

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

Институт Энергетический

Направление подготовки Физика (Физика и техника низких температур)

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ

УДК 532.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Малыхина Екатерина Руслановна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Феоктистов Дмитрий Владимирович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	К.Б.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2016 г.

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 Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ Кузнецов Г.В.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ41	Малыхина Екатерина Руслановна

Тема работы:

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА
ПРОЦЕССЫ СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ**

Утверждена приказом директора (дата, номер) №10155/с от 28.12.2015

Срок сдачи студентом выполненной работы: 16.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования – процессы смачивания и растекания капель на металлических поверхностях. Предмет исследования – режимы растекания, гистерезис контактного угла в условиях растекания капли дистиллированной воды на структурированной металлической поверхности.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Проведение обзора научных публикаций по тематике: динамика смачивания на твердых поверхностях. Разработка методики проведения экспериментальных исследований по изучению процесса смачивания и растекания дистиллированной воды на металлических поверхностях.

	<p>Определение основных характеристик процесса динамического смачивания (наступающий и отступающий динамические контактные углы, гистерезис).</p> <p>Определение экспериментальных зависимостей динамического контактного угла от микроструктуры металлической поверхности, скорости роста и объема капли.</p>
Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А. А.
Социальная ответственность	Антоневич О. А.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Малыхина Екатерина Руслановна		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

Физика, магистратура

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>	
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.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
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.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация 123с., 27 рисунков, 28 таблиц, 67 литературных источника, 1 приложение.

Ключевые слова: динамическое смачивание, растекание, динамический краевой угол натекания, линия трехфазного контакта, диаметр пятна контакта, теневая методика.

Объектом исследования являются процессы смачивания и растекания капель на металлических поверхностях.

Предметами исследования являются режимы растекания, гистерезис контактного угла в условиях растекания капли дистиллированной воды на структурированной металлической поверхности.

Цель работы – экспериментальное определение динамического контактного угла и гистерезиса на полированных и структурированных металлических поверхностях.

В результате исследования получены экспериментальные данные о влиянии размера и формы микронеровностей поверхности на динамический краевой угол, скорость перемещения линии трехфазного контакта и диаметр смоченной поверхности.

Полученные данные по смачиваемости поверхностей могут быть использованы для повышения эффективности технологии спрейного охлаждения поверхностей.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Определения

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Краевой угол – угол наклона поверхности жидкости к смоченной части поверхности твердого тела

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

Динамический контактный угол – контактный угол, изменяющийся в процессе растекания жидкости по поверхности твердого тела.

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

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

Наступающий контактный угол – это максимальный угол, достигаемый перед тем, как контактная линия начинает двигаться в сторону газовой фазы.

Отступающий контактный угол – угол, характеризуется минимальным значением до того момента, когда линия начинает движение в сторону жидкой фазы.

Случайная погрешность измерений – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом в серии повторных измерений одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях.

Систематическая погрешность измерений – погрешность, изменяющаяся во времени по определенному закону (частным случаем является постоянная погрешность, не изменяющаяся с течением времени).

Обозначения и сокращения

ДКУ – динамический контактный угол;

ЛТФК – линия трехфазного контакта;

ПК – персональный компьютер;

МКТ – молекулярно-кинетическая теория;

ГДТ – гидродинамическая теория;

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 5962-2013 «Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья»;
2. ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная»;
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»;
4. СП 52.13330.2011. «Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95»;
5. СНиП 23-05-95. «Естественное и искусственное освещение»;
6. ГОСТ 12.1.006-84. «СБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;
7. СанПин 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»;
8. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»;
9. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»;
10. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;

