

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

---

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Смачивание и растекание в условиях свободного падения капель растворов солей на нагретую поверхность</b>

УДК 621.1.016.4:532.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5Б2Б</b>	<b>Шарифулин Тахир Маликович</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Феоктистов Д.В.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г.В.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2016 г.

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
Р1	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.
Р2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
Р3	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.
Р4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
Р5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р6	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.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р7	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.
Р8	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.
Р9	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»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
Кузнецов Г.В.  
(Подпись) (Дата)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
5Б2Б	Шарифулин Тахир Маликович

Тема работы:

**Смачивание и растекание в условиях свободного падения капель  
растворов солей на нагретую поверхность**

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

№2540/с от 01.04.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10.06.2016

#### 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 – теория тепломассообмена в газожидкостных системах.

Предмет исследования – механизм процесса взаимодействия импактной струи с нагретой поверхностью в условиях свободного падения.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Разработка методики экспериментальных исследований проведения экспериментов;  Проведение серии экспериментов с варьированием следующих факторов: мощность нагрева (температура подложки), вид поверхности нагрева и состав капли;  Анализ полученных результатов. Установление зависимости массовой скорости испарения капли от температуры поверхности нагрева для различных веществ капли;  Установление зависимости скорости растекания, в условиях свободного падения капли на разогретую поверхность при различных температурах, веществ капли и вида поверхности нагрева.</p>
--	--

<b>Перечень графического материала</b>		
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>		
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН	
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	26.02.2016
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Феоктистов Д.В.	к.т.н.		26.02.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Шарифулин Тахир Маликович		26.02.2016

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

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Б2Б	Шарифулин Тахир Маликович

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Теоретической и промышленной теплотехники</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление</b>	13.03.01

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость ресурсов принять согласно рыночной цене.
<i>2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Принять к расчету стандартную систему налогообложения. Ставки налогов и отчислений принять в соответствии с действующим законодательством.

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

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Определение потенциала исследования.
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Определение затрат на проведение исследования, планирование затрат времени и ресурсов, планирование бюджета проекта.
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определение возможных отраслей применения результатов исследования.

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

--

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

--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Попова С.Н.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5Б2Б	Шарифулин Т.М.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 130 с., 52 рис., 25 табл., 42 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: кипение, испарение, капля, нагретая поверхность, площадь смачивания, высота падения, шероховатость.

Объектом исследования является теория смачивания и растекания.

Цель работы – на основе экспериментальных исследований определить тепловые процессы при соударении капли с нагретой поверхностью в условиях свободного падения, а также выявить особенности процесса растекания капли на подложке.

В результате исследования создана установка для экспериментальных исследований процессов, происходящих при свободном падении капли на нагретую поверхность и дальнейшем испарение жидкости на ней. Проведен анализ влияния температуры подложки на скорость растекания капли по поверхности, массовую скорость испарения и диапазоны эволюции капли.

Область применения полученных экспериментальных данных возможна в таких областях науки и техники, как двигателестроение, пожаротушение, охлаждение при термической обработке различных деталей в металлургии и в других сферах, где требуется эффективный отвод тепла.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word<sup>XP</sup> 2010, диаграммы построены в книге Microsoft Excel<sup>XP</sup> 2010, рисунки выполнены с помощью программы КОМПАС, редактор формул Math Type 6.0.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1. Исследование поведения капли при ударе о нагретую поверхность	10
Вывод по первой главе	28
ГЛАВА 2. Экспериментальные исследования процесса соударения капли о перегретую поверхность в условиях свободного падения	29
2.1 Планирование экспериментальных исследований	29
2.1.1 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента	29
2.1.2 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований	31
2.1.3 Выбор области изменения основных факторов	
2.2 Описание экспериментальной установки	32
2.2.1 Устройство и принцип действия установки	33
2.2.2 Способы и средства регистрации, методы и точность измерения основных параметров.	38
2.2.3 Методика проведения исследования	41
Выводы по второй главе	44
ГЛАВА 3. Анализ результатов экспериментальных исследований	45
3.1 Влияние температуры поверхности подложки на скорость растекания капли	45
3.2 Динамика изменения массовой скорости испарения капли в зависимости от температуры поверхности подложки.	55
3.3 Определение температурных диапазонов эволюции капли в зависимости от температуры поверхности подложки.	57
3.4 Оценка погрешности эксперимента	80

ГЛАВА 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	83
4.1 SWOT-анализ	83
4.2 Экспертная оценка	86
4.3 Календарный план	90
4.4 Смета. Бюджет проекта	94
4.5 Ресурсоэффективность	97
4.6 Экономическая эффективность	98
ГЛАВА 5. Социальная ответственность	101
5.1 Техногенная безопасность	101
5.2 Региональная безопасность	116
5.3 Организационные мероприятия обеспечения безопасности	118
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	126

## ВВЕДЕНИЕ

Научный и практический интерес к поведению жидкостей на нагретых поверхностях в сфероидальном состоянии можно объяснить тем, что охлаждение кипящей жидкостью широко применяется в технике. К примеру, в металлургии при резании и термической обработке используют охлаждающие жидкости, эффективность действия которых определяется теплом, отводимым в единицу времени. Развитие микроэлектроники связано с проблемой эффективного отвода тепла.

Капля жидкости на поверхности нагретого металла принимает форму сфероида. Для невысокой температуры поверхности нагрева капля растекается. При росте температуры сфероид полностью отделяется от поверхности нагрева паровой оболочкой и с металлом уже не соприкасается. Это явление впервые описано немецким физиком Иоганном Лейденфростом [1].

Сфероидальное состояние наступает при температуре  $T_L$  (температуре Лейденфроста), близкой к температуре предельного перегрева жидкости  $T_{sh}$  при данном давлении.

Температуре Лейденфроста соответствует максимум на зависимости времени полного испарения капли жидкости, нанесенной на горячую плиту, от температуры поверхности.

Сфероидальное состояние жидкости связано с обеспечением безопасности тепловыделяющих поверхностей. Одной из основных задач в металлургической промышленности является предотвращение пережога поверхности нагрева при кипении жидкости в случае высоких тепловых нагрузок. Из вероятных причин этого опасного явления можно выделить сфероидальное состояние жидкости, состоящее в том, что жидкость неспособна смачивать и охлаждать поверхность нагрева, из-за того что температура последней выше температуры Лейденфроста.

**Цель работы:** на основе экспериментальных исследований определить тепловые процессы при соударении капли с нагретой поверхностью в условиях свободного падения, а также выявить особенности процесса растекания капли на подложке.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Выполнить обзор литературных источников по данной тематике, выделить существующие проблемы в процессах исследования капли, ударяющейся о перегретую поверхность в условиях свободного падения.

2. Разработать методику экспериментальных исследований по изучению физики процесса взаимодействия импактной струи с перегретой поверхностью.

3. Создать экспериментальную установку для изучения и визуализации процесса взаимодействия импактной струи с перегретой поверхностью в условиях свободного падения.

4. Провести серию экспериментальных исследований на установке по изучению процесса осаждения капли на перегретую поверхность.

5. Выполнить анализ экспериментальных данных:

a. Установить зависимость массовой скорости испарения капли от температуры поверхности нагрева для различных составов жидкости.

b. Установить механизм растекания капли на разогретой поверхности.

c. Определить максимальную площадь смачивания подложки в зависимости от температуры поверхности нагрева и состава капли.

d. Определить скорость растекания капли по гладкой и структурированной поверхности в зависимости от температуры подложки и вещества жидкости.

**Объектом исследования** является теория тепломассобмена в газожидкостных системах.

**Предметом исследования** является механизм и тепломассообмен процесса взаимодействия импактной струи с нагретой поверхностью в условиях свободного падения.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КАПЛИ ПРИ УДАРЕ О НАГРЕТУЮ ПОВЕРХНОСТЬ»

Проведены исследования [2] процессов испарения и кипения с целью выявления в них аналогий. Установлены диапазоны испарения капли в зависимости от температуры поверхности, при исследовании фазового перехода капли массой 51 мг:

- $26 \div 108^{\circ}\text{C}$  – капля жидкости, попадая на поверхность, растекается и ее массовая скорость испарения лежит в пределах  $1 \div 5 \text{ мг/с}$ ;
- $109 \div 141^{\circ}\text{C}$  – растекание жидкости по плите и пузырьковое кипение воды с максимальной массовой скоростью испарения  $72,9 \text{ мг/с}$  при температуре подложки  $126^{\circ}\text{C}$ ;
- $142 \div 270^{\circ}\text{C}$  – начало сфероидального состояния жидкости; капля воды собирается в сферу и периодически соприкасается с подложкой;
- $>270^{\circ}\text{C}$  – устанавливается сфероидальное состояние жидкости, при котором капля не контактирует с поверхностью нагрева (температура Лейденфроста).

Проведены [3] анализ и обработка экспериментальных данных, получены уравнения в числах подобия для прогнозирования времени испарения кипящей капли на поверхности нагрева. Построены графические зависимости времени испарения капель от температурного напора, различной высоты падения капли на металлических поверхностях.

