

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

---

Институт Энергетический

Направление подготовки Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

<b>Тема работы</b>
<b>Испарение капель водно-солевых растворов на металлических поверхностях</b>

УДК 536.423.539.211

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Исламова Анастасия Гомильевна		

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
ст. преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Король И.С.	К.Х.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики металлов и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел.
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для

	разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки (специальность) Физика  
Кафедра Теоретическая и промышленная теплотехника

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. Кафедрой ТПТ  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_  
(Дата)      Кузнецов Г.В.  
(Ф.И.О.)

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

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ51	Исламовой Анастасии Гомильевне

Тема работы:

<b>Испарение капель водно-солевых растворов на металлических поверхностях</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	235/с от 27.01.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2017 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования процесс тепломассопереноса в условиях испарения капель водно-солевых растворов различной концентрации на металлической алюминиевой поверхности. Предмет исследования: характеристики процесса тепломассопереноса и смачивания (скорость испарения, изменение контактного угла, диаметра и т.д.) в условиях испарения капли водно-солевых растворов LiBr, LiCl, CaCl <sub>2</sub> , NaCl различной концентрации на металлической алюминиевой поверхности.
---------------------------------	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Проведение анализа научных публикаций по тематике: испарение капель воды и водных растворов. Проведение серии предварительных экспериментов по испарению капель растворов с целью определения области варьирования факторов. Проведение серии экспериментов на металлической алюминиевой подложке с целью определения характеристик процесса испарения и смачивания в условиях интенсивного нагрева твердой поверхности (скорость испарения, краевой угол, диаметр смоченного пятна). Анализ экспериментальных данных, определение влияния температуры подложки, раствора соли, объема капли на скорость испарения, краевой угол и контактный диаметр.
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Н.Г.
Социальная ответственность	Король И.С.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Введение	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	10.10. 2015 г.
---	----------------

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Исламова Анастасия Гомильевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ51	Исламовой Анастасии Гомильевне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ТПТ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Должностной оклад инженера 17000 руб./мес. Должностной оклад научного руководителя 26300 руб./мес.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Амортизационные отчисления 20%. Районный коэффициент 30%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Соц. отчисления 20% от ФОТ

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Планирование НИР.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Смета затрат на проведение исследования.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</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:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Исламова А.Г.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 118 с., 28 рис., 11 табл., 96 источников, 1 прил.

Ключевые слова: десорбция капель, контактный угол, скорость испарения, режим испарения, пиннинг, депиннинг, тепломассобмен, кристаллогидраты.

Объект исследования процесс тепломассопереноса в условиях испарения капель водно-солевых растворов различной концентрации на металлической алюминиевой поверхности.

Предмет исследования: характеристики процесса тепломассопереноса и смачивания (скорость испарения, изменение контактного угла, диаметра и т.д. в условиях испарения капли водно-солевых растворов LiBr, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, NaCl различной концентрации на металлической алюминиевой поверхности.

Цель работы анализ влияния основных факторов (температуры поверхности, объема капли, химического состава) на фазовый переход капель водных растворов солей LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl и NaCl на алюминиевой поверхности в установленных режимах испарения.

Экспериментально исследовался процесс испарения капель дистиллированной воды и водных растворов солей LiBr, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, NaCl на нагретой алюминиевой металлической подложке.

В результате исследования выделены режимы испарения. Определено влияние температуры поверхности, концентрации водных растворов солей LiBr, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, NaCl, объема капли, на скорость испарения и геометрические характеристики капли (контактный угол, диаметр).

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

### Определения

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Контактный угол – угол, который образован касательными плоскостями к межфазным поверхностям, которые ограничивают смачивающую жидкость.

Гистерезис – это разница между наступающим и отступающим контактными углами, которые образуются в условиях натекания/оттекания жидкости по твердой поверхности.

Пиннинг – торможение контактной линии на поверхности твердого тела, при этом смоченная площадь остается неизменной.

### Обозначения и сокращения

$\theta$  – контактный угол, °;

$\gamma$  – поверхностное натяжение, Н/м;

$h$  – высота капли, м;

$b$  – площадь контакта, м<sup>2</sup>;

$r$  – радиус, м;

$V$  – объем, мкл;

$T$  – температура, °С;

$t$  – время, с;

$C$  – концентрация, %;

$j$  – скорость испарения/ десорбции, мкл/с;

$R_a$  – среднеарифметическое отклонение профиля поверхности;

SEM – сканирующий электронный микроскоп;

TEM – просвечивающий электронный микроскоп.

### Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.



2. ГОСТ 2.309-73. Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхности.
3. ГОСТ 27964-88. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения.
4. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585-10. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
6. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение
7. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
8. ГОСТ 12.4.011–89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
9. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
10. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
12. ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	14
1 ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ .....	17
1.1 Методы и средства определения геометрических характеристик капли, лежащей на поверхности.....	17
1.2 Режимы испарения капель солевых растворов.....	22
1.3 Механизм роста кристаллов соли и кристаллогидратов “сидячей капли”	25
1.4 Влияние различных факторов на испарение капель .....	29
1.5 Механизм испарения капель однокомпонентных жидкостей и солей.....	31
Выводы по первой главе.....	35
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ $\text{CaCl}_2$ , $\text{LiCl}$ , $\text{LiBr}$ , $\text{NaCl}$ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ В УСЛОВИЯХ ВАРИАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА .....	38
2.1 Описание экспериментальной установки.....	38
2.2 Описание теневой системы.....	42
2.3 Методика проведения эксперимента .....	42
2.4 Порядок проведения экспериментов .....	52
2.5 Обработка экспериментальных данных .....	53
3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ .....	54
3.1 Оценка погрешностей методов обработки фотоизображений, полученных при использовании теневой методики определения геометрических характеристик капли, лежащей на поверхности.....	54
3.2 Режимы испарения капель водного раствора солей.....	56
3.3 Влияние основных значимых факторов на десорбцию капель .....	61

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	68
4.1 Планирование работ и оценка времени на их выполнение .....	68
4.2 Смета затрат на разработку проекта .....	69
4.3 Анализ основных результатов .....	73
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	75
5.1 Производственная безопасность .....	75
5.2 Экологическая безопасность проекта .....	82
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	83
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	86
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ .....	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	90
Приложение А .....	99

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетический потенциал фазового перехода капле используется в различных технологических процессах. Например, отвод рассеиваемой теплоты от поверхности устройств печати [1], микро и наноэлектронике [2, 3]. Известно [4,5], что спреевый способ охлаждения эффективен при высоких перегревах теплонагруженных элементов. При спреевом охлаждении сложно обеспечить равномерность отвода теплоты по всей поверхности. В местах ее слабого охлаждения резко поднимается температура и возникает кризис кипения, когда капля периодически отрывается от поверхности. Кризис кипения растворов солей как на “открытой” поверхности, так и в мини каналах отличается от кризиса кипения капле воды. Последнее связано с появлением твёрдых частиц – кристаллогидратов [6, 7].

В химической промышленности технологические процессы редко реализуются с применением однокомпонентных жидкостей. Обычно используются многокомпонентные растворы, капли которых содержат механические примеси [8]. Для таких капле усложняется задача определения скорости парообразования. При испарении смесей с разной летучестью изменяются концентрации отдельных компонентов, входящих в их состав. Соответственно, изменяются физико-химические свойства всего раствора [9].

За последнее десятилетие возросла востребованность в природном газе [10], в связи с наличием экологических, стоимостных и других его преимуществ перед нефтью и углем. При переводе природного газа в жидкое состояние он уменьшается в объеме более чем в 600 раз. Транспортировка и хранение сжиженного природного газа (СПГ) позволяет доставлять топливо с труднодоступных месторождений к потребителю.

Технологический процесс СПГ требует очистки природного газа от  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и других серосодержащих примесей. Наиболее часто для этих целей применяется абсорбционный метод. Эффективность работы абсорбционных установок, их размеры и масса конструкции зависит от многих факторов: давления, температуры, числа тарелок, удельного расхода абсорбента, скоростей

абсорбции и десорбции водно-солевыми растворами и т.д. [11]. При абсорбционном методе очистки и осушки природного газа реализуется процесс испарения капли водно-солевых растворов в отдельных аппаратах. Например, в теплообменниках предварительного нагрева. Разработка таких энергоресурсоэффективных аппаратов сдерживается отсутствием теоретических основ прогнозирования тепломассообменных характеристик процесса испарения капель водно-солевых растворов.

### **Актуальность исследования**

Повысить эффективность абсорбционных установок, работающих с применением водно-солевых растворов, можно максимально увеличив концентрацию соли в десорбере (генераторе). При этом значение концентрации соли в растворе на выходе из десорбера и на входе в него приближается к области кристаллизации. Для надёжной работы абсорбционных аппаратов необходимо минимизировать или даже исключать кристаллизацию [12]. Неоднородность процесса тепломассообмена по поверхности плёнки раствора обуславливает локальную кристаллизацию. Поэтому представляет интерес исследование не только скорости испарения жидких растворов, но и механизмов образования кристаллогидратов по поверхности и в объёме капли, плёнки. На сегодняшний день известно не много экспериментальных данных [4-7,11,12] по испарению капель растворов солей LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl и NaCl в условиях образования кристаллогидратов, которые могут использоваться для прогностического моделирования эффективных абсорбционных установок.

Цель работы анализ влияния основных факторов (температуры поверхности, объема капли, химического состава) на фазовый переход капель водных растворов солей LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl и NaCl на алюминиевой поверхности в установленных режимах испарения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение обзора научных публикаций по тематике испарения капель на твердых поверхностях.
2. Разработать методику экспериментальных исследований.

3. Оценить погрешность измерения контактных углов методами тангенциальный 1, тангенциальный 2 и Юнга-Лапласа.
4. Проведение серии экспериментов по исследованию процессов испарения капель водно-солевых растворов на алюминиевой подложке.
5. По результатам проведенных экспериментов выделить режимы испарения капель водных растворов солей LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl и NaCl
6. Установить влияние основных факторов (температуры поверхности, объема капли, раствора соли) на процесс испарения капель водно-солевых растворов.

# 1 ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Первые научные исследования процесса испарения капли проведены Максвеллом более века назад [13]. По настоящее время данный процесс не исследован на уровне прогностического моделирования, позволяющего управлять процессом растекания и испарения капли. В главе представлен краткий литературный обзор:

1. Методы и средства определения геометрических характеристик капли, лежащей на поверхности.
2. Режимы испарение капель солевых растворов.
3. Механизм роста кристаллов соли и кристаллогидратов “сидячей капли”.
4. Влияние различных факторов (динамики движения контактной линии, структуры и теплопроводности поверхности, конвекции, теплофизических свойств жидкости) на испарение капель.
5. Механизм испарения капель однокомпонентных жидкостей и солей.

## 1.1 Методы и средства определения геометрических характеристик капли, лежащей на поверхности

Контактный угол ( $\theta$ ) – угол между поверхностью твердого тела и поверхностью раздела фаз “жидкость-газ”. Последний используется как показатель, характеризующий смачиваемость твердой поверхности и силу адгезии между каплей и твердой поверхностью [14].

Из известных методов определения контактного угла (метод пластины Вильгельми, поднятия по капилляру, отраженного света, “сидячей капли”) наиболее распространен метод “сидячей капли”. Так как для реализации последнего требуется недорогое оборудование (источник плоскопараллельного света, фотоаппарат, дозирующее устройство), малое количество рабочей жидкости и небольшая площадь исследуемой поверхности. На рисунке 1.1

приведены типичные изображения по которым определяются геометрические характеристики капли (контактный угол, диаметр, высота) по методу “сидячей капли”.