- 11.ГОСТ 12.1.045-84 «ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;
- 12.ГОСТ 12.4.124-83 «ССБТ. Средства защиты от статического электричества»;
- 13.РД 39-22-113-78 «Временные правила защиты от проявлений статического электричества на производственных установках и сооружениях нефтяной и газовой промышленности»;
- 14.СНиП 3.05.06-85 «Электротехнические устройства»;
- 15.ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции»;
- 16.СНиП 2.09.04.77 «Административные и бытовые здания»;
- 17.ГН 2.2.5.1313-03 «ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны»;
- 18.ГОСТ 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения»;
- 19.СанПиН 2.1.7.1038-01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов;
- 20.СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений»;
- 21.ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»;
- 22.СанПиН 2.2.2.542 – 96 «Гигиенические требования к видео-дисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	12
1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ	15
1.1 Теоретические подходы к изучению растекания.....	15
1.2 Растекание на реальных шероховатых поверхностях. Гистерезис контактного угла	19
1.3 Экспериментальное исследование гистерезиса контактного угла при подаче жидкости через отверстие в подложке	24
Выводы по первой главе.....	26
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ.....	27
2.1 Описание экспериментальной установки.....	27
2.2 Методика проведения эксперимента	29
2.2.1 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований.....	29
2.2.2 Выбор области изменения основных факторов	31
2.2.3 Подготовка к проведению эксперимента	32
2.3 Порядок проведения экспериментов	40
2.4 Обработка экспериментальных данных.....	41
ГЛАВА 3 ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТАКТНЫЙ УГОЛ КАПЛИ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ НАСТУПАЮЩЕЙ/ОТСТУПАЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ЛИНИИ	44
3.1 Гистерезис ДКУ на гладких поверхностях. Зависимость ДКУ от скорости перемещения линии трехфазного контакта: сравнение теорий с экспериментами.....	44

3.2 Гистерезис ДКУ на структурированной поверхности. Зависимость ДКУ от скорости перемещения линии трехфазного контакта: сравнение теорий с экспериментами.....	59
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	64
4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	69
Введение	69
1.Производственная безопасность.....	70
Вредные физические производственные факторы	70
2.Экологическая безопасность	78
3.Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	80
4.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	82
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	85
5.1. Экспертная оценка	85
5.2 Календарный план	88
5.3 Смета. Бюджет проекта.....	91
5.5 Ресурсоэффективность.....	95
Литература.....	99
Приложение А	104

ВВЕДЕНИЕ

Исследование растекания капли и её динамическое взаимодействие с твердой поверхностью в настоящее время вызывает большой интерес. Это связано широким применением получаемых результатов. Явление динамического смачивания распространено в технике, например, при капельном охлаждении поверхностей, нанесении различных покрытий, струйной печати, добыче нефти, смазке, склеивании и пропитке различных материалов, росте биологических кристаллов и т.д. Недостаточно полное понимание свойств трехфазной линии контакта приводит к сдерживанию развития ряда технологий, в которых реализуются ручейковые течения, кипение, разрыв пленок жидкостей и т.д. [1].

Необходимость уменьшения характерных размеров устройств в различных отраслях техники, например, в энергетике и медицине, космической индустрии и электронике, определяет развитие исследований гидродинамики газожидкостных течений в микросистемах и микроканалах [2-3]. Основной задачей в подобных системах является отвод значительного теплового потока от источников с малыми линейными размерами. Испарение тонких пленок теплоносителей обеспечивает интенсивный теплоотвод и значительную поверхность контакта фаз при малых удельных расходах жидкости [4-5]. Процессы, происходящие в пленочных течениях, определяются следующими факторами: теплофизическими свойствами жидкости, удельным расходом теплоносителя, физико-химическими свойствами, микрорельефом и смачиваемостью поверхности.

В работе [6] рассматривались регулярные структуры, которые можно представить как семейство стекающих ручейков, сопряженных по контактными линиям. Ручейковые течения активно используются в технике. Среди высокоинтенсивных тепломасообменных аппаратов перспективными считаются теплообменники со слабонаклонными трубами, в которых основным режимом движения теплоносителя по наклонной поверхности

является ручейковое течение. На ручейковое движение определяющее влияние оказывает краевой угол смачивания и его гистерезис [7-8]. Эффект гистерезиса приводит к тому, что ривулет движется непредсказуемым способом в виде змейки, из-за чего невозможно получить однозначные характеристики течения. Авторами работы [9] установлено, что на поверхности теплообмена возможна капельная конденсация. Получены результаты [10], подтверждающие, что при течении двухфазной смеси в прямоугольных каналах малой высоты основным режимом течения смеси является капельный режим.

Капля, помещенная на твердую поверхность, растекается, стремясь принять некое равновесное состояние. Характеристиками, используемыми для описания растекания капли по твердой поверхности являются: динамический краевой угол, скорость движения линии трехфазного контакта (ЛТФК) и диаметр пятна контакта [11].