Экспериментально [4] исследовался процесс теплообмена при высокотемпературном, нестационарном испарении и десорбции капель в широком диапазоне размеров капель, температур стенки и концентрации компонентов в водных растворах. Получены зависимости полного времени испарения капель водных растворов от температуры стенки, а также изменение массы капли раствора различной концентрации от времени.

Проведены [5] экспериментальные и теоретические исследования процесса соударения капли жидкости с высокотемпературной стенкой.

Разработана математическая модель взаимодействия капли с поверхностью, которая позволяет определять оптимальные параметры капель при использовании двухфазных струй, для охлаждения различных поверхностей. Проведены расчеты деформации капли, позволившие выявить изменение по времени характерных размеров капли в зависимости от температуры капли, ее размера и скорости, а также от температуры поверхности. Получены экспериментальные данные процесса теплообмена между каплей и нагретой поверхностью, в частности влияние температуры капли на интенсивность теплообмена. Установлены закономерности деформации и теплообмена капли с нагретой поверхностью в зависимости от геометрических размеров капли. Полученные результаты могут использоваться для тестирования математических моделей, решения прикладных задач в области техники двигателестроения, металлургия, пожаротушения.

Проведены [6] экспериментальные исследования с использованием высокоскоростной видеосъемки падающей с некоторой высоты капли и дальнейшей обработки на компьютере наблюдаемого явления. Во время падения жидкая капля подвергается ряду трансформаций на поверхности нагрева, а эффективность процесса кипения определяет образующееся пятно контакта. Причем до определенной высоты, с которой падает капля, на поверхности нагрева не происходит разрыва целостности объема трансформирующейся капли. С увеличением высоты, с которой падает капля, пленка жидкости на поверхности нагрева разрывается. Визуальное наблюдение позволяет предположить, что суммарная площадь пятна контакта при падении капли с предельной высоты примерно равна площади поверхности «разорванной» пленки жидкости, при которой не происходит разрушения целостности объема капли. Знание этой высоты позволяет более полно выявить физическую картину поведения падающей на поверхность нагрева капли жидкости и процесса ее испарения. В работе приведено описание методики определения предельной высоты падения капли, при которой не происходит нарушение сплошности объема жидкости на

поверхности нагрева, а также сравнение экспериментальных и расчетных значений предельных высот падения. Получены результаты экспериментальных исследований процесса падения капель разных жидкостей с перегретой поверхностью.

Разработан [7] экспериментальный комплекс для исследования смачиваемости и измерения контактных углов на гладких, мезоскопических и наноструктурированных поверхностях, а также создан экспериментальный стенд для изучения процессов испарения и кипения капель различных жидкостей. Исследованы режимы испарения и кипения ограниченных объемов жидкостей с различными теплофизическими параметрами (вода, этиловый спирт и изооктан). Получены температуры Лейденфроста различных жидкостей для разных поверхностей нагрева. Исследовался процесс тепломассообмена на мезоструктурных поверхностях. Установлено, что на них проявляется нарушение эффекта Лейденфроста из-за специфического механизма отвода пара через мезоструктуру. Измерены температуры Лейденфроста для рабочих жидкостей и исследованных поверхностей нагрева. Изучены особенности поведения капель на перегретых выше температуры кипения поверхностях нанопористого оксида алюминия и показано, что на них наблюдаются неустойчивости и срыв режима Лейденфроста в режим взрывного вскипания. Изучена смачиваемость поверхности различных морфологических структур из различных материалов, включая температурные зависимости контактных углов.

В работе [8] механизм поведения капли на горизонтальной поверхности изучен с помощью скоростной съемки. Выяснено, что капля в начальный момент контакта с поверхностью начинает «расплющиваться», достигая своего максимального размера, после чего начинает сужаться до равновесного состояния. Получена следующая модель поведения капли. Первоначальная форма капли сферическая. Капля равномерно расплющивается по всем сторонам, сохраняя при этом весь свой объем. В

процессе деформации капля принимает форму эллипсоида, при этом большая горизонтальная ось эллипсоида непрерывно увеличивается, а маленькая вертикальная уменьшается. Дифференциальное уравнение поведения капли на твердой горизонтальной поверхности имеет вид [8]:

$$f_1(x)d^2x/dt^2 - f_2(x)(dx/dt)^2 + f_3(x)dx/dt + f_4(x) = 0,$$

где  $t$  – время;

$f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$  – функциональные коэффициенты уравнения, определенные математическими зависимостями.

Экспериментально [9] рассматривалось поведение капли при ударе о нагретую поверхность. Опытная поверхность, представляющая собой хромированный медный диск диаметром 30мм и толщиной 5мм, помещалась на торец медного стержня с намотанной на него спиралью для нагрева. Капельки воды (диаметром 2,9мм) с конца иглы шприца свободно падали на нагретую поверхность с периодичностью одна капля в минуту. Выявлены зависимости стационарной температуры для горизонтальной и наклонной поверхности от мощности нагревателя при охлаждении каплями и без охлаждения. По этим зависимостям определено количество тепла, отводимое одной каплей при соударении с поверхностью при изменении температуры.

Рассматривалось [10] взаимодействия капли жидкости с нагретой поверхностью с точки зрения теплофизики процесса, получено, что капля проходит следующие стадии: вначале она деформируется при контакте с нагретой поверхностью, затем начинает нагреваться и наступает момент образования паровой прослойки, когда капля удалена от поверхности и теплообмен осуществляется через паровую прослойку.

Количество теплоты определяется по следующей формуле [10]:

$$q = kr\gamma\delta,$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды,

$\delta$  – толщина образовавшегося сфероида.

Сформулирован [11] вывод аналитического решения уравнения Лапласа для капли-полусфероида, которая испаряется на

высокотемпературной поверхности. Было установлено, что распределение температуры по поверхности и средняя температура поверхности капли не зависят от радиуса основания полусфероида и остаются постоянными в течение всего процесса испарения. Значение средней температуры позволяет оценить диффузионный тепловой поток с поверхности и уточнить время испарения капли с использованием полученного ранее критериального уравнения.

Получена [12] математическая модель процесса растекания капли жидкости по подложке, с учетом потенциальной энергии падающей капли, поверхностного натяжения и связи молекул жидкости и твердого тела. Установлены зависимости максимального радиуса и минимального времени растекания. Контроль этих параметров позволяет оптимизировать технологический процесс очистки поверхности подложек.

Исследовались [13] механизмы процессов теплового взаимодействия отдельных капель, осаждающихся на обогреваемую поверхность. Эксперимент был проведен на массивном стальном образце, оборудованном малоинерционной микротермопарой с постоянной времени  $10^{-6}$  с. Образец нагревался до температур  $T_w = 180 - 400^\circ\text{C}$ , при помощи генератора формировались капли размерами  $d=0,3$  мм и  $d=3,2$  мм с начальными температурами  $25^\circ\text{C}$  и  $100^\circ\text{C}$ . Капли направлялись на образец в точку основания термопары под углами  $45^\circ$  и  $90^\circ$  с различными скоростями  $W = 0.5 \div 35$  м/с. Изменения температур, обусловленные локальным охлаждением образца, регистрировались осциллографом. При обработки осциллограмм выделялись характерные параметры  $T_w$ ,  $\Delta T$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  (рис.1 [13]), по которым определены критерии подобия в многопараметрической системе  $[f(T_0, T_w, W, d, \alpha, \tau_1, \tau_2, \Delta T) = 0]$ , где  $\alpha$  – угол падения капли,  $\tau_1$  – длительность фронта падения температуры,  $\tau_2$  – длительность теплового контакта капли с нагретой поверхностью.

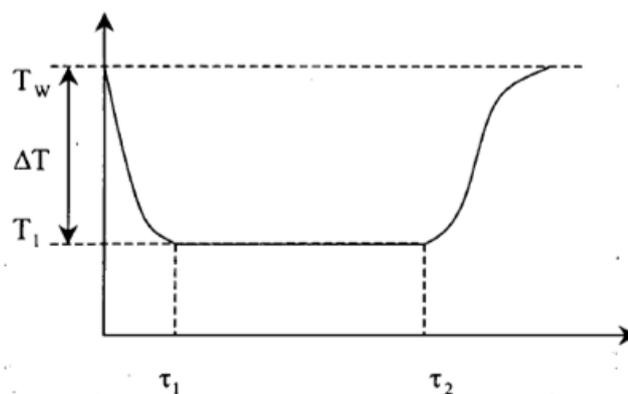


Рисунок 1 – Изменения температуры, обусловленные локальным охлаждением образца.

По результатам анализа установлено, что процессы испарения малых капель идут более интенсивно, с тепловыми потоками на порядок выше, чем у больших. В результате экспериментального исследования определены параметры –  $T_w$ ,  $\Delta T$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , характеризующие динамические процессы испарения, которые различны у крупных и мелких капель:

- наибольшее падение температуры поверхности образца  $\Delta T$  растёт линейно с увеличением  $T_w$  для крупных капель, а для мелких – величина  $T_w$  незначительно влияет на  $\Delta T$ ;
- длительность фронта падения температуры поверхности и теплового контакта мелких капель на порядок меньше, чем у крупных;
- закономерности изменения величины минимальной температуры поверхности в зоне контакта для крупных и мелких капель различны.