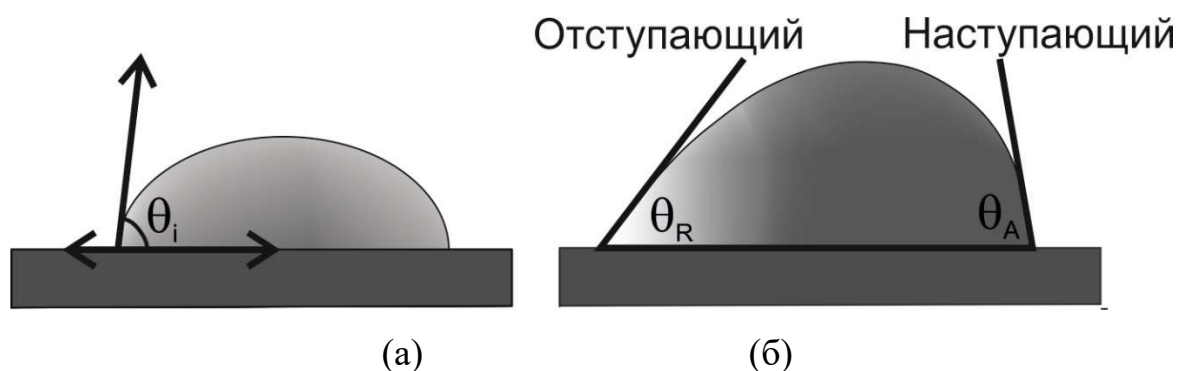


Рисунок 1.1 – Профиль капли на твердой поверхности: (а) горизонтальной; (б) на наклонной

Методы измерения контактного угла “сидячей капли” условно можно разделить на две группы тензиометрии и гониометрии [15].

#### 1.1.1 Методы измерения контактного угла (тензиометрией)

В этих методах контактный угол определяют используя уравнение Юнга [16]:

$$\cos \theta_i = (\gamma_{ТГ} - \gamma_{ТЖ}) / \gamma_{ЖГ}, \quad (1)$$

где  $\theta_i$  – равновесный краевой угол, °;

$\gamma_{ЖГ}$ ,  $\gamma_{ТГ}$ ,  $\gamma_{ТЖ}$  – поверхностные натяжения на границах раздела “жидкость-газ”, “твердое тело-газ”, “твердое тело-жидкость” соответственно, Н/м.

При условии баланса сил, действующих на каплю,  $\gamma_{ЖГ}$ ,  $\gamma_{ТГ}$ ,  $\gamma_{ТЖ}$  будут постоянны. Следовательно, контактный угол не изменяется и его можно найти, используя уравнение (1). При этом возникают трудности. Во-первых, значение  $\gamma_{ТГ}$  сложно определить. Во-вторых, примеси в жидкости, шероховатость и химическая неоднородность на поверхности [16], влияют на баланс сил в капле, что приводит к изменению контактного угла. Уравнение Юнга не учитывает данное изменение. В таких случаях используются методы гониометрии.

#### 1.1.2 Методы гониометрии



При использовании этих методов регистрация контактного угла проводится после анализа теневого изображения капли (Рисунок 1.1(a) и (б)). Известные методы гониометрии (“сидячей капли”, “подвесной капли” и “захват пузырька”) можно условно разделить на две подгруппы обработки изображений с использованием: (1) законов геометрии и аналитических выражений свойств жидкости, (2) только законов геометрии [17]. Стоит отметить, что первая подгруппа не применима для определения геометрических размеров асимметричных капель. Вторая не имеет ограничений по симметрии капли. По этой причине методы второй подгруппы получили более широкое распространение.

1.1.2.1 Методы обработки теневых изображений капель с использованием законов геометрии и аналитических выражений свойств жидкости

Теоретические положения методов обработки теневых изображений капель с использованием законов геометрии и аналитических выражений свойств жидкости установлены при разработке метода ADSA (axisymmetric drop shape analysis) [18].

При использовании метода ADSA строится целевая функция, которая является ошибкой между наблюдаемой и теоретической (лапласовской) границей капли. Минимизация целевой функции в ADSA основана на методе Ньютона-Рафсона (касательных) [18]. ADSA требует хорошего начального приближения к профилю капли, что сделало его чувствительным к “шуму” на фотоизображениях. В [19] для минимизации целевой функции использован метод конечных разностей Левенберга-Марквардта. Последнее позволило решить проблему начального приближения к профилю капли (метод получил название ADSA-HD).

Стоит отметить, что методы, основанные на ADSA, ограничены осесимметричной формой капли. Кроме того, для почти сферических форм капель уравнение Лапласа не сходится, и ADSA неточен в этих условиях [20]. Примером служит смачивание супергидрофобной поверхности мелкими каплями.

Метод LB-ADSA (известен под названием “Юнга-Лапаласса”) [21] основан на “подгонке” уравнения Юнга-Лапласа (2) к изображению капли. Метод применим для определения геометрических размеров капли и поверхностного натяжения жидкости. Приближение первого порядка уравнения 2 используется для аналитического определения контура капли.

Уравнение Юнга-Лапласа:

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  являются главными радиусами кривизны в любой точке, м;

$\gamma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

$\Delta P$  – капиллярное давление, Па.

1.1.2.2 Методы обработки теневых изображений капель с использованием законов геометрии.

Разработаны для определения геометрических характеристик капель асимметричной и симметричной формы, любого объема.

Ниже приведен их краткий обзор.

Метод “круга” [22, 23]. Используется функция, описывающая круг. Граница раздела “жидкость-газ” определяется с помощью специальных маркеров. Полученный результат сопоставляется с профилем капли. Основное преимущество этого метода по сравнению с ADSA – скорость реализации. Недостатком является точность особенно для относительно больших капель, когда радиус больше капиллярной постоянной. В этих условиях сила тяжести значительно влияет на форму капли [18]. Метод “круга” не применим для определения геометрических размеров асимметричных капель. Разработана модель [24] для определения локального контактного угла капель, при известной форме, линии контакта и объеме капли. Однако их модель не подходит для асимметричных капель. Линия контакта в [24] строится по боковому изображению капли.

Метод “длины-ширины” [25]. В методе оценивается длина периметра растекания капли и ее высота. Контур, являющийся частью окружности, вписывают в прямоугольник и рассчитывают краевой угол из соотношения

ширины и высоты (рисунок 1.2). Данный метод более точен для капель малого объема, форма которых ближе к сфере. Для определения контактного угла используется следующее уравнение:

$$CA = 2\theta = 2 \arctan\left(\frac{2h}{b}\right),$$

где  $CA$  – контактный угол, °;

$h$  – высота, м;

$b$  – площадь контакта, м.

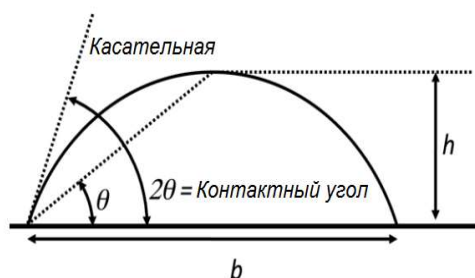


Рисунок 1.2 – Измерение контактного угла с использованием метода длины-ширины.

Данный метод не подходит для динамического контактного угла, при дозировании капли иглой сверху на твердую поверхность. Игла остается в капле и нельзя точно определить высоту капли.

“Тангенциальный метод 1” [26]. Полный контур лежащей капли подгоняется к уравнению конического сегмента. Производная этого уравнения в точке пересечения контура и базовой линии дает угол наклона в точке контакта, т.е. краевой угол. Этот метод может использоваться с динамическими методами оценки в том случае, если капля не сильно разрушается иглой.

“Тангенциальный метод 2” [27]. Разработан метод под названием APF (Automated Polynomial Fitting) [27]. В методе вычисление лапласиана над гауссианом использовалось для нахождения границы капли вблизи области контактной линии, которая была увеличена в 35 раз. С помощью полинома с первого по шестой порядок можно определить контактный угол. Разработан алгоритм [27] автоматического поиска контактной линии. Методы, основанные

на алгоритме [27] (например, [28]) чувствительны к порядку полинома и числу пикселей, используемых для подбора многочлена. Зависимость между полиномиальным порядком и числом используемых пикселей недостаточно хорошо определена для всех диапазонов контактного угла. Кроме того, за один раз можно найти угол и точку контакта только на одной стороне капли. APF не может автоматически определить базовую линию и предполагает, что она горизонтальна. Базовая линия важна, так как контактный угол – это угол между касательной к поверхности жидкости и базовой линией. Разработаны [28] подходы, основанные на «Snakes», «Gradient Vector Flows», «Snakes» или «Active Contours» являются компьютерными кривыми, которые перемещаются внутри изображения, чтобы найти границы объекта [29]. При использовании метода «Drop Snake» необходимо задавать базовую линию контакта и несколько граничных точек. При дозировании капли иглой сверху на подложку метод не применим для исследований изменения динамического контактного угла.

## 1.2 Режимы испарения капель солевых растворов

Экспериментально исследовалось [30] испарение капель воды, содержащих растворенные и взвешенные вещества в условиях стационарного и движущегося потока воздуха. При анализе результатов сделано допущение о том, что концентрация растворенного вещества на поверхности всегда находится в насыщении, независимо от концентрации в объеме капли.

Это упрощение основано на том, что коэффициент диффузии в воде настолько мал ( $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с<sup>1</sup>), что твердые частицы будут концентрироваться на поверхности капли при испарении намного быстрее, чем диффундировать к центру капли. Позднее показано [31], что это допущение неверно. Установлено [32], что скорость испарения и температура по поверхности капель CaCl<sub>2</sub> изменяются с начальными концентрациями. Выделены [31] два режима испарения капель. Первый режим выделен при условии испарения только растворителя. Режим характеризуется уменьшением площади поверхности и перепадом температуры по поверхности капли. При определении температуры

по поверхности капли учтено давление паров над ней [31]. Во втором режиме по поверхности капли образуется твердая фаза растворенного вещества. Скорость испарения снижается, при составлении теплового баланса для условий испарения капли учтена теплота кристаллизации. Установлено, что за счет кристаллизации растворенного вещества по поверхности снижается скорость испарения и перепад температуры по поверхности. Эксперименты, проведенные с использованием  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  и  $\text{NaCl}$ , подтвердили предположения [32].

Экспериментально исследовано [32] испарение капель 16 различных жидкостей. Изменяемыми входными факторами были объем капель, концентрация, расход воздуха, температура. По результатам анализа фотоизображений построена карта изменения формы капли солей в условиях испарения (рисунок 1.3). По отклонению положения стеклянной нити на которой помещалась капля определялось изменение массы.

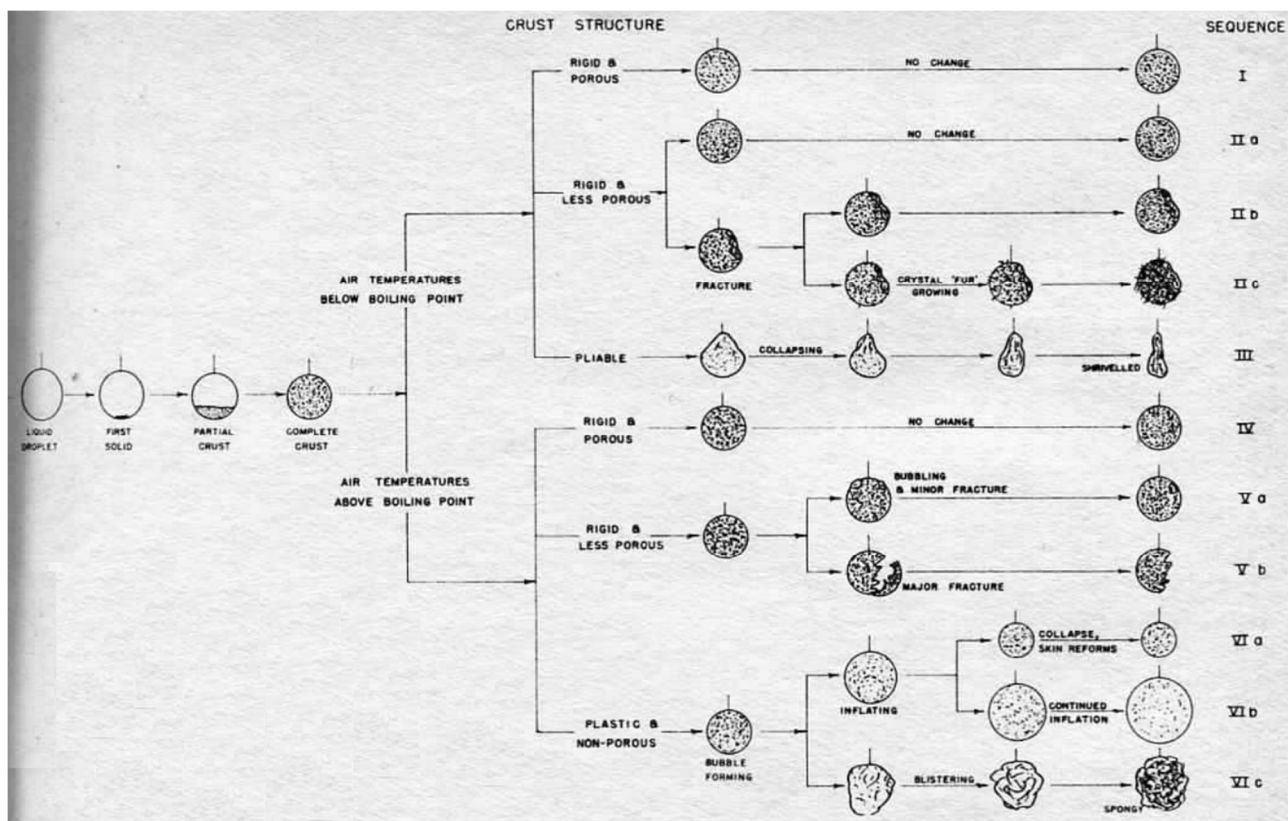


Рисунок 1.3 – Карта изменения формы капли солей в условиях испарения [38].