В настоящей работе экспериментально исследовалась зависимость динамических характеристик смачивания в процессе растекания капли не деаэрированной дистиллированной воды по твердой горизонтальной поверхности от шероховатости, микроструктуры поверхности и расхода жидкости.

Актуальность исследования

Геометрия капель и их динамические характеристики представляют интерес для всех гетерофазных процессов в природе и технике. Исследованиями в этой области занимались крупнейшие ученые: Т. Юнг, П.С. Лаплас, П.А. Ребиндер, Б.В. Дерягин, Р. Хоффман, Дж. Бэтчелор, О.В. Воинов, Т. Блэйк и ряд других.

Динамика передвижения трехфазной линии контакта (ЛТФК) определяет режим растекания жидкости.

Различают два вида смачивания: динамическое и статическое [12]. Первый вид характеризуется гистерезисом краевого угла, в то время как второй зависит только от статического краевого угла, который определяется

термодинамическими параметрами системы. В связи с этим, для проведения численного эксперимента по расчету динамических характеристик капли с определенной точностью, необходимы данные физического эксперимента для конкретной системы газ–жидкость–твердое тело [13].

Несмотря на большое количество работ [12-133], направленных на изучение этой темы, на сегодняшний день не разработаны основные положения теории свойств ЛТФК. Скорее всего, это связано с малой публикационной активностью авторов работающих в данном направлении, зачастую результаты известных исследований во многом противоречат друг другу [45-48]. В научной периодической литературе отсутствуют результаты исследований систем с большим диапазоном варьирования скорости растекания ЛТФК и степени шероховатости смачиваемой поверхности.

Цель работы – экспериментальное определение динамического контактного угла и гистерезиса на полированных и структурированных металлических поверхностях.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение обзора научных публикаций по тематике: «динамика смачивания на твердых поверхностях».
2. Разработка методики проведения экспериментальных исследований по изучению процесса смачивания и растекания дистиллированной воды на металлических поверхностях.
3. Определение основных характеристик процесса динамического смачивания (наступающий и отступающий динамические контактные углы, гистерезис).
4. Определение экспериментальных зависимостей динамического контактного угла от скорости роста капли на полированной и структурированной металлической поверхности.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В настоящее время большое количество работ посвящено смачиванию и растеканию капель жидкостей по поверхностям [1-10]. Такой интерес объясняется широким применением этих процессов в ряде промышленных отраслей, включающих в себя спрейное охлаждение, опыление сельскохозяйственных культур, пайка струей припоя, спрейное нанесение покрытий, синтез ДНК [1-5].

Растекание капли по твердой поверхности является разновидностью динамического смачивания. Первым, кто экспериментальным путем обнаружил, что при растекании по твердой поверхности капля жидкости изменяет свою форму, был Уортингтон [6]. Несмотря на значительное усовершенствование экспериментальной аппаратуры, изучение свойств капель миллиметровых размеров остается по-прежнему сложной задачей из-за наличия различных факторов, влияющих на процессы смачивания и растекания (температура поверхности и жидкости, давление, влажность и температура газа вокруг капли, изменение ее формы вследствие воздействия внешних сил и т.д.).

1.1 Теоретические подходы к изучению растекания

Существует большое число теоретических работ по исследованию процесса растекания, охватывающих широкий диапазон размеров капель: от микро- и наноскопических (единицы и десятки нм) (с использованием молекулярной динамики [7]) и мезоскопических (сотни-тысячи нм) (с использованием таких методов, как метод решеточного уравнения Больцмана [8]) до моделирования сплошных сред (единицы-десятки мм) [9].

Существует несколько подходов для описания процесса смачивания. Первый подход основан на молекулярно-кинетической теории. В его рамках смачивание рассматривается с точки зрения кинетики молекулярных процессов, происходящих на линии трехфазного контакта [10-13]. В основе второго подхода лежит гидродинамика. В её рамках рассматривается влияние вязких напряжений на изменение краевого угла при движении трехфазной линии контакта [14-19].

В основе этих подходов лежит взаимосвязь основных параметров, характеризующих процесс растекания капли: динамический контактный угол θ_d (угол, регистрируемый при движении контактной линии) и скорость перемещения линии трехфазного контакта U_c . В настоящее время нет универсального выражения, которое бы описывало соотношение этих параметров.