Разработана [14] физическая модель процесса капельного кипения и сформулирована математическая модель в критериальном виде, которая описывает зависимость коэффициента теплоотдачи от физических параметров капли: начального диаметра капли, высоты падения капли, теплового напора и теплофизических свойств жидкости. Исследованы физические механизмы поведения кипящей капли жидкости на поверхности нагрева. Установлена динамика изменения формы капли жидкости при ее падении на поверхность: когда капля соприкасается с поверхностью, она

«расплющивается» и становится похожей по форме на тороиду, со сплошной пленкой внутри тороида жидкости. Далее она под действием силы поверхностного натяжения трансформируется и приобретает вид приплюснутой полусферы с определенным диаметром пятна контакта с поверхностью нагрева. Затем происходит процесс испарения с поверхности, и кипения в объеме капли. Интенсивность данных процессов зависит от температуры подложки. Отметим, что при этом площадь пятна контакта капли остается постоянной. На поверхности остается влажное пятно после испарения жидкости, которое высыхает постепенно.

Исследованы [15] процессы, происходящие при падении капли воды диаметром 1 мм с высоты 2 см на гидрофильную поверхность. Опыты проводились с использованием видеосистемы, позволяющей получать до 100 тысяч кадров в секунду. С помощью скоростной видеосъемки установлены этапы столкновения капли с поверхностью. Зарегистрировано, что упавшая капля растикается, но вследствие несмачиваемости она снова объединяется и отталкивается от гидрофобной поверхности. Воздействие нижней части капли на поверхность создаёт капиллярные волны, которые проходят по всей капле и фокусируются в ее верхней части, где они вызывают колебания воды сверху-вниз. Жидкости при движении вниз каплю насквозь пробивает впадина. В ходе исследований выявлено, что воздушный канал капли деформируется, после чего быстро схлопывается. Зарегистрирована форма капли с воздушным каналом и без него. Определено, что начальная скорость капли влияет на форму воздушного канала до момента схлопывания. При малых скоростях воздушный канал цилиндрический, при больших – происходит его разрушение, сопровождающееся микроскопической струйкой, бьющей вверх.

Исследованы [16] динамические характеристики капли воды, такие как диаметр смачивания, высота, угол контакта, скорость растекания и форма, при ее свободном падении на подложку с высоты 13,6 мм. Твердая поверхность была изготовлена из пяти материалов – парафин, тефлон,

стекло, кварц, очищенное стекло. С помощью видеосъёмки получены профили каплей воды сбоку и сверху под углом  $45^\circ$  и  $58^\circ$  в процессе ее растекания. Изображения каплей использованы для изучения механизма растекания на подложке, в частности определен диаметр смачивания, высота, угла контакта, скорость перемещения контактной границы капли. Сравнение полученных профилей каплей позволило уточнить движение двух связанных, но независимых компонентов, центральной области и ободом падающей капли.

Для моделирования воздействия каплей на нагретую плоскую твердую поверхность, с учетом поверхностного натяжения и сил адгезии, использован [17] вычислительный комплекс динамики жидкости (VOF). Эффективность модели доказана путем сравнения результатов с экспериментальными данными. Установлено, что на процесс испарения оказывает влияние температура капли, при ее достижении точки насыщения скорость испарения повышается.

Исследована [18] падающая струя с разной вихревой скоростью. Использована PIV методика, алгоритмы которой реализуются для экспериментального изучения локальной структуры турбулентных закрученных падающих струй. Во время измерений число Рейнольдса составило  $Re=8900$ , расстояние от сопла до пластины было равно трем диаметрам сопла, и скорость вихря варьировалась от 0 до 10 мм/с. Для изученных потоков измерены пространственные распределения средней скорости и статистических моментов турбулентных пульсаций. Проанализировано влияние PIV конечного пространственного разрешения на измеренную скорость диссипации и проведено сравнение с аналогичными теоретическими исследованиями. Для этого, проведена специальная серия измерений 2D PIV с вектор расстояния. Получены параметры осевого среднего импульса и кинетического уравнения энергии для поперечного сечения, расположенного от одного диаметра сопла до пластины (на которую падает струя). Установлено, что величина диффузии давления снизилась с

ростом вихревой скорости. Скорость распространения закрученной падающей струи больше, по сравнению с незакрученной струей.

Разработана [19] методика моделирования процессов, происходящих при соударении капель воды с твердой поверхностью. Благодаря ней была повышена точность регистрации растекания капли в момент ее контакта с твердой поверхностью, что позволило проводить исследование процессов волны сжатия по капле. Разработанная система синхронизации позволила регистрировать ранние фазы разрушения сферической капли воды при соударении с твердой поверхностью. Получены теневые фотографии, интерферограммы и снимки в отраженном свете процесса растекания капли. Проведена оценка продолжительности характерных стадий разрушения капли и параметров генерируемого течения. Сформулирована математическая модель, описывающая плоские и осесимметричные течения жидкости со свободной поверхностью и кавитацией. Разработан и реализован численный алгоритм, включающий применение TVD - схемы для метода конечных элементов. Разработан алгоритм построения неструктурированной адаптивной сетки. Проведено численное моделирование удара капли о плоскую, выпуклую и вогнутую поверхности, а также падения капли в конический кратер и на слой жидкости. Также проведено сравнение результатов моделирования удара цилиндрической капли боковой поверхностью по плоской поверхности с результатами экспериментального исследования. Проанализировано явление взаимодействия ударной волны со свободной поверхностью капли, наблюдаемое в экспериментах. Получена детальная информация о параметрах течения внутри капли. В итоге предложен ряд процедур с целью оптимизации численного алгоритма, позволяющих более точно разрешить эффекты, связанные с нелинейностью уравнения состояния, сформулирована упрощенная полуаналитическая модель распространения ударной волны в капле на стадии формирования. В ходе анализа процесса возникновения и развития кавитационного пузыря в капле воды при ударе рассмотрены три модели кавитации. Проведена оценка

характерного времени развития неустойчивостей, выявлен механизм разрушения струи.

Проведены [20] экспериментальные и теоретические исследования зависимости морфологии твердой фазы от температуры подложки, на которую наносится капля коллоидного раствора. Описаны основные процессы, определяющие самосборку микро- или наночастиц и морфологию твердой фазы, предложены количественные критерии оценки роли каждого из процессов. Показано, что морфологией коллоидных частиц, осажденных на подложку из испаряющейся капли коллоидного раствора, можно управлять, изменяя температуру подложки относительно температуры наносимого раствора и окружающей среды. Обсуждаются основные движущие силы самосборки при наличии градиента температуры внутри капли.

Создана [21] численная модель физики поведения капли из жидкости небольшого диаметра после ее подения на твердую поверхность, когда влияние вязких сил можно пренебречь. В модели учтено влияние адгезионного взаимодействия жидкости с подложкой. Установлено, что в зависимости от значений числа Вебера и равновесного краевого угла возможны три режима движения капли: прилипание без отката, прилипание после отката и отрыв в конце отката. Основной частью исследований данной работы является, определение области существования этих режимов.

Исследовалось [22] влияния геометрических и физических свойств стенки на кризис кипения капель. Проведены исследования в широком диапазоне размеров капель и температур стенки ( $30\div 300^\circ\text{C}$ ) с применением весовых высокоточных измерений, а также высокоскоростной тепловизионной и фотографической визуализации. Измерительные методики позволили определить не только полное время испарения капель воды, но и их текущие значения массы в процессе испарения. Влияние на испарение толщины стенки и шероховатости поверхности твердого тела на сегодняшний день исследовано только для объемов жидкостей от 0,3 мл. В

данной работе проведено исследование капель малых размеров (0,001 до 0,1 мл). Численные и физические эксперименты проведены на ограниченных тонких подложках. Выявлено, что при небольших перегревах стенки влияние температуропроводности стенки незначительно, так как при этих условиях скорость испарения воды низкая и охлаждение межфазной поверхности будет незначительным. С увеличением перегрева роль физических свойств материала возрастает, увеличивается влияние температуропроводности на критическую температуру. Методика измерения текущей массы капли позволила выделить пять этапов развитого кипения капли на нагреваемой поверхности. На каждом из данных этапов изменяются граничные условия, которые необходимо учитывать при построении модели испарения.

Проведен [23] численный анализ гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в пульсирующих импактных струях. Полученные результаты показали, что изменение угла наклона струи приводит к смещению положения критической точки, а также перераспределению давлений, скоростей и коэффициентов теплоотдачи. С уменьшением угла наклона струи значение числа Нуссельта в критической точке возрастает при неизменном числе Рейнольдса. Увеличение амплитуды пульсаций ведет к уменьшению области влияния препятствия на характеристики струи и вызывает уменьшение максимальных значений скорости в области пристенной плоской струи. Импактные струи используются в промышленных теплообменных процессах при охлаждении газотурбинных лопастей и электрооборудования, сушке бумаги, текстиля, отжига металлов. Эффективность которых напрямую зависит от интенсивности теплообмена.

Усовершенствован [24] метод экспресс-контроля степени чистоты поверхности подложек, предназначенных для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов. Был создан и запатентован способ контроля нанощероховатости и степени чистоты поверхности по динамическому состоянию капли жидкости. Приведены результаты

экспериментов по оценке поведения капли жидкости, полученные с помощью высокоскоростной видеокамеры. Разработанное устройство применяется для оперативной коррекции технологического процесса финишной очистки диэлектрических подложек.