Выделено два режима испарения [32]. В первом режиме на поверхности капли образуются кристаллы либо кристаллогидраты с последующим их ростом.

Установлено, что при изменении объема капель, начальной концентрации раствора, расхода и температуры воздуха, обдувающего каплю место образования кристаллов (кристаллогидратов) неизменно – нижняя вершина капли.

Начало второго режима характеризуется образованием сплошной оболочки. Последующая “эволюция” формы капли зависит от внешних условий. При температурах воздуха ниже температуры кипения жидкости условно выделено следующее изменение формы капли:

1. Оболочка капли пористая и жидкость испаряется («мерцание» внутри корки).

2. Оболочка неподвижна, менее пористая. Возможно растрескивание оболочки и выделение жидкости наружу. Внутри оболочки возможно образование пузырей.

3. Оболочка гибкая и непроницаемая, что приводит к сужению формы капли. Возможно затвердевание оболочки при высыхании, последнее является причиной разрыва и имплозии.

При температурах воздуха выше температуры кипения жидкости оболочка, образованная кристаллами (кристаллогидратами) более плотная. Скорость испарения уменьшается значительно. Жидкость внутри оболочки закипает, увеличивается давление. Условно выделено следующее изменение формы капли:

1. В оболочке образуются поры, через которые жидкость транспортируется на поверхность и испаряется.

2. Оболочка неподвижная, плотная, за счет повышения давления паров, образованных испарением жидкости внутри оболочки, оболочка разрушается.

3. Оболочка пластична и непроницаема. Давление паров способствует увеличению размеров оболочки. Возможно образования пор на поверхности, через которые жидкость из внутренней полости транспортируется на поверхность.

Установлено [32], что при испарении капель солей наиболее типично образование полый тонкой, сферической формы оболочки. Внешняя поверхность последней обычно гладкая, внутренняя шероховатая и неровная. Выявлено [32], что внутреннее ядро может содержать крупные кристаллы (кристаллогидраты). Стоит отметить [32], что кривые потери веса, полученные с использованием отклонения тонкой стеклянной нити, ионных солевых растворов очень схожи с дистиллированной водой. Как правило, совпадение кривых потери веса для капель воды и растворов солей сохраняется и после образования твердой фазы вплоть до покрывания капель оболочкой. Это наблюдение подтверждено в более поздней работе [33], в которой установлено, что время испарения растворов солей с высокой концентрацией более чем в два раза превосходит время испарения капель дистиллированной воды.

После этой работы появилось много других публикаций о поведении капель, а обзорная статья [34] содержит подробный обзор сильных и слабых сторон многих предлагаемых теоретических описаний. Эти подходы можно разделить на две категории. Первый и наиболее общий подход рассматривает диффузию как растворов, так и растворителей в капле с коэффициентами диффузии, полученным опытным путем. Кроме того, предполагается, что температура капель является однородной, что может быть оправдано для малых чисел Био (отношение теплопередачи внутри и снаружи капли). Самая большая трудность в этих расчетах возникает из-за движущегося граничного условия по мере уменьшения радиуса капли. Альтернативная и более поздняя теория использует инженерный подход, расчётные данные которого хорошо согласуются с экспериментом, но ограничены, поскольку для этого требуется эмпирическая связь между концентрацией капель и давлением паров, которая не известна в широких диапазонах данных.

### 1.3 Механизм роста кристаллов соли и кристаллогидратов “сидячей капли”

В предыдущем разделе рассмотрены режимы испарения подвешенных

капель. Механизм испарения капель на твердых горизонтальных поверхностях другой. Например, может устанавливаться режим пиннинга контактной линии, влияющий на динамику испарения. градиенты температуры в капле, а также движение потока в капле. Последнее в наибольшей степени оказывает влияние на структуру образования и роста кристаллов (кристаллогидратов).

Численно исследовано [35] влияние подложки на процесс кристаллизации. Установлено [36], что скорость зарождения кристаллов на порядок больше в окрестности микрорегиона (тройной линии “газ-жидкость-твердое тело”) капли. В режиме пиннинга нуклеация кристаллов в окрестности регионов возникает за счет линейного натяжения.

Экспериментально исследовано [37] испарение капель воды, содержащих  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{NaCl}$ , а также различные неэлектролиты (растворы альбумина, лимонной кислоты, мочевины, сахара и коллоидное золото). Использовались поверхности с различной смачиваемостью (контактный угол составлял 3, 45 и  $105^\circ$ ). Выявлено, что на гидрофильных поверхностях образуются крупные кристаллы, осажденные в центре капли при высокой начальной концентрации и меньшие кольцеобразные отложения при более низкой концентрации. Установлено, что осажденные кристаллы усиливают пиннинг контактной линии. Отмечено исключение для небольшого промежуточного диапазона начальных значений концентраций, на которых видны кольцеобразные отложения. Характер отложений сильно зависит от состава жидкости.

Известно [38], что межфазовая неустойчивость оказывает влияние на механизм формирования кристаллов (кристаллогидратов). Например, неустойчивость Маллинса-Секерки [38] приводит к тому, что кристаллические выступы растут быстрее, чем остальная часть кристалла. Из-за этого кристаллы приобретают фрактальный или древовидный внешний вид, как снежинки. Кроме того, влияние концентрации растворенного вещества на поверхностное натяжение меняет знак между растворами поверхностно-активных веществ и суспензией частиц (поверхностное натяжение уменьшается с концентрацией) и ионными растворами, для которых наблюдается заметное увеличение



поверхностного натяжения по мере увеличения концентрации. Предложена полуэмпирическая модель [39], которая соответствует данным экспериментального поверхностного натяжения для большого диапазона ионных солей. Объяснение заключается в том, что большинство растворенных солей менее вероятно найти вблизи поверхности жидкости, кроме того, граница раздела энергетически менее благоприятна из-за энтропии. В свою очередь, этот эффект приводит к изменению направления любых концентрационных потоков Марангони, которые изменяют характер отложений. Авторы [39] утверждают, что эффект Марангони можно использовать как способ регулирования скорости испарения NaCl при изменении концентрации (трехкратное уменьшение при четырехкратном увеличении концентрации). Это может быть также связано с меньшим радиусом капель вследствие большей концентрации и, следовательно, более высокого значения поверхностного натяжения.

Исследовано [40] образование кристаллов солей  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и NaCl. Мотивацией к исследованиям послужило отсутствие научного обоснования разрушения пористых пород при испарении на них солевых растворов.

Капли испаряли, на гидрофильных поверхностях (полученных путем промывки стеклянных стекол сульфохромовой кислотой, приводящей к критическому поверхностному натяжению  $\gamma_c \approx 71$  мН/м) и гидрофобных (обработанных раствором фторалкилсилана  $\gamma_c \approx 15$  мН/м). Известно, что NaCl образует кубические кристаллы и не разрушает горные породы.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  имеет две кристаллические формы: мирабилит является термодинамически стабильным гидратированным кристаллом, а также аргид – безводным.

Установлено [40], что кристаллы хлорида натрия находятся преимущественно в контакте с неполярной областью (воздухом или гидрофобным твердым веществом). Также установлено, что динамику кристаллизации определяют межфазные свойства различных кристаллических фаз и силы, определяющие движение потоков внутри капли. Обнаружено [40], что место образования кристаллов (в области микрорегиона или на границе раздела “газ-жидкость”) зависит от химического состава соли и условий

окружающей среды. Позднее в работе [41] проведено сравнение механизма процесса сушки микролитровых капель раствора NaCl, помещенных на инертные полимерные поверхности, покрытые биополимерным муцином. Подтверждено, что взаимодействие между растворенным веществом и подложкой важно для определения морфологии кристалла.

Метастабильные полиморфы из других веществ, которые трудно получить традиционными методами, также образовывались на контактной линии испаряющихся капель. Например, парацетамол [42] и маннит (сахарный спирт) и глицин [43].

Помимо ускорения зародышеобразования метастабильных кристаллических полиморфов, испарение капель можно использовать для создания крупных монокристаллов.

Авторы в [44] неоднократно повторяли цикл конденсации/кристаллизации капли, показанного на рисунке 1.4, путем изменения среды от сухой до влажной. Испаряя насыщенные капли NaCl на гидрофильной поверхности, они обнаружили, что кристаллы образовывались на границе раздела “газ-жидкость” воздух-жидкость, вблизи микрорегиона. Затем они увеличивают влажность, чтобы повторно растворить кристаллы. Во второй цикл кристаллы зарождались позже, но росли быстрее, к центру капли, потому что на границе не было места для размещения больших кристаллов. После третьего цикла образовался монокристалл. Для гидрофобных поверхностей требовалось только два цикла до образования монокристалла, но при добавлении капель воды, а не пара из атмосферы, потребовалось больше циклов. Они утверждали, что примеси, удаляемые из объема в течение каждой кристаллизации, не растворяются снова в капле, когда концентрация уменьшается. Без примесей скорость зародышеобразования ниже, поэтому в конечном итоге она возникает только в одной точке капли, но скорость роста кристалла быстрее из-за более высокого насыщения и отсутствия примесей.



Рисунок 1.4 – Цикл растворимости/кристаллизации используемый в [44].

Показано [45], что очень маленькие (150 пл) капли в значительно большем объеме масла (во избежание насыщения) ведут себя так же, как те, которые испаряться на воздухе. Контактная линия постоянна, контактные углы уменьшались при испарении капель воды,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , и  $\text{CaCl}_2$ .

#### 1.4 Влияние различных факторов на испарение капель

Высокий потенциал фазового перехода капель используется в различных технологических процессах (струйная печать, охлаждение микроэлектроники, тепловые насосы). В таких процессах скорость испарения является ключевым фактором эффективности всей системы (от нее зависят скорости тепло- и массопереноса). Известно, что скорость испарения капель зависит от различных факторов: динамики движения контактной линии [46-49]; структуры [50], и теплопроводности [51] поверхности; конвекции [52]; теплофизических свойств жидкости.

Установлено [53] 2 режима испарения капли: режим постоянного контактного радиуса (пиннинга/CCR) и постоянного контактного угла (ССА) (рисунок 1.5). В режиме пиннинга контактный радиус постоянный, контактный угол уменьшается. Во втором режиме контактный угол постоянный, радиус

уменьшается. На сегодняшний день выделяют четыре режима испарения: пиннинг, постоянный контактный угол, смешанный – одновременное уменьшение контактного угла и радиуса [54], и режим прилипания-проскальзывания – быстрая смена пиннинга и депиннинга контактной линии [55]. Скорость испарения уменьшается при депиннинге капли. Экспериментально и теоретически доказано, что скорость испарения в режиме пиннинга выше, чем при ССА [46, 56].

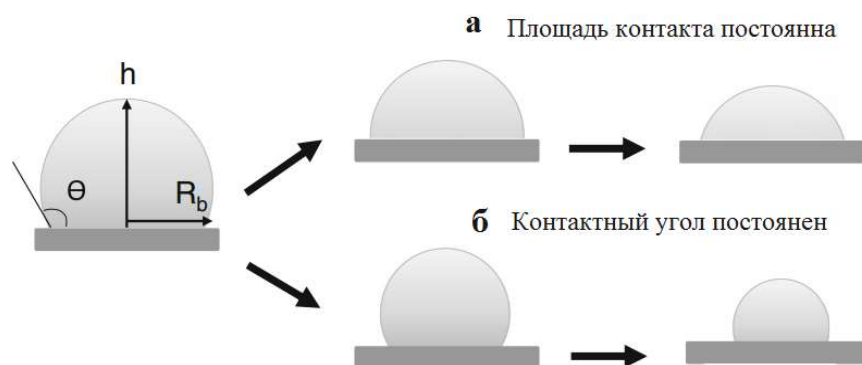


Рисунок 1.5 – Режимы испарения капли: (а) пиннинга, (б) постоянного контактного угла.

