S. Sikalo, C.Tropea, E.N. Ganic, Impact of droplets onto inclined surfaces // Journal of Colloid and Interface Science. 2005. – V 286 – P. 661-669.
25. K. Batisheva, E. Orlova, D.Feoktistov, Effect of surface temperature on spreading rate of liquid droplet // matec web of conferences. 2015. – V 37 – P. 651-667.
26. J.Breitenbach, J.Kissing, I.V.Roisman, C.Tropea, Characterization of secondary droplets during thermal atomization regime // Exp Therm Fluid Sci. 2018. – V 98 – P. 516–522.
27. I.V.Roisman, J.Breitenbach, C.Tropea, Thermal atomisation of a liquid drop after impact onto a hot substrate // J Fluid Mech. 2018. – V42 – P. 87–101.
28. I.V.Roisman, H.M.Kittel, C.Tropea, Splash of a drop impacting onto a solid substrate wetted by a thin film of another liquid // Phys Rev Fluids. 2018. – V7 – P. 58-69.