Показаны [25] зависимости для расчета профиля капли жидкости, лежащей на твердой горизонтальной подложке для случаев смачивания и не смачивания поверхности подложки. Получены формулы для расчета объема и площади наружной поверхности капли. Приведены рассчитанные и экспериментальные профили для капель воды, лежащих на фторопластовом диске. Показана необходимость учета точного профиля капли для расчета процессов тепломассопереноса. Приведены результаты исследований внутренней циркуляции в каплях и высказаны соображения о влиянии на процесс сушки течений внутри капли, внешнего тепломассопереноса и теплообмена с подложкой.

Изучен [26] нестационарный процесс испарения и конденсации неподвижной сферической капли. В условиях, когда температура ее поверхности и концентрация насыщенных паров являются переменными величинами. Учитывались скачки концентрации и температуры на слое Кнудсена. Получено выражение скорости изменения радиуса капли, из которого с использованием асимптотических разложений функций выделены первые приближения, отдельно для значений времени, близких к нулю, и отдельно для больших его значений. Проведен анализ полученных формул и их связи с известными из предшествующих теорий формулами, для чего найдены численные значения скорости испарения капель воды в воздухе в широком диапазоне начальных условий.

Разработан и запатентован [27] способ контроля степени чистоты (наношероховатости) поверхности подложек, предназначенных для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов. Устройство применяется для оперативной коррекции технологического процесса финишной очистки диэлектрических подложек.

Показаны [28] результаты экспериментального и численного исследования процесса взаимодействия импактной струи с криволинейной и плоской поверхностью преграды. Установлено подобие распределения коэффициента давления на поверхности преграды различной формы при изменении геометрических характеристик (диаметр профилированного сопла, расстояние от среза сопла до преграды) и режимных параметров. Расчетные данные по коэффициенту давления качественно и количественно согласуются с результатами экспериментов.

Сформулирована [29] модель динамики и теплообмена импактной цилиндрической струи идеальной жидкости, основанная на аппроксимациях скоростей, удовлетворяющих уравнению неразрывности и интегральному уравнению импульсов. Решение было получено используя метод Сквайра. Установлено, что при удалении преграды на расстояние, большее некоторого критического, струя выходит из насадки ресивера прямолинейно и остается таковой до тех пор, пока расстояние до преграды не станет равным критическому, после чего она начинает растекаться. С уменьшением расстояния до преграды, если оно меньше критического, число Нуссельта в точке торможения растет.

Выполнено [30] численное исследование структуры течения и теплообмена импактной туманообразной струи с малой массовой концентрацией капель (не более 1 %), натекающей на плоскую поверхность, перпендикулярно к ней. Математическая модель основана на решении системы уравнений Навье - Стокса, осредненных по Рейнольдсу, для течения двухфазного потока с использованием кинетического уравнения функции плотности распределения вероятности координат, скорости и температуры частиц. Установлено, что добавление капель вызывает значительное увеличение интенсивности теплообмена по сравнению с однофазной воздушной импактной струей в области, непосредственно примыкающей к точке торможения струи.

Представлена [31] методика проведения экспериментов по охлаждению нагретой поверхности до 500 °С, падающими каплями диаметром 0,3 и 3,2 мм, различной температуры. Для регистрации температур использовались термодатчики с откликом возврата сигнала  $10^{-7}$  с, по пространству 0,11 мм. Прямыми измерениями установлено уменьшение температуры поверхности, при ее охлаждении каплями жидкости, величина теплового потока от нагретой стенки к жидкости. Установлено, что существует процесс конвективного теплопереноса в слое жидкости, примыкающей к паровой прослойке.

Исследовалось [32] испарение покоящейся капли воды на нагретой поверхности. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование испарения покоящейся капли воды, с разницей температур между твердой подложкой и атмосферой 40<sup>0</sup> С. Использовались подложки с различной смачиваемостью. Установлены три режима испарения капель: пиннинг, частичный пиннинг и депиннинг. Определено, что на заключительном этапе удельная скорость испарения резко возрастала, особенно для небольших капель. Теплообмен капли жидкости в газовой фазе сильно влияет на распределение температуры поверхности капли. Вблизи периферии линии соприкосновения температура наиболее высокая, что приводит к интенсификации испарения потока массы в данной области. Сделан вывод, что скорость испарения пропорциональна радиусу контакта, а площадь капли пропорциональна квадрату радиуса контакта капли. Таким образом, удельная скорость испарения (скорость испарения на единицу площади капли) является функцией  $1/\text{радиус}$  контакта капли.

С помощью высокоскоростной видеосъемки исследовано [33] испарение капли разбавленного раствора полимера (с равновесным диаметром капли ~ 3 мм), на горячей поверхности в режиме Лейденфроста, в диапазоне чисел Вебера между 10 и 200. В качестве полимеров использовались растворы полиэтилен оксида (ПЭО) в деионизированной воде. Результаты подтвердили, что при низких концентрациях полимерные добавки уменьшают максимальный диаметр растекания, а также повышают

высоту подпрыгивания капель после их падения на подложку. Установлено, что максимальный контактный диаметр полимерных растворов в сравнении с дистиллированной водой меньше при аналогичных условиях растекания. Полимерная добавка, существенного влияния на частоту свободных колебаний капли не оказывает. Следовательно, для их прогнозирования можно использовать теоретические положения о Ньютонских жидкостях.

Экспериментально изучены [34] тепловые свойства нагретой поверхности и капли, а также характеристик испарения капли. Используются цилиндрические блоки, изготовленные из нержавеющей стали, алюминия и латуни с различной степенью шероховатости поверхности. Поведение капли при соударении с горячей поверхностью наблюдалось с помощью высокоскоростной камеры. В результате представлены тепловые свойства горячей поверхности, число Вебера капель, скорость капель, размер капель. Эмпирические корреляции выведены для описания взаимодействий между гидродинамическими характеристиками индивидуальных капель, падающих на нагреваемую поверхность. Кроме того, сравнение результатов данной работы и результатов других исследователей показывает хорошее согласование, разница между ними в диапазоне от 5 % до 25% .

Показано [35] экспериментальное и численное исследование капли воды, падающей на нагретую поверхность. Измерения температуры в точке удара выполнены с использованием характеристической термопары. Численное моделирование проведено с использованием раствора конъюгата и модели VOF. Экспериментальное, численное и аналитическое исследование проведено с целью изучения процесса теплопередачи, который происходит после удара капли жидкости о нагреваемую поверхность. Разработана VOF модель с одним уровнем локального измельчения сетки. Найдено сопряженное решение, где уравнение энергии решено одновременно в твердой и жидкой фазе. Численное моделирование подтверждено экспериментально, с использованием характеристической термопары, которая разработана для измерения колебания температуры в

центре стенки. В диапазоне исследуемых температур, изучена динамика капель. Получена разница менее 2% между максимальным диаметром растекания достигнутого с помощью изотермической и нагретой поверхности. Установлено изменение температуры в точке удара капли с нагреваемой поверхностью. Изменение радиальной температуры сильно зависит от динамики капли. Самый высокий тепловой поток был достигнут при контакте капли с очень малой площадью “жидкость-твердое тело”. С другой стороны, так как капля растекается, тепловой поток уменьшается. Максимальный тепловой поток достигнут вблизи периферии капли, где холодная жидкость впервые взаимодействует с нагретой стенкой.

## **Выводы по первой главе**

Теоретические работы, ориентированные на изучение соударения капли жидкости с нагретой поверхностью, исследовались в широком диапазоне варьирования факторов. Таких как: объемы капель варьируются от 0,009мл до 0,097мл, высота падения – от 40мм до 200мм, температура поверхности нагрева – от 100°C до 270°C с интервалом 10-20°C.

Чтобы углубиться в понимание процессов, происходящих между соударяющимися каплями и твердыми поверхностями при наличии теплообмена, требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

В настоящей работе видеофиксация процессов падения и соударения капли с подложкой осуществлялась с высокой скоростью записи (5000кадров/с), что позволит детально проанализировать поведение капли во время ее полета и испарения на нагретой поверхности. Интервал варьирования температуры подложки составлял 20°C, что позволит установить температурные диапазоны механизма фазового перехода капли на подложке. Высота падения капли составляет 300 мм. Объем капель постоянен и равен 15мкл=0,015мл.

В связи с вышесказанным, можно сделать вывод, что задача, решаемая в настоящей работе, на основе экспериментальных исследований, является не новой, но позволяет в более полной мере отразить взаимосвязь большого числа значимых факторов, таких как температура подложки, высота падения, состав капли, состояние поверхности подложки.

## **2.1 Планирование экспериментальных исследований**

### **2.1.1 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента**

В работе выделены четыре входных фактора: температура подложки, шероховатость подложек, состав жидкости, высота падения. Для описания поведения капель жидкости при соударении с нагретой поверхностью обозначены выходные переменные эксперимента: площадь смачивания, скорость испарения, скорость растекания. Температура окружающей среды, скорость перемещения воздушных масс, тепловыделение от приборов и людей, находящихся в помещении в эксперименте не учитывались, так как предполагалось, что они не менялись во время проведения опытов.