Изучено [48,57,58] влияние поверхностных характеристик, морфологии и поверхностной энергии на смачиваемость подложки, движение контактной линии и испарение капель.

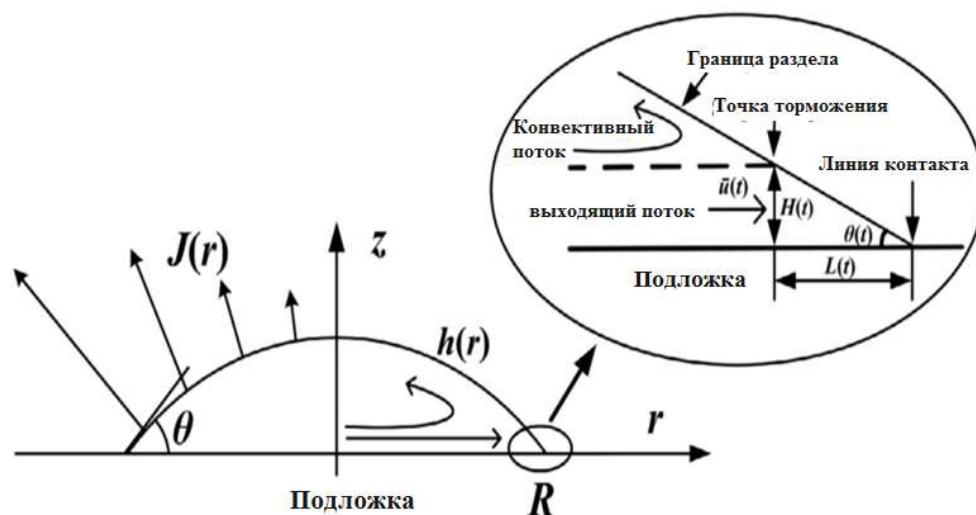
Модификации структуры поверхности и энергии подложки могут резко изменить динамику смачивания и пиннинга-депинга капель. Однако влияние изменения свойств поверхности на общую скорость испарения не вполне понятно из-за разнообразия результатов. Например, в [46] систематическое изменения свойств поверхности не оказывало существенного влияния на удельную скорость испарения.

Теплопроводность подложки существенно влияет на скорость испарения капель [52,59,60]. Вязкость, плотность, теплоемкость и теплопроводность жидкости теплофизические свойства оказывающее наибольшее влияние на процесс испарения капель.

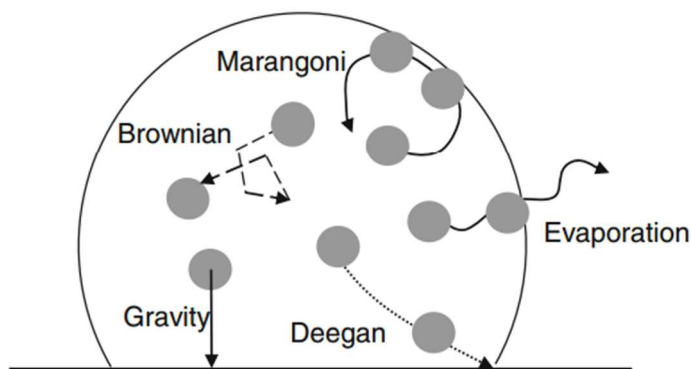
Известно [47], что увеличение вязкости жидкости приведет к уменьшению внутренней конвекции, усилит пиннинг контактной линии и снизит скорость испарения. На скорость испарения влияют различные примеси: поверхностно-активные вещества (ПАВ) [31], био-молекулы [61], и коллоидные частицы [58-63]. ПАВы и коллоидные частицы уменьшают скорость испарения, величину конвективных потоков.

### 1.5 Механизм испарения капель однокомпонентных жидкостей и солей

Эффект кофейных колец заключается в том, что при высыхании капли некоторой взвеси частицы располагаются не равномерно по поверхности, которую занимала капля, а концентрируются к границам. Впервые количественно описан в [64,65]. Установлено, что капиллярный поток, вызванный испарением, вынуждает взвешенные частицы двигаться к (закрепленной) периферии капли, где они собираются, образуя “ободок”. Если контактная линия “закреплена”, контактный угол капли уменьшается во время испарения растворителя. Неравномерный поток ( $J$ ) возникает, когда капля сжимается (рисунок 1.6), и увеличивается от центральной области капли к ее периметру при уменьшении контактного угла. Отслеживая траекторию движения микросфер полистирола в воде, определена зависимость между усредненной по глубине скоростью  $v(r)$  и массой кольца  $M(R, t)$ , которая может быть использована для прогнозирования морфологии кольца испаряющейся капли. Независимо от химических свойств растворенного вещества и подложки, осаждение, вызванное капиллярным потоком, можно контролировать и прогнозировать. На рисунке 1.6 предпосылкой для образования кольца является закрепление капли на границе раздела фаз, создавая ограничение для распространения и накопления частиц.



(а)



(б)

Рисунок 1.6 – Схематичное изображение потоков(а) и (б) сил в испаряющейся капле [64].

Исследовано [66] влияние напряжений Марангони на микропоток в испаряющихся “сидячих” каплях. Поток Марангони, вызванный скрытой теплотой испарения, представляет собой циркуляционный поток, возвращающий частицы обратно в центральную область. Стоит отметить, что поток Марангони противодействует капиллярному потоку, транспортирующим частицы от центральной границы. Подавление потоков Марангони требуется для образования “кофейных колец”. Установлено [66,67], что пиннинг “сидячей” капли это квазистационарное состояние. Вычислены [66, 67] поля скорости испарения методом конечных элементов для напряжений Марангони при разных контактных углах. Градиенты поверхностного натяжения, вызванные скрытой

теплотой растворенного вещества, влияют на структуру осаждения на подложке. Положительное число Марангони с большим контактным углом может привести к направленному радиальному потоку внутрь капли, в то время как отрицательное число Марангони при малом краевом угле приводит к наружному потоку.

Разнообразие экспериментальных систем, сочетающих различные растворители и растворенные вещества изучены. Исследованы частицы, в том числе наносферы и микросферы из полистирола [68], наночастицы золота [69], коллоидный кремнезем [70] и углеродные нанотрубки [71] в водных растворах. Кроме того, изучены органические молекулы биожидкостей, включая лизоцим, ДНК [8] и сывороточный альбумин [71].

Предложено несколько методов, для контроля формирования рисунка: испарительный поток [64], контактная линия при депиннинге [64,72], взаимодействие частиц с подложкой [73] и фазовые диаграммы [74]. Разработана [75] численная модель, сочетающая в себе учет динамики жидкости, перенос тепла и частиц для моделирования образования отложений во время испарения коллоидного раствора.

Капли размером менее 1 мм изучены в [76,77]. Исследованы капли микролитового объема для определения минимального диаметра образования кофейного кольца [77]. При размерах капель менее  $\sim 1$  мм преобладает поверхностное натяжение, гравитационными силами можно пренебречь. Использовались водные растворы с добавлением шариков из полистирола трех разных диаметров для исследования образования отложений в форме колец различных размеров. Отложения с диаметром менее  $\sim 10$  мкм не имели структуры кофейного кольца. Минимальный размер образующегося кольцевого осадка объяснялся тем, что скорость испарения жидкости превышала скорость диффузии частиц [77].

Исследовано [78] испарение капель воды, раствора соли NaCl, CaCl<sub>2</sub>, LiBr. Основная причина выделения в нижней, обращенной к поверхности нагрева, части растворенного сфероиды выделений соли является формирование

диффузионного пограничного слоя с большой концентрацией растворенного вещества. Это объясняется тем, что в паровую фазу переходит практически только растворитель. Возникающие в неоднородном концентрационном поле градиенты химических потенциалов вызывают встречные потоки компонентов раствора в направлении нормали к поверхности раздела фаз: частицы растворителя (воды) движутся к поверхности, а частицы растворенного вещества (соли) из концентрационного пограничного слоя вглубь раствора. Молекулярная диффузия в этом случае не позволяет обеспечивать активное проникновение частиц раствора из объема сфероида в узкую зону испарения (пограничный концентрационный слой) вблизи поверхности нижней части сфероида.



## Выводы по первой главе

По результатам проведенного анализа публикаций составлена схема (рисунок 1.7), показывающая наиболее распространённые методы измерения контактного угла. Выявленные различия при испарении подвешенных и «сидячих» капель водных солевых растворов сведены в таблицу 1.1. В таблицу 1.2 факторы, влияющие на механизм испарения «сидячей» капли.

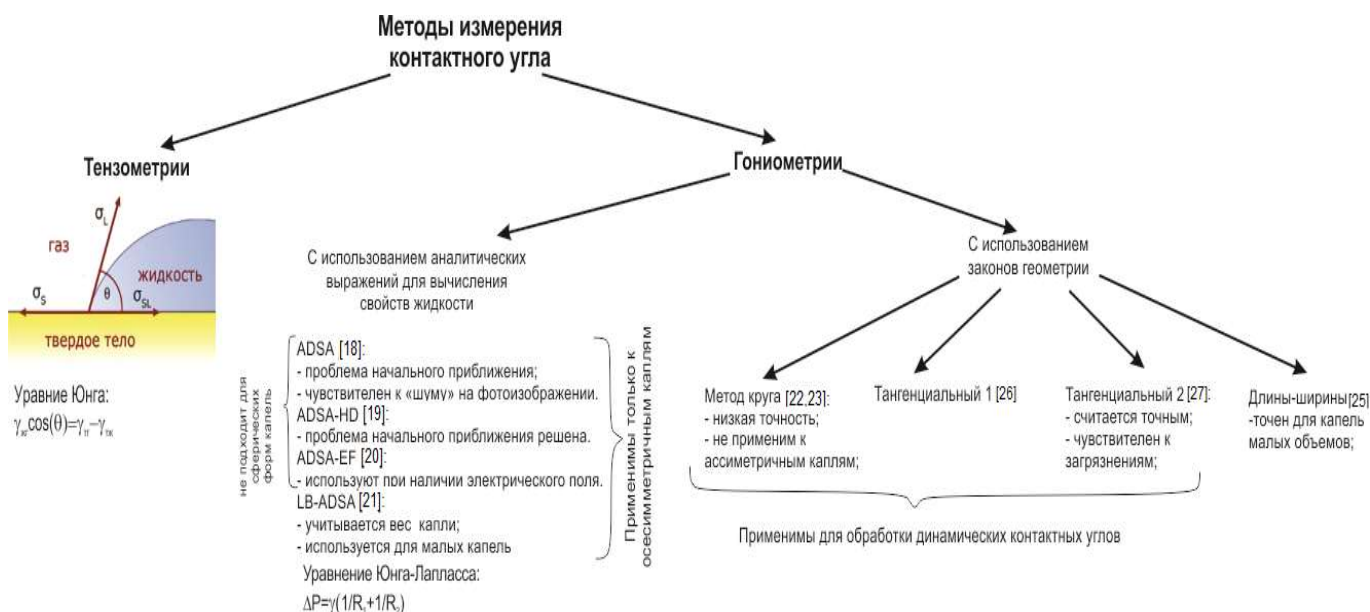


Рисунок 1.7 – Методы измерения контактного угла.

Таблица 1.1 – Различия при испарении подвешенных и «сидячих» капель.