В работе проведен активный эксперимент, позволяющий решить задачи исследования намного быстрее и эффективнее.

Последовательность проведения активного эксперимента:

1. Разработана схема проведения исследований;
2. Осуществлена реализация опыта по заранее составленному плану, т.е. осуществляется сам активный эксперимент;
3. Выполнена обработка результатов измерений.

При планировании активного эксперимента решались следующие задачи:

1. Рациональный выбор факторов, влияющих на объект исследования, и определение соответствующего числа проводимых опытов;
2. Подтверждение или опровержение гипотез о возможной реакции системы на изменяющиеся факторы со стороны;
3. Оптимизация процесса.

В процессе эксперимента изменялись следующие факторы: вещество капли, мощность нагрева подложки (температура), шероховатость поверхности нагрева. Для оценки влияния данных факторов на скорость

испарения и максимального диаметра капли проведен активный многофакторный эксперимент.

### **2.1.2 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований**

Получение аутентичных результатов при проведении экспериментальной работы, связано с рядом методологических концепций, внесенных в теорию и практику эксперимента математической статистикой и кибернетикой. Для сокращения объема измерений, использовалась концепция последовательного эксперимента. Согласно ей, эксперимент осуществлялся не сразу, а последовательными этапами путем варьирования факторов воздействия и анализом результатов после каждого этапа.

При выборе схемы исследований сравнивался план классического многофакторного эксперимента, представляющего собой последовательность однофакторных экспериментов, например изменение одного параметра при постоянстве остальных, и полный факторный план, который заключается в нахождении необходимого количества опытов по количеству числу факторов. В итоге выделен ряд важных особенностей.

В полном факторном эксперименте варьируются одновременно все факторы, такие как время, температура, высота сброса капли и объём капли, и это приводит к тому, что дисперсия, т.е. отклонение от среднего значения, в оценке коэффициентов оказывается, как правило, на порядок меньше ошибки опыта. Характер зависимостей между основными исследуемыми факторами, температурой поверхности, шероховатостью поверхности, веществом жидкости и высотой падения капли, не известен заранее и не установлен механизм влияния основным факторов, а значит, использование полного факторного плана может привести к ошибочным результатам. Следовательно, целесообразнее будет проведение в данной работе классического многофакторного эксперимента.

На основании анализа литературы и теории планирования эксперимента сделан вывод о целесообразности проведения

экспериментальных исследований по классическому многофакторному эксперименту с использованием инструментов полного факторного эксперимента на различных этапах работы.

### 2.1.3 Выбор области изменения основных факторов

По результатам предварительных серий эксперимента определены основные области варьируемых параметров (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Основные варьируемые параметры

Основные факторы	Значения факторов			
Температура поверхности	60, 80, 100, 120, 130°C			
Поверхности	Полированная алюминиевая подложка		Структурированная алюминиевая подложка	
Рабочая жидкость	Дистиллированная вода	Раствор NaCl 10%	Раствор CaCl 10%	Раствор LiCl 10%
Объем охлаждающей жидкости	0,015мл=15мкл			
Высота сбрасывания капли	300мм			

Варьирование температуры поверхности нагрева принято в соответствии с условиями работы нагревательного элемента, чтобы не предотвратить перегрев в нём.

Дистиллированная вода, растворы солей NaCl, CaCl и LiCl, выбраны в качестве рабочих тела в виду своих особенностей. Вода – наиболее дешевый и доступный теплоноситель. Растворы солей NaCl, CaCl и LiCl – жидкости, которые нетрудно воспроизвести в лаборатории, по свойствам схожи с дистиллированной водой и могут быть использованы на практике на производстве для охлаждения, являются не токсичными, при испарении не выделяют едких газов, после испарения оставляют осадок.

Шероховатость нанесена на подложку с помощью прибора МиниМаркер 2-С25. Это компактный прецизионный маркер на базе непрерывного волоконного лазера. МиниМаркер 2-С25 оснащается непрерывным волоконным лазером, который позволяет производить специальную обработку различных материалов, не нанося вреда целостности поверхности (ссылка на сайт <http://www.newlaser.ru/laser/lc/minimarker2-c25.php>).

## 2.2 Описание экспериментальной установки

### 2.2.1 Устройство и принцип действия установки

Для исследований падения капли на нагретую поверхность, разработан экспериментальный стенд. Принципиальная схема этого стенда представлена на рис. 2.1.

В экспериментальной установке используется оборудование теневой методики.

Установка помещена на стол поверх плиты выполненной из стали. Элементы установки прикреплены к стальной плите с помощью болтов, что обеспечивает неподвижность элементов установки.

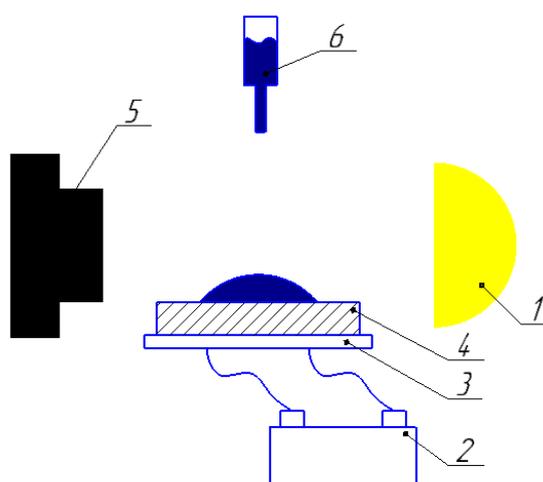


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки.

1 – источник плоскопараллельного света; 2 – блок питания электронагревателя; 3 – электронагревательный элемент; 4 – подложка; 5 – высокоскоростная камера; 6 – ленпипет (дозатор).

Основными элементами установки являются: источник света 1, рабочий участок 4, высокоскоростная камера 5. Элементы установки располагаются на определённом расстоянии между собой для наилучшей съёмки процесса падения капли.

Блок питания 2 подключён к нагревательному элементу 3 с помощью проводов. С помощью ленпипета 6 регулируется подача капли определенного объема. Поток света проходит через каплю (во время её полета и на подложке) и поступает на объектив высокоскоростной камеры 7.

Рабочий участок состоит из подложки 4. Непосредственно на электронагревательный элемент 3 помещена круглая пластина (подложка 4) из полированного и структурированного алюминия с диаметром 54 мм и толщиной 4 мм физико-химические свойства, которых представлены в таблице 2.1:

Таблица 2.1 – Физико-химические свойства подложки

	<p><b>Алюминий</b></p> <p>Плотность <math>2,7 \frac{г}{см^3}</math>,</p> <p>Коэффициент теплопроводности <math>203,5 \frac{Вт}{м \cdot К}</math>,</p> <p>Коэффициент температурного расширения <math>22,9 \frac{1}{°C}</math>,</p> <p>Удельная теплоемкость <math>880 \frac{Дж}{кг \cdot К}</math>,</p> <p>Твердость по Бринеллю 42 МПа,</p> <p>Модуль Юнга 70 ГПа.</p>
---	---

С помощью одноканального электронного дозатора Ленпипет (шприца-дозатора) (рис.2.2) капля определенного объема дозируется с высоты 1 м на нагретую подложку.



Рисунок 2.2 – Ленпипет.

Тепло-физические свойства используемых солей представлены в таблице 2.1:

Теплофизические свойства используемых солей таблице 2.1

	$\rho$ , кг/л	$c$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\nu \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
NaCl	1,07	3,697	0,593	11,47	1,06	1,48	7,2
CaCl	1,08	3,642	0,584	12,36	1,15	1,48	7,75
LiCl	1,05	655	0,496	11,82			

где  $\rho$  – плотность раствора, кг/л;

$c$  - удельная (массовая) теплоемкость, кДж/(кг·К);

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\mu$  - динамическая вязкость, Па·с;

$\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$\alpha$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

Pr - число Прандтля.

Цифровая скоростная камера FastCAMSA1.1 model 675K-M1 (рис. 2.3) предназначена для записи видео с частотой до 10000 кадр/с при полноэкранном сканировании (разрешение 1280×1024, 10 бит). Система

видеосъёмки на базе скоростной камеры состоит из следующих основных узлов:

1. Скоростная камера FastCAMSA1.1 model 675K-M1;
2. Кабель Camera Link;
3. Программное обеспечение Photron FASTCAM viewer;
4. Блок питания камеры.



Рисунок 2.3 – Скоростная видеокамера FastCAMSA1.1 model 675K-M1.

Данные с видео сенсора получаются контроллером камеры и передаются в фреймграббер по кабелям CameraLink. Данные из него записываются в оперативную память ПК, откуда они выводятся на экран монитора и могут быть сохранены на жёсткий диск ПК.

В разработанной установке источником тепловыделения является электрический ток, подводимый к нагревательному элементу. От нагревательного элемента отходят 3 провода: 2 провода на питание и один на ХК (хромеле-капелевую) термопару, для регистрации температуры внутри нагревательного элемента и не допущения его перегрева (рис. 2.4).