	Подвешенная капля	«Сидячая капля»
Режимы испарения	Выделено [31] 2 режима: 1. Испарение только растворителя (уменьшение площади поверхности, перепад температуры по поверхности капли). 2. Образование твердой фазы твердого вещества (снижение скорости испарения, перепада температуры по поверхности).	Капля испаряется в режиме пиннинга, с последующим образованием кристаллогидратов или кристаллов соли
	Выделено [32] 2 режима: 1. Образование кристаллов или кристаллогидратов соли 2. Образование сплошной оболочки на поверхности капли.	
	Температурах воздуха ниже температуры кипения жидкости	

	<p>1. Оболочка капли пористая и жидкость испаряется («мерцание» внутри корки).</p> <p>2. Оболочка неподвижна, менее пористая. Возможно растрескивание оболочки и выделение жидкости наружу. Внутри оболочки возможно образование пузырей.</p> <p>3. Оболочка гибкая и непроницаемая, что приводит к сужению формы капли. Возможно затвердевание оболочки при высыхании, последнее является причиной разрыва и имплозии.</p>	<p>1. В оболочке образуются поры, через которые жидкость транспортируется на поверхность и испаряется.</p> <p>2. Оболочка неподвижная, плотная, за счет повышения давления паров, образованных испарением жидкости внутри оболочки, она разрушается.</p> <p>3. Оболочка пластична и непроницаема. Давление паров способствует увеличению размеров оболочки. Возможно образования пор на поверхности, через которые жидкость из внутренней полости транспортируется на поверхность.</p>	
Механизм образования солей	<p>Кристаллы соли образуются в нижней части капли. Если капля не вращается оболочка капли растёт симметрично вертикально в верх. При вращении капли, кристаллы соли повторно формировались на предыдущей позиции.</p>		<p>Первоначально кристаллы образуются на линии трёхфазного контакта «газ-жидкость-твёрдое тело». Капля покрывается оболочкой от периферии к центру капли.</p>

Таблица 1.2 – Факторы, влияющие на механизм испарения «сидячей» капли

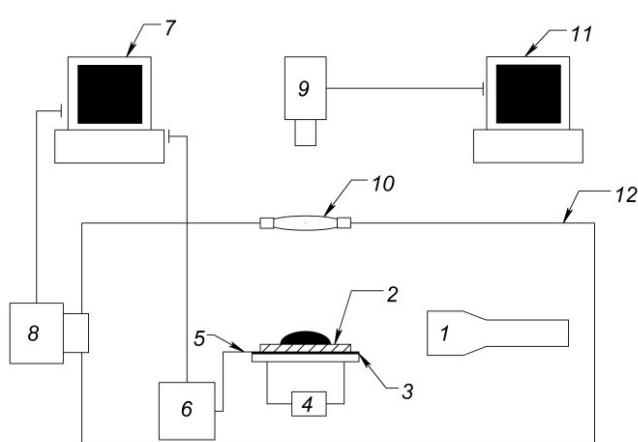
Факторы	Влияние фактора
Влияние поверхности:	Скорость образования кристаллов соли на порядок больше в окрестности микрорегиона (тройной линии «газ-жидкость-твёрдое тело») капли [36].
Гидрофильность	Образуются крупные кристаллы, осажденные в центре капли, при высокой начальной концентрации и меньшие кольцеобразные отложения при более низкой концентрации [36].
Гидрофобность	Кристаллы соли NaCl находятся преимущественно в контакте с неполярной областью [44]
Теплофизические свойства	Теплопроводность подложки существенно влияет на скорость испарения капель [55,67,68].
Межфазовая неустойчивость Маллинса-Секерки	Кристаллы приобретают фрактальный или древовидный внешний вид [38].

Режим испарения	Экспериментально и теоретически доказано, что скорость испарения в режиме пиннинга выше, чем при ССА [46, 47]. Скорость испарения уменьшается при депиннинге капли.
Свойства жидкости	Увеличение вязкости жидкости [49] приведет к уменьшению внутренней конвекции, усилит пиннинг контактной линии и снизит скорость испарения. ПАВы и коллоидные частицы уменьшают скорость испарения, величину конвективных потоков [62-63]. С ростом концентрации скорость испарения падает [39].
Химический состав растворенного вещества	Влияет на место образования кристаллов (в области микрорегиона или на границе раздела “газ-жидкость”) [40]
Капиллярный поток	Вынуждает взвешенные частицы двигаться к периферии капли, дополнительно «закрепляя» ее [64,65].

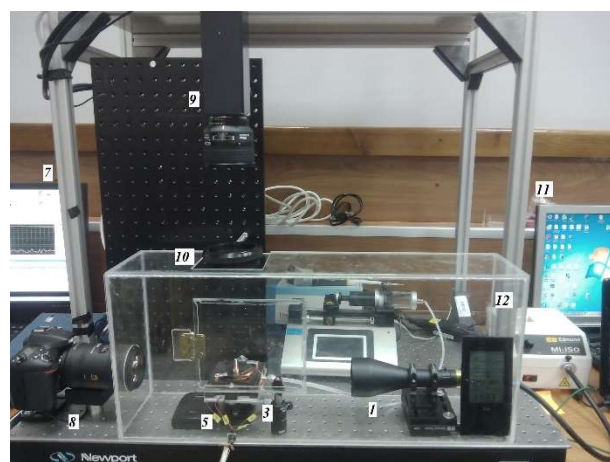
## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ $\text{CaCl}_2$ , $\text{LiCl}$ , $\text{LiBr}$ , $\text{NaCl}$ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ В УСЛОВИЯХ ВАРИАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРЕВА

### 2.1 Описание экспериментальной установки

Эксперименты по изучению процесса испарения капель водно-солевых растворов  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{NaCl}$  проведены с использованием теневого метода. На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема и фотография установки.



(а)



(б)

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки: 1 – источник света; 2 – подложка; 3 – рабочий столик; 4 – элемент Пельтье; 5 – термопары; 6 – контроллер; 7, 11 – персональный компьютер; 8 – фотоаппарат, 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – линза, 12 – бокс.

Рабочий участок состоит из столика, расположенной на нем подложке, элемента Пельтье, соединенного с источником питания, и двух термопар, закрепленных под подложкой. Одна термопара устанавливалась на разогретую поверхность. Подложка крепилась к столику с помощью болтового соединения и металлических уголков. Плоскопараллельный свет от источника 1 освещал каплю, лежащую на поверхности подложки 2. Фотографии теневых изображений

процесса испарения получены фотоаппаратом 5 NIKON D7100 с макрообъективом Sigma 105mm f/2.8G IF-ED AF-S.

Для контроля симметричности капли использовались высокоскоростная видеокамера 6 (Fastvideo) с частотой съемки 500 Гц при размере кадра 1280x1024 пикселей и линза 7, которые располагались над рабочим участком.

Капля «сажалась» на разогретую до 80°C алюминиевую поверхность в произвольно выбранную точку электронным одноканальным дозатором Ленпипет Степпер Thermo Scientific.

Экспериментальная установка была изолирована от внешних воздействий (конвекции, излучения) прозрачным боксом 12, изготовленным из полимерного стекла толщиной 3мм. За счет этого обеспечивалось постоянство условий теплообмена на поверхности капли.

Элемент Пельтье использовался для нагрева подложки до необходимой температуры пропусканием через него электрического тока. В установке применяется термоэлектрический преобразователь типа А-2ТМ 8.0-127/126-1.4 HR1. Характеристики термоэлектрического модуля представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики термоэлектрического модуля

Тип	$I_{\max}$ , А	$U_{\max}$ , В	$Q_{\max}$ , Вт	$\Delta T_{\max}$ , °С	Размеры, мм
А-2ТМ 8.0-127/126-1.4 HR1	8	10	32	70	40x40x6.3

Элемент Пельтье присоединялся к источнику питания постоянного тока GPR-1820HD. Последний обеспечивает высокую стабильность и малый уровень пульсаций выходного напряжения и тока. Максимальные значения выходных параметров: напряжения – 18В, тока – 20А.

Измерение температуры поверхности подложки проводилось с помощью 16-канального модуля ввода сигналов термопар NI USB-9214. Для регистрации температур использовались 3 термопары (Omega 5TC-ТТ-К-36-36) “хромель-алюмель”, изготовленные из проволоки диаметром 0,13 мм сплава марки

ALOMEGA (следующего химического состава: никель (Ni) – 95%; алюминий (Al) – 1%; марганец (Mn) – 2%; кремний (Ni) – 2) и никелевого термоэлектродного сплава марки CHROMEGA (следующего химического состава: хром (Cr) – 10%; никель (Ni) – 90%). Погрешность термопар 0,1 °С. Схема их расположения представлена на рисунке 2.2.

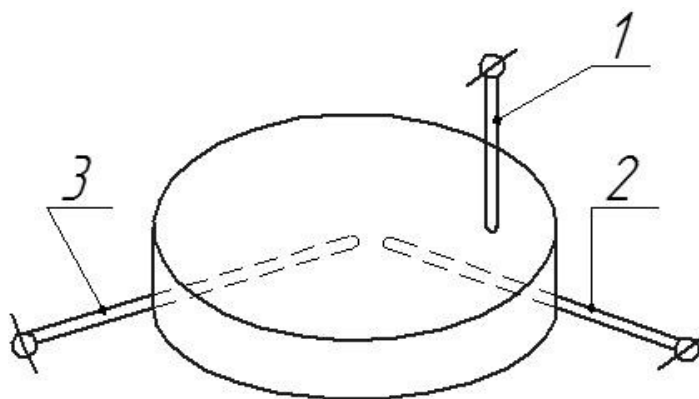


Рисунок 2.2 – Схема расположения термопар: 1 – термопара, установленная на поверхности подложки; 2, 3 – термопары, установленные под подложкой.

Во время работы контроллер NI USB-9213 передает компьютеру, текущие значения контролируемых величин по интерфейсу RS-232. Передача данных осуществляется по запросу компьютера в соответствии с используемым протоколом обмена. С помощью программного обеспечения LabVIEW (National Instruments США), на монитор компьютера выводилась графическая зависимость изменения температур. На рисунке 2.3 представлены графические зависимости изменения температур во времени.

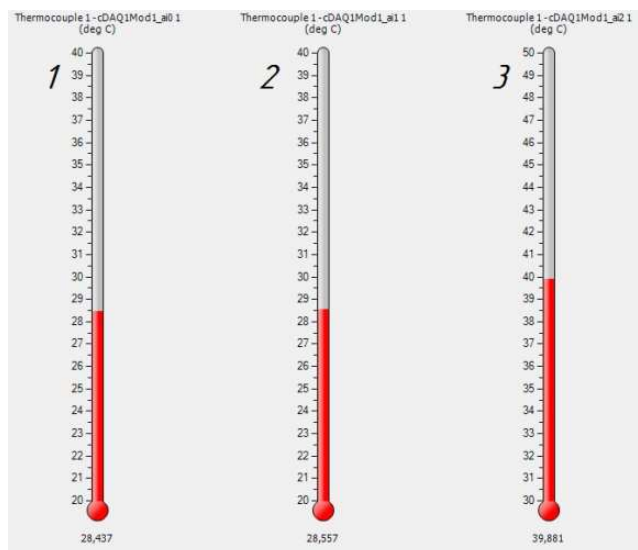


Рисунок 2.3 – Изменение температуры: окружающего воздуха (1), (2), (6); под подложкой (3), (4) и на поверхности подложки (5), регистрируемое термопарами

Система фотосъемки на базе фотокамеры NIKON D7100 состоит из:

1. Фотокамеры NIKON D7100
2. Макрообъектива Nikon 105mm f/2.8G IF-ED AF-S VR Micro-Nikkor
3. Кабеля USB
4. Блока питания камеры

Фотокамера соединена с компьютером.

Система видеосъемки на базе скоростной камеры Fastvideo-500M состоит

из:

1. Скоростной камеры Fastvideo-500M
2. Фрейм-граббера PCI-Express
3. Кабеля CameraLink
4. Программного обеспечения Fastvideo Lab
5. Блока питания камеры

Данные с видео сенсора передавались контроллером камеры в фрейм-граббер по кабелям CameraLink. Данные из него записывались в оперативную память ПК, откуда они выводились на экран монитора.

## 2.2 Описание теневой системы

Оптическая схема теневой системы представлена на рисунке 2.4. Штрих-пунктирная линия показывает оптическую ось. Для освещения капли плоскопараллельным светом использовался комплекс осветительного оборудования 2. Он состоит из источника света с набором линз. Фотоаппарат 1 расположен на расстоянии от подложки 3, равном фокусу макрообъектива.

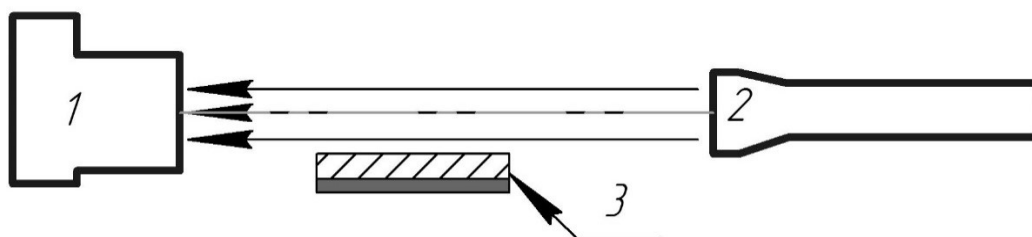


Рисунок 2.4 – Оптическая схема теневого метода.