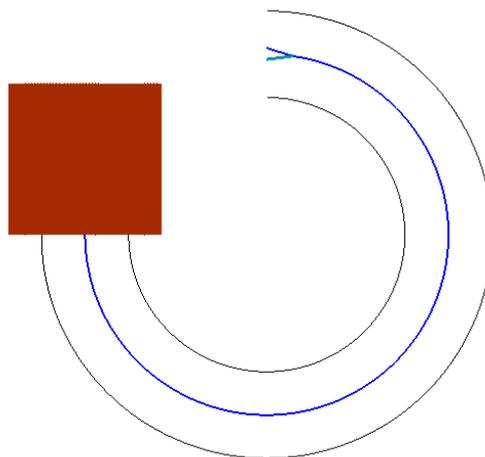


Рисунок 2.4 – Электронагревательный элемент.

Измерение температуры проводилось откалиброванными термопарами типа К (OMEGA 5ТС-ТТ-К-40-36) с размером королька 80 мкм. Показания проверены с помощью эталонных термометров сопротивления ЭТС-100, погрешность которых для исследуемых диапазонов температур составляет 0,1°C.

Сигнал с термопар поступал на аналоговый преобразователь National Instruments 9214 (NI 9214), паспортная точность которого составляет 0,01°C для термопар типа К. Далее данные поступали в разработанное программное обеспечения в среде LabView, где измеренные значения температур сохранялись на ПК.

Визуализация процесса и обработка полученных результатов осуществляется с помощью программного обеспечения Photron FASTCAM viewer (рис. 2.5).

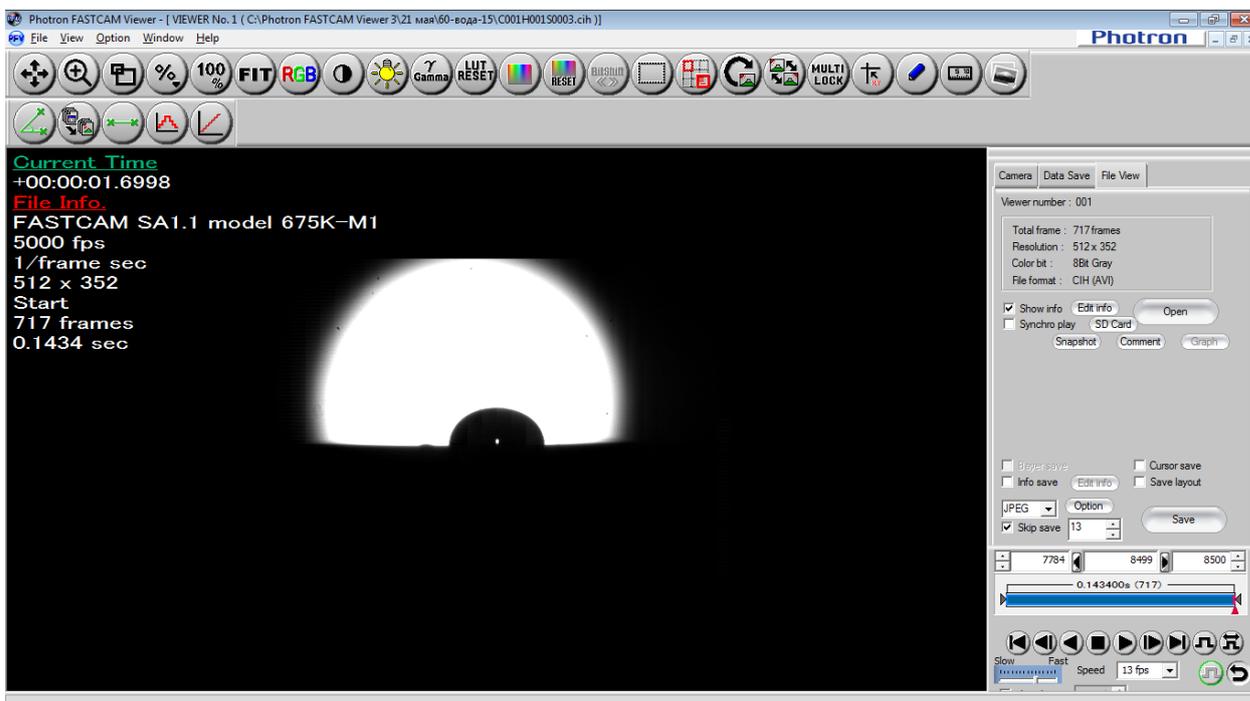


Рисунок 2.5 – Программное обеспечение Photron FASTCAM viewer.

### 2.2.2. Способы и средства регистрации, методы и точность измерения основных параметров.

В работе исследуется процесс соударения каплей различных солей: CaCl 10%; LiCl 10%; NaCl 10% с нагретой поверхностью.

Оптический метод исследования капли на нагретой поверхности.

В большинстве случаев для визуализации взаимодействия между каплей и твердой поверхностью является теневая методика (рис.2.6). Она является наиболее приемлемая для проводимого исследования, так как жидкость освещается равномерным светом, параллельным поверхности нагрева. Часть света рассеивается каплей. Нерассеянный свет фиксируется камерой. Таким образом, на полученных изображениях видна "тень" капли (рис.2.7).

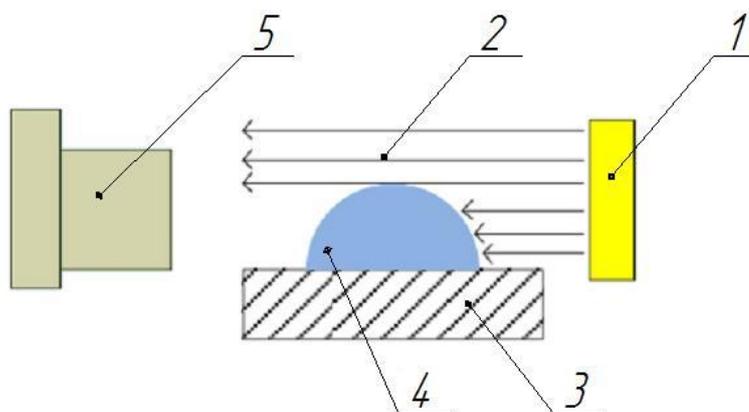


Рисунок 2.6 – Схема теневой методики;

1 - источник света; 2 - свет, параллельный поверхности нагрева; 3 - поверхность нагрева; 4 - капля; 5 - высокоскоростная камера.

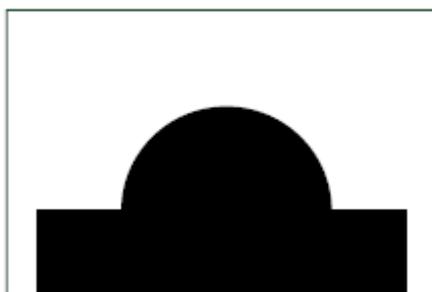


Рисунок 2.7 – Теневое изображение капли

На Рис. 2.8 изображена оптическая схема улучшенной теневой методики. Штрих пунктирная линия – оптическая ось системы. Для освещения капли плоскопараллельным светом используется точечный источник света (Рис. 2.8, 1). Объектив камеры используется для проецирования изображения на сенсор камеры (Рис. 2.8, 3 и 5). Для уменьшения влияния внешних источников света на измерения, непрозрачный щит с отверстием 4 устанавливается в фокусе линзы 5.

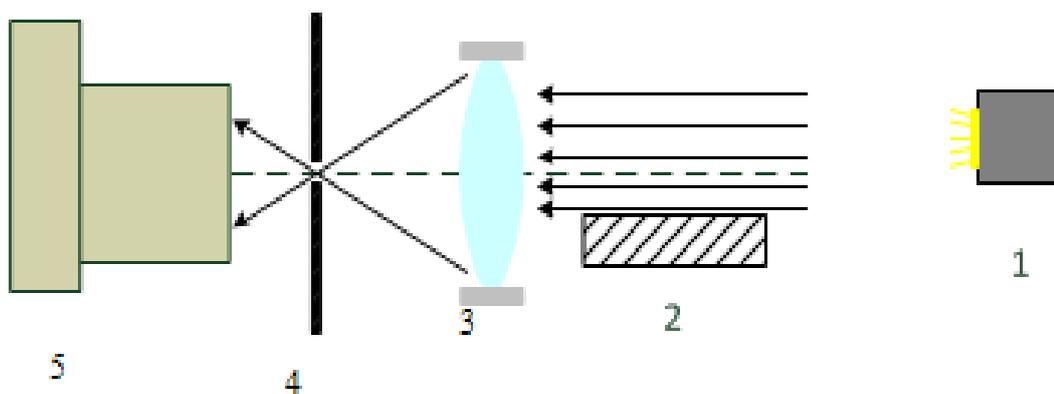


Рисунок 2.8 – Схема оптической системы;

1 – источник света; 2 – подложка; 3 – объектив камеры;

4 – непрозрачный щит с отверстием; 5 – высокоскоростная камера.

Для проецирования изображения на сенсор камеры используется объектив камеры (рис. 2.8). Плоскопараллельный свет фокусируется на оптической оси линзой 1. Объектив камеры 3 обратно конвертирует свет в плоскопараллельный. Далее свет попадает на сенсор камеры 4. Представленная система проецирует теневое изображение на сенсор камеры без искажений.