В системе используется фотокамера NIKON D7100 с разрешением 6000x4000 пикселей и возможностью серийной съемки до 10 кадров в секунду. Для контроля симметричности капли используется высокоскоростная камера Fastvideo-500M, позволяющая записывать со скоростью до 500 кадров в секунду с разрешением 1280 x 1024 пикселей и до 10 000 изображений в секунду при меньших разрешениях. Пространственное разрешение метода составляет около 10 мкм/пиксель.

## 2.3 Методика проведения эксперимента

### 2.3.1 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований

Цель планирования эксперимента – разработка последовательности действий по получению наибольшей информации при наименьших затратах времени. Заключается в выборе числа и условий проведения экспериментов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

В работе проведен активный эксперимент,

Последовательность проведения эксперимента:

1. Разработана схема проведения исследований;



2. Осуществлена реализация эксперимента по заранее составленному плану;

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 экспериментов;

2. подтверждение или опровержение гипотез о возможной реакции системы на изменяющиеся факторы;

3. оптимизация процесса.

При проведении эксперимента варьировались факторы: мощность нагрева подложки, ее температура, концентрация и химический состав водного раствора соли, объем капли. Т.е. произведен активный многофакторный эксперимент.

### 2.3.2 Выбор области изменения основных факторов

В работе исследовался процесс испарения капли водно-солевого раствора

Для планирования эксперимента необходимо установить круг размерных факторов воздействия и выходных переменных, которые определяют процесс. Факторы должны быть управляемыми, а результаты экспериментов воспроизводимыми. В ходе планирования эксперимента часто изменяется сразу несколько факторов. Основное требование – совместимость. При планировании эксперимента важна возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. Если это условно невыполнимо, то невозможно планировать эксперимент [79].

При выборе области определения факторов особое внимание уделяют на выбор нулевой точки, или нулевого (основного) уровня. Выбор нулевой точки эквивалентен определению исходного состояния объекта исследования. Необходимо определить основной уровень (+/-) для каждого фактора, в пределах которого ставится исследование. После установления нулевой точки выбирают интервалы варьирования факторов.

Интервалом варьирования факторов называется некоторое число, прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровни фактора. От числа уровней зависят объем эксперимента и эффективность оптимизации. В общем виде зависимость числа экспериментов от числа уровней факторов имеет вид:

$$N = p^k,$$

где  $N$  – число экспериментов;

$p$  – число уровней факторов;

$k$  – число факторов.

Для определения интервалов варьирования факторов проведен предварительный эксперимент. По результатам предварительного эксперимента определены основные значения различных факторов на шести уровнях (табл. 2.2).

Напряжение источника ограничено с одной стороны максимально возможной мощностью источника, а с другой стороны необходимостью обеспечить достаточно высокую скорость испарения капли.

Варьирование объема капли ограничено с одной стороны погрешностью шкалы измерения дозатора, с помощью которого наносится капля, а с другой стороны – разрешающей способностью объектива фотоаппарата на установке. Выбор материала подложек ограничен коррозионной активностью солей. Фактор концентрации раствора ограничен приборной погрешностью весов, использованных для приготовления раствора, и степенью насыщения раствора солью. Данные по основным факторам воздействия в эксперименте сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Факторы

Материал	-	Алюминий гост 21488-97(АМГ6)
Температура поверхности	°С	40, 60, 80
Объем	мкл	10, 20, 30, 40, 50, 60
Жидкость	-	Дистиллированная вода, водные растворы солей LiBr (10, 30 %), CaCl <sub>2</sub> (10 %), LiCl (10 %), NaCl (10 %)

Выходными параметрами являются:

1. Скорость испарения капли;
2. Геометрические характеристики капли (контактный угол, диаметр, высота капли)

Исключение случайной погрешности обеспечивалось повторением экспериментов.

### 2.3.3 Подготовка к проведению эксперимента

В экспериментальных исследованиях использовались дистиллированная вода, водные растворы солей  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{NaCl}$ . Капли наносились с помощью шприца-дозатора ЛенПипет на нагретые алюминиевые подложки.

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности. Шероховатость определяют по профилю поверхности, представляющему собой ломаную линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей [80]. Профиль поверхности рассматривают на базовой линии и в его пределах оценивают параметры шероховатости [80].

В рекомендациях Международного комитета ИСО/Р-468 «Шероховатость поверхности» приняты две системы отсчета высот неровностей: системы  $M$  и  $E$ . В системе  $M$  отсчет высоты неровностей производится от средней линии профиля, а в системе  $E$  – от огибающей линии, лежащей вне контура шероховатости поверхности. В Российской Федерации при стандартизации шероховатости в основу принята система отсчета  $M$  [81].

Термины и определения основных понятий по шероховатости установлены ГОСТ 25142-82 [82], а параметры и характеристики регламентируются ГОСТ 2789-73 [83] и представлены на рисунке 2.5.

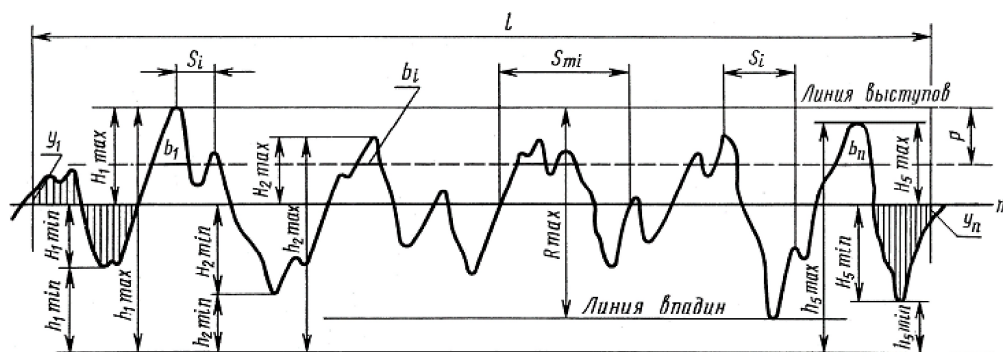


Рисунок 2.5 – Параметры шероховатости поверхности

Для оценки и нормирования шероховатости поверхности известно около 30 параметров. ГОСТ 2789-73 [83] и 27964-88 [84] регламентируют шероховатость поверхности шестью параметрами:

$R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;

$R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам;

$R_{max}$  – наибольшая высота профиля;

$S_m$  – средний шаг неровностей;

$S$  – средний шаг местных выступов профиля;

$t_p$  – относительная опорная длина профиля, где  $p$  – значение уровня сечения.

Оценку шероховатости проводят количественными приборами, основанными на измерении неровностей поверхности. Для определения основных размеров шероховатости поверхности использовался профилометр “Micro Measure 3D station”. На рисунке 2.6 представлен внешний вид измерительной установки. В таблице 2.3 представлены технические характеристики профилометра.

Таблица 2.3 – Характеристики “Micro Measure 3D station”

Размер зоны сканирования, мм	X=100, Y=100, Z=50
Минимальный размер шага (X и Y), мкм	0,1
Максимальная скорость перемещения по осям X и Y, мм/сек	20

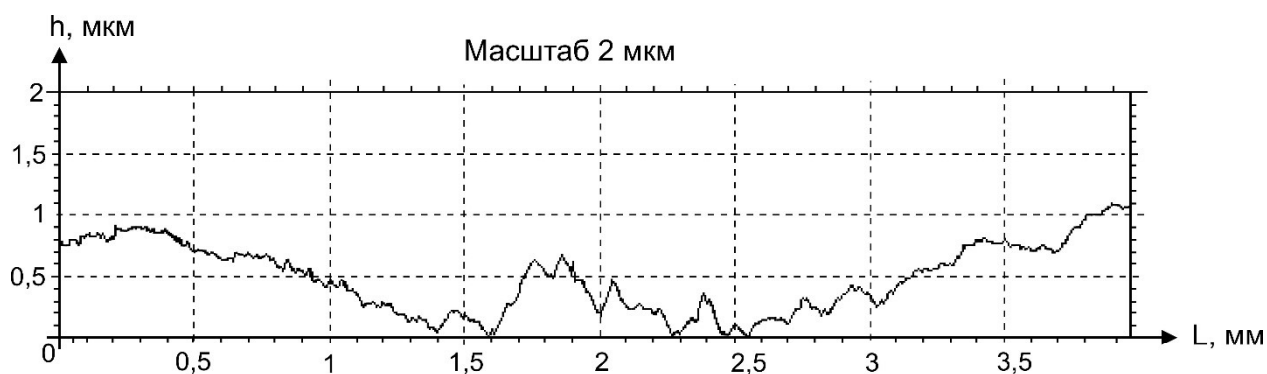
Диапазон измеряемых глубин при использовании различных сенсоров CHR150N2/разрешение по оси Z, мкм	(0-20)/0,001; (0-80)/0,003; (0-300)/0,01
Максимальная скорость сбора данных, точек/сек	1000



Рисунок 2.6 –Фотоизображение “Micro Measure 3D station”

Особенностью установки является разработанный фирмой “STIL” (Франция) бесконтактный метод измерения шероховатости оптическими датчиками. Для прямых измерений применяют технологию вычитания двух разных отражений из оптически прозрачной пленки, либо интерферометрический метод для тонких пленок. Для оптически непрозрачных пленок используется метод измерения высоты шага для расчета толщины пленки в том случае, если часть поверхности не имеет покрытия.

Профиль подложки полученный с помощью “Micro Measure 3D station” представлен на рисунке 2.7.



Параметры шероховатости:

$R_a = 0,0558$  мкм;  
 $R_q = 0,0717$  мкм;  
 $R_p = 0,177$  мкм;  
 $R_v = 0,158$  мкм;  
 $R_t = 0,452$  мкм;  
 $R_{sk} = 0,407$  мкм;  
 $R_{ku} = 5,63$  мкм;  
 $R_z = 0,335$  мкм.

Рисунок 2.7 – Профиль поверхности подложки.

Разрешающая способность человеческого глаза составляет около 0,1 мм. Чтобы увидеть объекты меньше этого предела, необходимо использовать оптические или электронные микроскопы.

Электронные микроскопы бывают сканирующими (SEM) и просвечивающими (TEM). SEM используются в основном для наблюдения структуры поверхности образцов при высоком увеличении. TEM используются для наблюдения внутренней структуры образца при высоком увеличении. В исследованиях использовался микроскоп типа SEM.

#### Особенности SEM

1. Все твердые тела можно наблюдать в диапазоне от низких до высоких увеличений.
2. Глубина фокуса больше чем для оптических микроскопов, что позволяет получать стереоскопические изображения.
3. Комбинация с рентгеновским анализатором позволяет проводить анализ состава микроскопической области.

#### Принципы и устройство SEM

SEM является инструментом, который сканирует поверхность образца тонким сходящимся лучом электронов в вакууме, собирает информацию (сигналы), исходящую в то же время с образца и представляет увеличенное изображение поверхности образца на экране монитора.

При облучении образца лучом электронов в вакууме, с образца генерируются вторичные электроны, характеристическое рентгеновское излучение и другие сигналы (рисунок 2.8). SEM использует сигнал для формирования изображения в основном вторичные и обратно отраженные электроны. Вторичные электроны генерируются вблизи поверхности образца, и изображение во вторичных электронах, полученное при их детектировании, отображают тонкую топографическую структуру образца.