В фокальной плоскости линзы 1 помещается непрозрачный щит с отверстием 2 таким образом, что центр отверстия совмещается с оптической осью системы. В этом случае свет от источника плоскопараллельного света пройдет через щит без искажений. А свет от других источников будет сфокусирован линзой 1 в других областях фокальной плоскости и соответственно будет задержан установленным щитом 2. То есть, только свет, генерируемый специально для измерений, будет зафиксирован сенсором камеры.

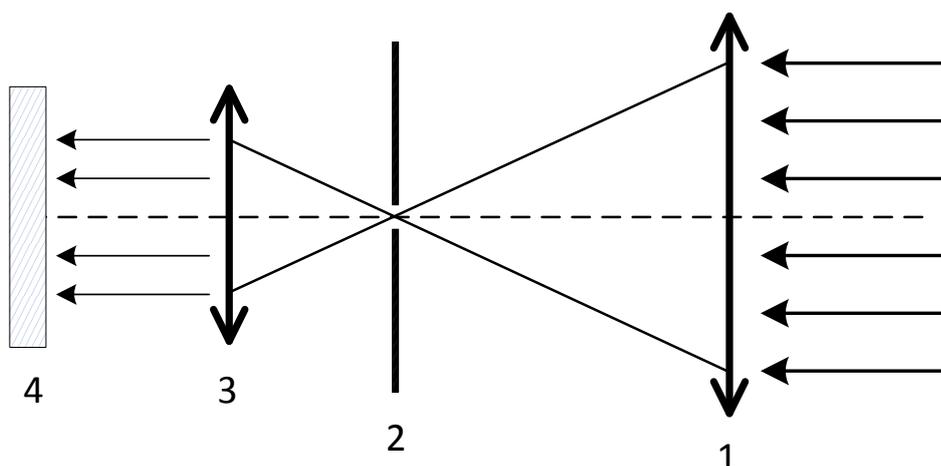


Рисунок 2.9 – Система проецирования изображения;

1 – объектив камеры; 2 – непрозрачный щит с отверстием; 3 – объектив;  
4 – высокоскоростная камера.

Оптическая система фиксирует тень от капли. Поэтому для калибровки системы можно использовать другой объект с хорошо известными характеристиками (болт диаметром  $d = 9,4\text{мм}$ ).

### 2.2.3 Методика проведения исследования

1. Включение всех элементов экспериментальной установки (рис. 2.1): источник света 1, блок питания электронагревателя 2, высокоскоростная камера 7 и линзипет 8.
2. Запуск программного обеспечения для записи видео Photron FASTCAM viewer и для фиксации температуры на подложке – LabView SignalExpress:

2.1 На компьютере включаем программу “Photron FASTCAM Viewer”,



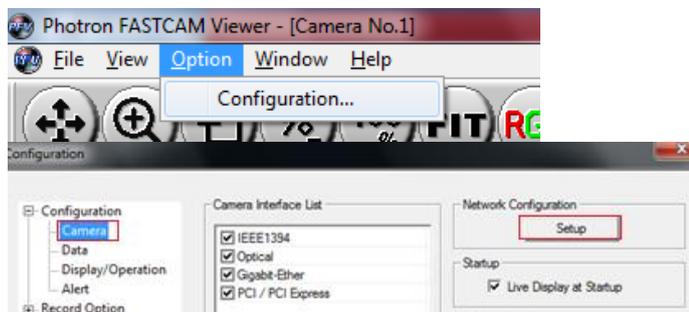
кликнув дважды на значок

2.2 Зайти в Панель управления → Сеть и Интернет → Центр управления сетями и общим доступом. В окне “Просмотр активных сетей” заходим в “Подключение по локальной сети”.

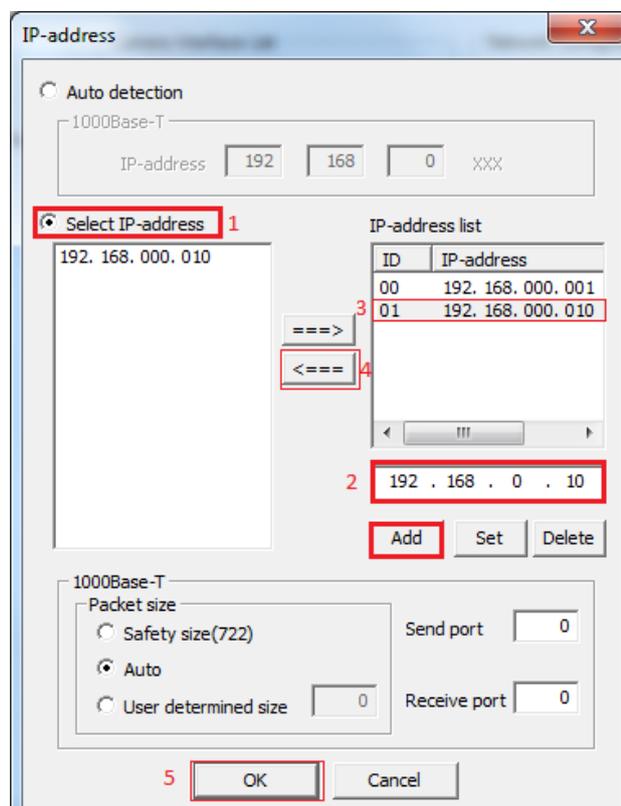
2.3 В открывшемся окне выбираем “Свойства”. После выбираем “Протокол Интернета версии 4 (TCP/IPv4)”. Ставим галочку на

“Использовать следующий IP-адрес”, вбиваем в строку “IP-адрес” 192.168.0.1 и нажимаем ОК.

2.4 В программе Photron FASTCAM Viewer открываем Option → Configuration → Camera → Network Configuration → Setup.



Выбираем Select IP-address, вбиваем 192.168.0.10. Нажимает Add, после чего переносим IP-адрес в колонку слева. Нажимаем ОК.



2.5 Открываем камеру, переходя в File → Camera Open.

3. Настройка фокуса камеры и калибровка системы.

4. Нагрев подложки происходит с помощью электронагревательного элемента. Температура поверхности подложки измеряется термопарой. Изменение температуры во времени фиксируется с помощью программного обеспечения NPLOC и выводился на монитор компьютера.

5. Равномерная подача жидкости и регулировка объема капли производится с помощью ленпипета.
6. Видеосъемка процесса падения капли и непосредственного испарения на поверхности подложки со скоростью 5000 кадров/с.
7. Обработка полученных данных в программной среде Photron FASTCAM viewer.
8. Построение графических зависимостей по результатам обработки.

## **Выводы по второй главе**

Разработана методика экспериментального исследования процесса испарения дистиллированной воды и растворов солей на подложках из алюминия. Анализ профиля капли проведен с помощью теневой системы, для оценки симметрии капли и визуализации процесса формирования использовалась высокоскоростная камера.

Определены входные параметры, область варьирования факторов и выходные параметры. Случайная погрешность исключалась повторением экспериментов, а также неизменностью внешних условий.

График изменения температуры во времени строился с помощью программного обеспечения LabView SignalExpress. Кадры, полученные видеокамерой FastCAMSA1.1 model 675K-M1, обрабатывались при помощи программного обеспечения Photron FASTCAM viewer. Раскадровка видеофайла проводилась в программной среде Fast Video Lab.

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

Цель проекта - проведение научно-исследовательской работы согласно требованиям, отвечающим современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а также является экономическое обоснование научно–исследовательской работы.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка перспективности проведения научных исследований;
- определение иных способов испытания научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательской работы;
- определение эффективности исследования.

Научно-исследовательская работа заключается в проведении серии экспериментов на специальном стенде с целью определения скорости испарения капель дистиллированной воды на поверхности цветных металлов, но проведение экспериментальных исследований требует привлечения финансовых затрат и других ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

Анализ конкурентных технических решений проведем с помощью метода экспертной оценки ресурсоэффективности различных типов защит.

На рассмотрение экспертов были выставлены альтернативные проекты - применение микропроцессорной защиты, защиты на аналоговых элементах или электромеханических реле.

1) Эксперты разрабатывают критерии эффективности и оценивают их по 0 балльной шкале (10- max).

2) Далее они оценили важность каждого критерия по 6 балльной шкале ( $b_j$ ). Затем был определен весовой коэффициент по выражению:

$$W_j = \frac{b_j}{\sum b_j}.$$

3) Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод.

Для оценки использовались следующие критерии эффективности:

1. Стоимость;
2. Надежность работы;
3. Аппаратная надежность – надежность отдельных компонентов защиты;
4. Удобство обслуживания;
5. Качество защитных функций (чувствительность, селективность, статическая и динамическая устойчивость функционирования);
6. Долговечность;
7. Помехоустойчивость.

Таблица 8 - Определение экспертной оценки конкурентоспособности проектов, данная экспертом 1

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)							Итоговая оценка
		Стоимость	Надежность работы	Аппаратная надежность	Удобство обслуживания	Качество заш. функций	Долговечность	Помехоустойчивость	
1	Микропроцессорная защита	5	8	10	10	9	9	6	57
2	Защита на аналоговых элементах	7	7	8	9	8	9	7	54
3	Электромеханическая защита	10	6	5	6	5	6	10	48
	$b_j$ (от 0 до 6)	4	6	5	5	3	3	2	28
	$w_j = b_j / \sum b_j$	0,143	0,214	0,179	0,179	0,107	0,107	0,071	1

Далее проведем корректировку оценок с учетом весовых коэффициентов.

Таблица 9 - Корректировка оценок эксперта 1 с учетом весовых коэффициентов

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)							Итоговая оценка
		Стоимость	Надежность работы	Аппаратная надежность	Удобство обслуживания	Качество заш. функций	Долговечность	Помехоустойчивость	
1	Микропроцессорная защита	0,715	1,712	1,79	1,79	0,963	0,963	0,426	8,359
2	Защита на аналоговых элементах	1,001	1,498	1,432	1,432	0,856	0,963	0,497	7,679
3	Электромеханическая защита	1,43	1,284	0,895	1,074	0,535	0,642	0,71	6,57

Затем был опрошен эксперт за номером 2:

Таблица 10 - Определение экспертной оценки конкурентоспособности проектов, данная экспертом 2

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)							Итоговая оценка
		Стоимость	Надежность работы	Аппаратная надежность	Удобство обслуживания	Качество заш. функций	Долговечность	Помехоустойчивость	
1	Микропроцессорная защита	6	8	9	10	9	7	4	53
2	Защита на аналоговых элементах	7	8	7	9	9	6	6	52
3	Электромеханическая защита	9	9	4	7	6	4	9	48
	$b_i$ (от 0 до 6)	4	6	5	5	3	3	2	28
	$w_i = b_i / \sum b_i$	0,143	0,214	0,179	0,179	0,107	0,107	0,071	1

Далее проведем корректировку оценок с учетом весовых коэффициентов.

Таблица 11 - Корректировка оценок эксперта 2 с учетом весовых коэффициентов

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)							Итоговая оценка
		Стоимость	Надежность работы	Аппаратная надежность	Удобство обслуживания	Качество заш. функций	Долговечность	Помехоустойчивость	
1	Микропроцессорная защита	0,858	1,712	1,611	1,79	0,963	0,749	0,284	7,967
2	Защита на аналоговых элементах	1,001	1,712	1,253	1,611	0,963	0,642	0,426	7,6
3	Электромеханическая защита	1,287	1,926	0,716	1,253	0,642	0,428	0,639	6,891

Затем был опрошен эксперт за номером 3:

Таблица 12 - Определение экспертной оценки конкурентоспособности проектов, данная экспертом 3

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)							Итоговая оценка
		Стоимость	Надежность работы	Аппаратная надежность	Удобство обслуживания	Качество заш. функций	Долговечность	Помехоустойчивость	
1	Микропроцессорная защита	4	7	8	7	6	7	5	44
2	Защита на аналоговых элементах	6	6	7	6	7	7	6	45
3	Электромеханическая защита	8	7	4	4	5	6	8	42
	$b_i$ (от 0 до 6)	4	6	5	5	3	3	2	28
	$w_i = b_i / \sum b_i$	0,143	0,214	0,179	0,179	0,107	0,107	0,071	1

Далее проведем корректировку оценок с учетом весовых коэффициентов.

Таблица 13 - Корректировка оценок эксперта 3 с учетом весовых коэффициентов

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)							Итоговая оценка
		Стоимость	Надежность работы	Аппаратная надежность	Удобство обслуживания	Качество заш. функций	Долговечность	Помехоустойчивость	
1	Микропроцессорная защита	0,572	1,498	1,432	1,253	0,642	0,749	0,355	6,501
2	Защита на аналоговых элементах	0,858	1,284	1,253	1,074	0,749	0,749	0,426	6,393
3	Электромеханическая защита	1,144	1,498	0,716	0,716	0,535	0,642	0,568	5,819

Итоговые оценки экспертов. Записываем взвешанные оценки из последнего столбца таблицы по каждому эксперту. Складываем данные по каждому проекту. Отдаем предпочтение проекту, получившему максимальную сумму.

Таблица 14 - Итоговая оценка на основе мнений экспертов о проектах

№ п/п	Рассматриваемые проекты	Критерии ресурсоэффективности проектов(от 0 до 10 баллов)			Итоговая оценка
		Мнение эксперта 1	Мнение эксперта 2	Мнение эксперта 3	
1	Микропроцессорная защита	8,359	7,967	6,501	22,827
2	Защита на аналоговых элементах	7,679	7,608	6,393	21,68
3	Электромеханическая защита	6,57	6,891	5,819	19,28

По решению экспертов в голосовании победил исходный проект – использование микропроцессорной защиты в качестве защиты автотрансформатора.

Построим гистограмму итоговых оценок по таблице 14.

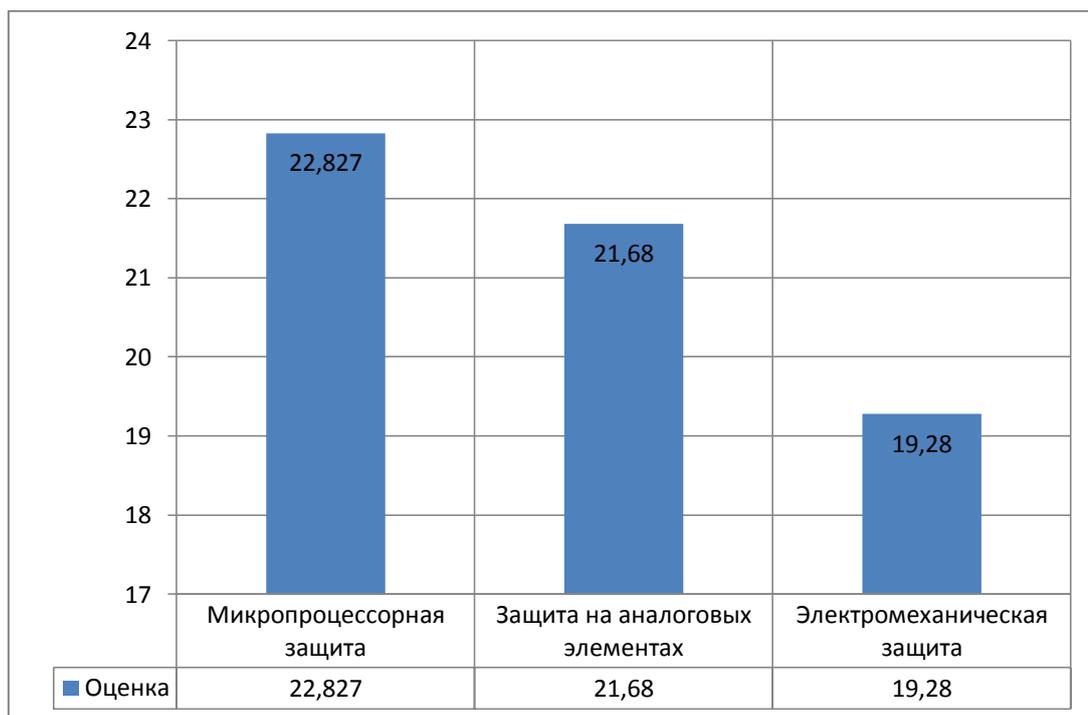


Рисунок 23 - Гистограмма итоговых оценок

При анализе различных типов защит следует рассмотреть понятие эксплуатационной эффективности устройств релейной защиты.

Эксплуатационной эффективностью УРЗ назовем совокупность качеств, определяющих способность УРЗ полноценно выполнять свои функции в условиях эксплуатации.

Каким бы совершенным ни было устройство релейной защиты, его эффективность в реальных условиях использования (эксплуатационная эффективность) определяется в первую очередь двумя группами факторов.

Группа I — объем защитных функций, характеристики, уставки, определяющие чувствительность УРЗ к внутренним повреждениям защищаемого объекта ЭС, повреждениям в зонах резервирования и селективность (отстройку от внешних повреждений).

Само по себе повышение технического уровня УРЗ не обязательно ведет к эквивалентному повышению эффективности в части реагирования на возникающие повреждения. Так, например, устаревшие к настоящему времени электромеханические и отчасти электронные статические УРЗ при правильном выборе защитных функций и уставок безусловно обеспечат более эффективную защиту сети, чем микропроцессорные УРЗ без достаточно обоснованного выбора указанных параметров.

Существуют многочисленные нормы и стандарты (отдельных стран и международные), позволяющие оценить качество устройств релейной защиты в части их технической реализации — вида функций и точности характеристик, потребления, устойчивости к различного рода влияющим факторам. Однако указанные стандарты и нормы не относятся к оценке качества релейной защиты в части обеспечения чувствительности и селективности при устранении аварий ЭС с учетом многообразия возможных условий возникновения аварий. В то же время именно эти показатели релейной защиты во многом определяют ее реальную эффективность при возникновении аварий в ЭС.

Группа II включает в себя факторы, влияющие на готовность УРЗ выполнять свои функции при возникновении аварий в ЭС, которую будем называть эксплуатационной готовностью УРЗ. К ним, в первую очередь, относятся:

- правильная реализация функций УРЗ;
- соответствие установленных параметров и уставок УРЗ требованиям задания на их установку;
- техническая исправность УРЗ.

Таким образом, реальная эксплуатационная эффективность цифровой релейной защиты, может быть достигнута лишь при правильном использовании ее функций и грамотной эксплуатации, что обуславливает необходимость соответствующей подготовки проектирующего и эксплуатационного персонала энергосистем.