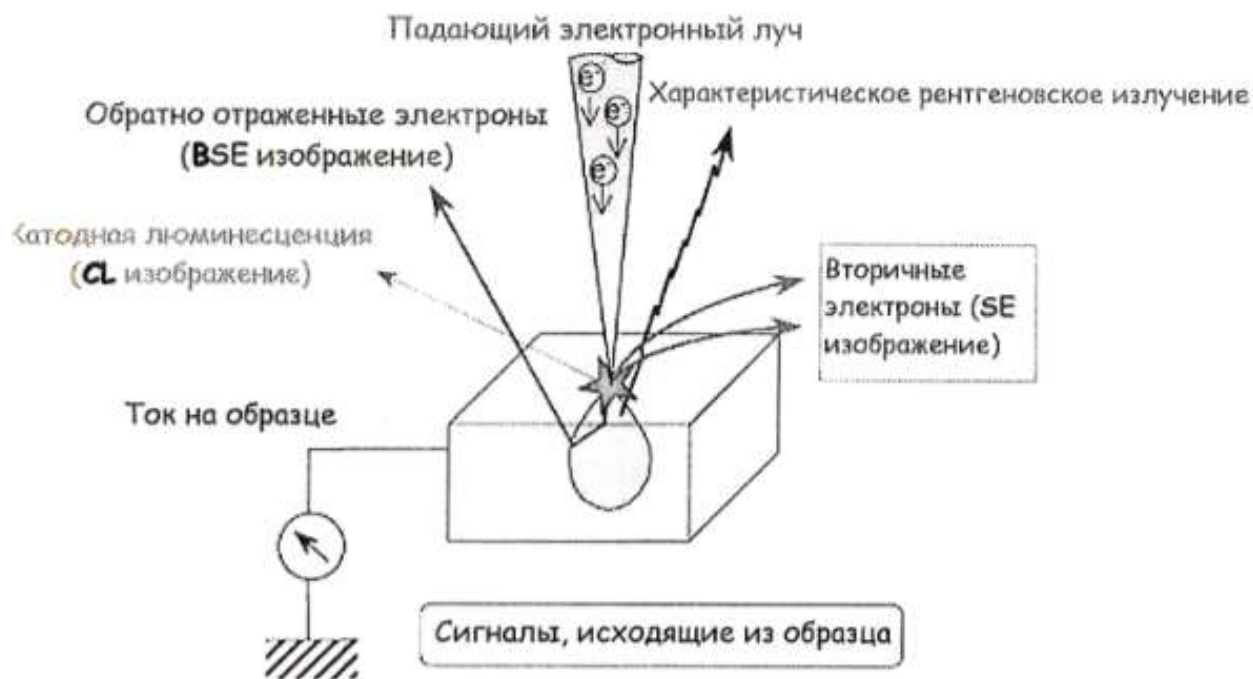
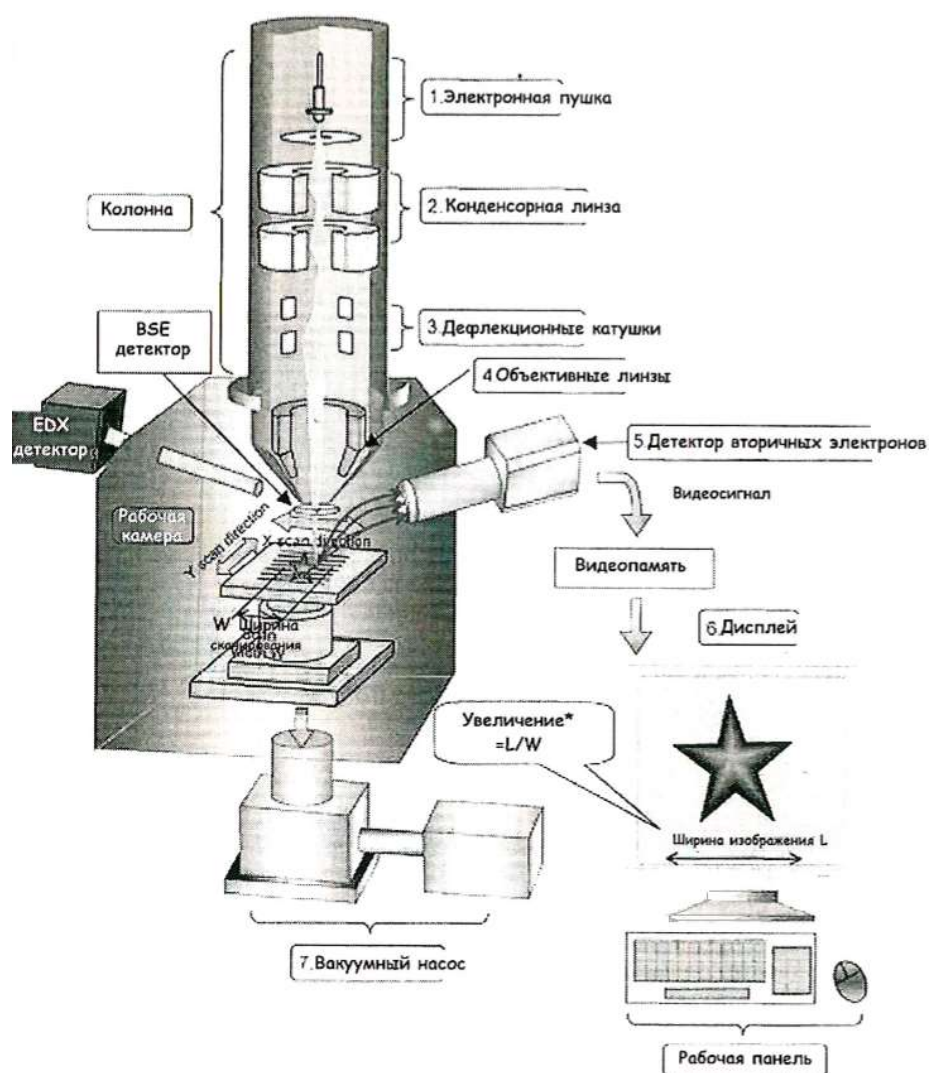


Рисунок 2.8 – Принцип действия электронного микроскопа SEM

Обратно отраженные электроны, это те, которые отражаются при столкновении с атомами, содержащимися в образце, и число этих электронов зависит от состава (среднего атомного номера, ориентации кристалла и т.п.) образца. Поэтому изображение в обратно отраженных электронах отображает композиционное распределение на поверхности образца.

SEM состоит из колонны, рабочей камеры, дисплея и секции управления рисунке 2.9(a). Внутри колонны поддерживается высокий вакуум, и электронный пучок, производимый электронной пушкой, (до столкновения с образцом) преобразуется электромагнитными линзами в тонкий луч (конденсорные и объективные линзы). Путем приложения сигнала сканирования на дефляционные катушки электронный луч сканирует поверхность образца. Рабочая камера оборудована предметным столиком, имеющим гониометр, детектором вторичных электронов для сбора сигналов с образца, и, в зависимости от инструмента детектором обратно отраженных электронов и рентгеновским детектором. Снизу к рабочей камере подсоединён вакуумный насос для поддержания высокого вакуума внутри колонны и рабочей камеры.



(a)

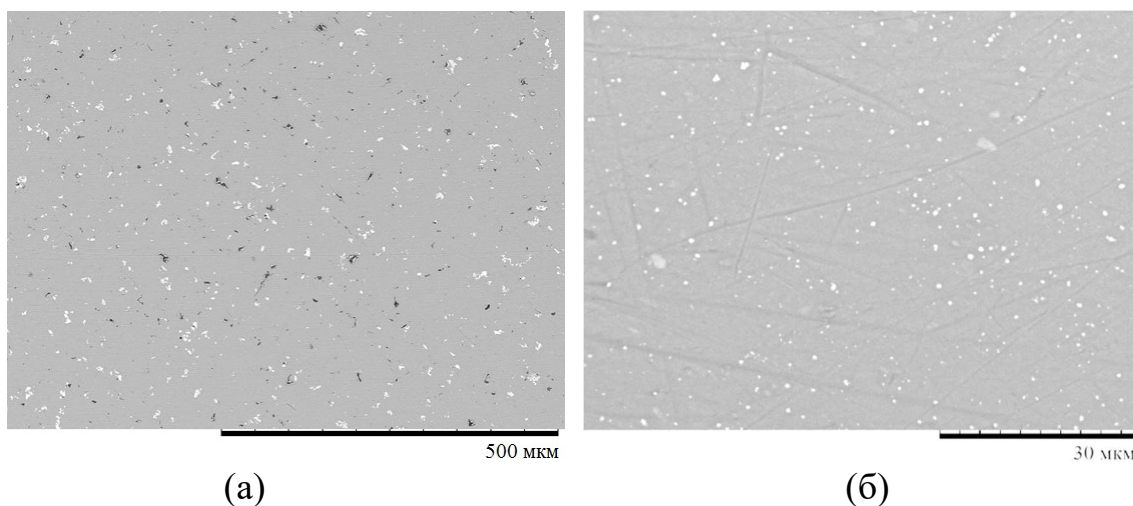




(б)

Рисунок 2.9 – (а)схематичное изображение; (б) внешний вид настольного сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000.

Фотоизображения микроструктуры алюминиевой поверхности, полученные с помощью настольного сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 представлены на рисунке 2.10.




(а)

(б)

Рисунок 2.10 – фотоизображение микроструктуры алюминиевой подложки при 200 (а) и 2000 (б) кратном увеличении.

Описание физико-химических свойств подложек представлено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Физико-химические свойства подложки.

	<p><b>Аллюминий АМГ 6</b></p> <p>Плотность <math>2.7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}</math>,</p> <p>Теплоемкость <math>24.35 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}</math>,</p> <p>Коэффициент теплопроводности <math>237 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}</math>,</p> <p>Твердость по Бриннелю <math>2.448 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}</math>,</p> <p>Модуль Юнга <math>70 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}</math>,</p>
---	--

## 2.4 Порядок проведения экспериментов

1. Исследуемая подложка, предварительно обработанная изопропанолом с целью очистки от загрязнений, закрепляется на столике и выравняется в горизонтальной плоскости с помощью гониометра.

2. Подложка нагревается с помощью элемента Пельтье до установления стационарного режима. Температура под подложкой и на ее поверхности регистрируется установленными термопарами. График изменения температуры во времени строится с помощью программного обеспечения LabView и выводится на монитор компьютера.

3. С помощью дозатора Ленпипет капля заданного объема помещается на нагретую подложку.

4. Далее осуществляется фотосъемка со скоростью 1 кадр в секунду,

5. Эксперимент продолжается до полного испарения капли.

6. Обработка данных:

- Выборка кадров (при температуре  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  – использовался каждый 25 кадр,  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  – 20,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  – 10-15).
- В программном обеспечении XnView происходила подготовка фотокадров (конвертация в формат .bmp, обрезка, преобразование в серое);

- Обработка кадров в программе Drop Shape Analysis (DSA).
- Построение графических зависимостей в программном обеспечении OriginLab по результатам обработки.

## 2.5 Обработка экспериментальных данных

Теневое изображение капли обрабатывается с помощью программного обеспечения DSA (рисунок 2.11). Компьютерная программа DSA (рисунок 2.11) позволяла определить краевой угол смачивания, а также линейные размеры капли. Форма капли оценивалась следующими методами:

1. Метод Юнга – Лапласа.
2. Тангенциальный метод 1.
3. Тангенциальный метод 2.

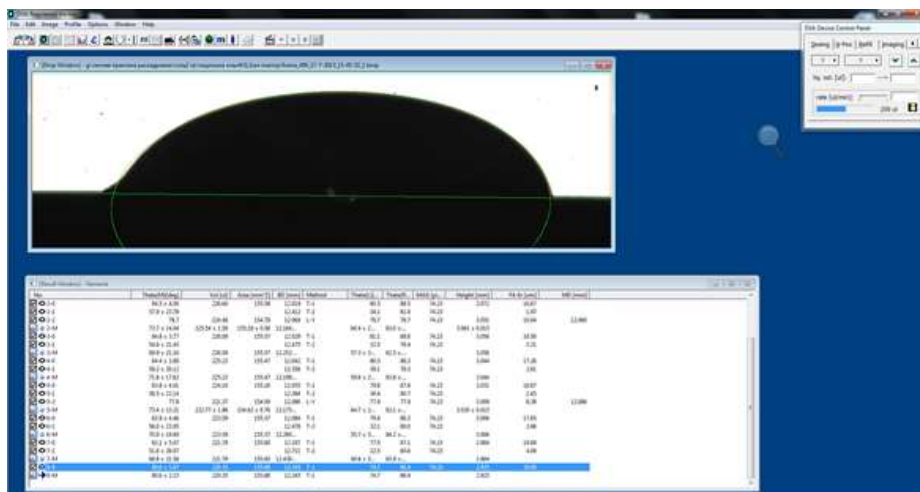


Рисунок 2.11 – Интерфейс программы Drop Shape Analysis.

## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью выполнения данного раздела является экономическое обоснование научно-исследовательской работы. Оценка является комплексной и произведена в разрезе экономической эффективности, социальной значимости и других аспектов, т.к. проведение экспериментальных исследований испарения капель водно-солевых растворов требует привлечения финансовых затрат и других ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

### 4.1 Планирование работ и оценка времени на их выполнение

Планирование работ включает в себя: составление перечня работ; определение участников каждой отдельной работы; установление продолжительности работ.

Составим перечень работ, которые необходимо произвести для достижения цели. Сведения об этапах, их продолжительности и сотрудниках, работающих над выполнением проекта, представлены в таблице 4.1.

Над выполнением работы трудятся: НР – научный руководитель (15 разряд); И – инженер (10 разряд).

Таблица 4.1 – Определение перечня работ и оценка времени на их выполнение

№ п/п	Наименование работ	Исполн-ль	t, дн
1	Выдача и получение задания	И НР	1
2	Теоретические исследования	И	12
3	Перевод иностранной литературы	И	7
4	Распределение литературы по темам	И	2
5	Обзор литературы по испарению капель чистой жидкости	И	7
6	Обзор литературы по испарению капель водно-солевых растворов	И	7
7	Разработка методики проведения экспериментальных исследований	И НР	2

8	Подготовка исследуемых подложек и водно-солевого раствора	И	1
9	Установка и подключение оборудования	И	1
10	Проведение серии предварительных экспериментов по испарению капель водно-солевого раствора	И	7
11	Обработка экспериментальных данных	И	14
12	Определение области изменения основных факторов (температуры поверхности, объема капли, концентрации раствора)	И	1
13	Проведение основных экспериментов испарению капель водно-солевого раствора	И	7
14	Обработка экспериментальных данных	И	14
15	Построение графических зависимостей скорости испарения, контактного угла, диаметра смоченного пятна от времени	И	7
16	Анализ полученных результатов и сравнение их с существующими работами	И НР	5
17	Работа над разделом «Социальная ответственность»	И	5
18	Работа над разделом «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	5
19	Работа над заключительной частью	И	5
20	Оформление расчетно-пояснительной записки	И	5
21	Распечатка расчетно-пояснительной записки и демонстрационных листов	И	1
22	Проверка расчетно-пояснительной записки и исправление ошибок	И НР	1
23	Сдача расчетно-пояснительной записки руководителю	И	1
Итого		И НР	118 9

#### 4.2 Смета затрат на разработку проекта

Суммарные затраты на разработку темы или договорная цена на выполнение работы будет рассчитываться по формуле:

$$K_{np} = K_{mat} + K_{am} + K_{zn} + K_{co} + K_{np} + K_{накл}, \text{ руб.},$$

где  $K_{mat}$  – материальные затраты, руб;

$K_{am}$  – амортизация, руб;

$K_{зн}$  – заработная плата, руб;

$K_{со}$  – социальные отчисления, руб;

$K_{пр}$  – прочие затраты, руб;

$K_{накл}$  – накладные расходы, руб.

Рассмотрим каждую составляющую суммарных затрат в отдельности.

4.2.1. Материальные затраты на проектные работы включают стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Затраты, связанные с закупкой расходных материалов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Стоимость закупаемых расходных материалов

№, п/п	Наименование	Кол-во	Цена, руб.	Стоимость, руб.
1	Бумага для принтера А4	1 пач.	230	230
2	Картридж для принтера	1 шт.	900	900
3	Ручка шариковая	2 шт	10	20
4	Карандаш чертежный	1 шт.	60	60
5	Грифели для карандаша	1 уп.	25	25
6	Бумага чертежная	7 шт.	10	70

Итого:  $K_{mat} = 1305$  руб.

4.2.2. Амортизация компьютерной техники.

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

Амортизация равна:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.КТ}}{T_{кал}} \cdot Ц_{КТ} \cdot \frac{1}{T_{сл}},$$

где  $T_{исп.КТ}$  – время использования компьютерной техники,

$T_{кал}$  – количество дней в году,

$Ц_{КТ}$  – стоимость компьютерной техники,

$T_{сл}$  – срок службы компьютерной техники.

Стоимость компьютерной техники составляет 41 тыс. руб., срок службы 5 лет. Тогда амортизация рассчитывается следующим образом:

$$K_{ам} = \frac{118}{365} \cdot 41000 \cdot \frac{1}{5} = 2651 \text{ руб.},$$

#### 4.2.3. Заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда.

Заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{зн} = 3П_o \cdot k_1 \cdot k_2,$$

где  $3П_o$  – месячный оклад, руб;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск (10%);

$k_2$  – районный коэффициент (30%);

Заработная плата инженера (10 разряд):

$$K_{зн(инж)} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.},$$

Заработная плата научного руководителя (15 разряд):

$$K_{зн(НР)} = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб.},$$

Рассчитаем заработную плату за количество отработанных дней по факту:

$$K_{зн}^n = \frac{K_{зн}}{21} \cdot n,$$

где 21 – число рабочих дней в месяце;

$n$  – фактическое число дней в проекте.

$$K_{зн(инж)}^n = \frac{24310}{21} \cdot 118 = 136599 \text{ руб.},$$

$$K_{зн(НР)}^n = \frac{37609}{21} \cdot 9 = 16118 \text{ руб.},$$

Фонд заработной платы:

$$\Phi ЗП = K_{зп(инж)}^n + K_{зп(НР)}^n = 136599 + 16118 = 152717 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4. Социальные отчисления

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$K_{со} = 30\% \Phi ЗП ,$$

где 30% – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$K_{со} = 0,3 \cdot 152717 = 45815 \text{ руб.}$$

#### 4.2.5. Прочие затраты

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

$$\begin{aligned} K_{пр} &= 10\%(K_{мат} + K_{ам} + K_{зп} + K_{со}) = \\ &= 0,1 \cdot (1305 + 2651 + 152717 + 45815) = 20249 \text{ руб.} \end{aligned}$$

#### 4.2.6. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 200 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала.

$$K_{накл} = 200\% \Phi ЗП = 2 \cdot 152717 = 315434 \text{ руб.}$$

Общая смета расходов на выполнение НИР сведена в таблицу 4.3.



Таблица 4.3 – Смета расходов на выполнение НИР

№	НАИМЕНОВАНИЕ СТАТЕЙ	ВЕЛИЧИНА, РУБ
1	Материальные затраты	1305
2	Затраты на амортизацию компьютерной техники	2651
3	Заработная плата	152717
4	Социальные отчисления	45815
5	Прочие затраты	20249
6	Накладные расходы	315434
Итого		536866

#### 4.3 Анализ основных результатов

В результате проведенных экспериментальных исследований ожидается дополнение теории тепломассопереноса в условиях испарения малых объемов жидкости.

Тепломассоперенос испаряющейся капли жидкости на твердой подложке – основное перспективное направление модернизации теплотехнических технологий в энергетике при конструировании высокоинтенсивных теплообменных систем, в химической промышленности при сушке жидких дисперсий (в пневматических, распылительных, роторных, барабанных сушилках), в авиации при решении “проблемы обледенения” летательных аппаратов, в машиностроении при разработке тепловых двигателей, в медицине при исследовании микроструктур ДНК/РНК, в оптоэлектронике при разработке полупроводниковых лазеров, светодиодов и т.д.

В ходе проведенных экспериментальных исследований изучено испарение капель водно-солевого раствора 10% водных растворов солей  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{NaCl}$ , а также 30%  $\text{LiBr}$  на подложках из алюминия марки АМГ 6. Установлено, что при определении температуры поверхности капли ( $t_s$ ) водных растворов солей тепловизором малая толщина слоя жидкости и концентрация соли оказывают влияние на отклонения температуры  $t_s$  в пределах  $1^\circ\text{C}$  (погрешности измерительной системы).

Установлены три режима испарения водных растворов солей: увеличение площади контакта; “пиннинг” капли (площадь контакта постоянна); “образование кристаллов соли или кристаллогидратов” капли.

Также установлено, что при десорбции воды из растворов соли LiBr, LiCl, CaCl<sub>2</sub> (при  $t_w = 80$  °C) на поверхности капли образуется тонкая пленка кристаллогидратов. В случае соли NaCl образуются объёмные кристаллы соли (без кристаллогидратов). Зарегистрирована область кристаллизации перед контактной линией при покрытии поверхности капли кристаллической плёнкой. Наиболее вероятно эта область является прекурсионной плёнкой.

По экспериментальным зависимостям высоты капли  $h_{0cr}$  в момент начала кристаллизации от объема водных растворов солей установлено, что  $h_{0cr}$  зависит от растворимости соли.

По анализу зависимостей изменения объема капли во времени установлено, что скорость испарения воды имеет линейный вид, водных растворов солей LiCl, CaCl<sub>2</sub>, LiBr квазилинейный, трансформирующийся в нелинейный при испарении воды. Кривые десорбции водного раствора соли NaCl квазилинейны. Последнее обусловлено разными условиями необходимыми для кристаллизации (низкой растворимостью NaCl и ранней кристаллизацией).

Для качественного сравнения скорости десорбции  $j_s$  различных растворов солей введён условный параметр: средняя скорость десорбции соли. Установлено, что скорость десорбции и степень растворимости не связаны простым и явным образом.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Feoktistov D.V., Orlova E.G., Islamova A.G. Mechanism of contact line movement of a droplet spreading over a solid surface // MATEC Web of Conferences. – 2017 – Vol. 91, Article number 01026. – P. 1-5
2. Feoktistov D.V., Orlova E.G., Sharifulin T.M., Islamova A.G. Experimental study of evaporation of distilled water and 10% NaCl and CaCl<sub>2</sub> aqueous salt solutions droplets under their free falling on a heated surface // MATEC Web of Conferences. – 2017 – Vol. 92, Article number 01069. – P. 1-4
3. Orlova E.G., Islamova A.G., Kabov O.A. Evaporation rate of a liquid layer streamlined by gas flow in minichannel // MATEC Web of Conferences. – 2017 – Vol. 91, Article number 01028. - P. 1-4
4. Feoktistov D.V., Orlova E.G., Islamova A.G. Spreading modes on copper and steel surfaces // EPJ Web of Conferences. – 2016 – Vol. 110, Article number 01018. – P. 1-4
5. Feoktistov D.V., Orlova E.G., Islamova A.G. Change of dynamic contact angle of a drop spreading over copper surface // MATEC Web of Conferences. – 2015 – Vol. 37, Article number 01020. – p. 1-5
6. Исламова А.Г., Орлова Е. Г., Феоктистов Д.В., Мисюра С.Я. Десорбция капель водных растворов солей LiBr, CaCl<sub>2</sub>, LiCl, NaCl // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем, Санкт-Петербург, 14-19 Ноября 2016. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016 – Т. 1 – С. 224-226
7. Исламова А. Г., Орлова Е.Г. Экспериментальное исследование испарения капель соли LiCl на алюминиевой поверхности // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов в 9 т., Новосибирск, 5-9 Декабря 2016. – Новосибирск: НГТУ, 2016 – Т. 4 – С. 231-233
8. Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Исламова А.Г. Влияние объема капли на краевой угол и контактный диаметр в процессе смачивания цветных металлов // Неделя науки СПбПУ: материалы форума с международным участием.

- Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1, Санкт-Петербург, 30  
Ноября-5 Декабря 2015. – Санкт-Петербург: СПбПУ, 2015 – С. 140-143
9. Исламова А.Г., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Режимы испарения капли дистиллированной воды и водных растворов солей на полированной алюминиевой поверхности // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием, Новосибирск, 22-25 Ноября 2016. – Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2016 – С. 120-121
  10. Батищева К.А., Исламова А.Г., Орлова Е.Г. Смачивание алюминиевого сплава АМГ-6 после обработки лазерным излучением // Материалы докладов XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» в 3 т.; Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 325-326.
  11. Исламова А.Г., Орлова Е.Г. Испарение капель солевых растворов  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  на алюминиевой поверхности // Материалы докладов XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» в 3 т.; Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С.335-336.
  12. Исламова А.Г., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. Экспериментальное исследование испарения капель солевых растворов на полированной алюминиевой поверхности // Неравновесные процессы в сплошных средах: материалы междунар. симп.: в 2 т. – Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – пермь, 2017. – Т. 1. – С.206-208.
  13. Исламова А.Г., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Экспериментальное исследование испарения капель на твердых поверхностях // Труды Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (22-26 мая 2017 г., Санкт-Петербург): в 2т. Т.1. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 413 с.