Впервые зависимость значения краевого угла от скорости передвижения трехфазной линии контакта по твердой поверхности обнаружил Аблетт [20]. На основе молекулярно-кинетической теории предложена следующая зависимость динамического контактного угла от скорости перемещения линии трехфазного контакта [12]:

$$\theta_D = \cos^{-1}[\cos \theta_S - (2k_B T / \sigma \lambda^2) \sinh^{-1}(U / 2K_\omega \lambda)], \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура; λ – среднее расстояние между перемещениями; K_ω – равновесная частота случайных молекулярных перемещений, происходящих в трехфазной зоне. Эти параметры определяются по кривой, полученной в результате эксперимента, и равны приблизительно 10^{-9} м и 10^6 с⁻¹.

Во многих случаях, особенно при малых скоростях (порядка мкм/с) перемещения КЛ, молекулярно-кинетическая модель хорошо согласуется с экспериментальными результатами [21-23].

Согласно Т. Блэйку и Дж. Хайнсу [12] поверхностное натяжение обеспечивает основную движущую силу для перемещения контактной линии

капли, растекающейся по поверхности («сидячая капля»), в частности, $\sigma(\cos \theta - \cos \theta_0)$. Если динамический угол больше равновесного ($\theta_0 > \theta$), тогда равновесное состояние, описанное уравнением Юнга, недостижимо, а контактная линия находится в движении. Тогда общее уравнение скорости перемещения контактной линии примет вид:

$$U = \frac{\sigma_{\text{жж}}}{\xi} (\cos \theta - \cos \theta_0), \text{ м/с} \quad (2)$$

где θ_0 – динамический контактный угол, °; θ – равновесный угол, °; $\xi = k_e \cdot T / k^0 \cdot \lambda^3$ – коэффициент трения трехфазной линии контакта, Па·с; k_e – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К; k^0 – характерная частота молекулярных перемещений у ЛТФК, Гц; λ^3 – среднее перемещение капли, м.

В рамках гидродинамической теории предложено [24, 25] следующее соотношение для нахождения динамического краевого угла:

$$\theta_D^3 = \theta_S^3 \pm (9\mu U / \sigma) \ln(L/b) \quad (3)$$

где θ_S – равновесный или статический контактный угол, L – характерный масштаб длины внешней области потока, b – длина скольжения.

В уравнении (3) плюс соответствует наступающей ЛТФК, минус – отступающей. Капиллярная длина определяется из следующего соотношения:

$$L = \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{жж}}}{\rho g}} \quad (4)$$

Длина скольжения L_m для чистых жидкостей определяется аппроксимацией экспериментальных результатов теоретической зависимостью и приблизительно равна молекулярной длине.

Доказано [26], что уравнение (3) применимо даже для больших контактных углов, вплоть до 150° , при этом отклонение составляет не более нескольких процентов. Однако, при очень малых капиллярных числах (

$Ca < 10^{-4}$) и очень больших значениях ($Ca > 0,1$) обнаружено значительное расхождение (порядка 70%).

Несмотря на принципиально различную физику этих двух моделей и аппарат прогнозирования, молекулярно-кинетическая и гидродинамическая модели достаточно точно описывают экспериментально исследуемый контактный угол.

К настоящему времени не разработана методика нахождения значений ξ, k^0, λ для конкретной системы «газ-жидкость-твердое тело» до проведения экспериментальных исследований. Поэтому эти параметры определяются путем аппроксимации рядов экспериментальных данных теоретической кривой.

В таблице 1.1 представлены полученные авторами коэффициенты ξ, k^0, λ из уравнений путем аппроксимации экспериментальных данных теоретической зависимостью МКТ.

Таблица 1.1 – Подгоночные параметры в МКТ для капли, определенные для капли воды

Источник	жидкость	$\theta_s, ^\circ$	$\lambda, \text{нм}$	$k^0, \text{МГц}$	$\zeta, \text{Па}\cdot\text{с}$
[27]	вода		0,3	20000	0,006
[28]	вода	82	0.36	8600	0,01
[29]	вода	54,1	1,02	0.0119	-
[30]	вода	55.5	1.79	0.667	-
[31]	водный раствор глицерина	-	7,3	34	-

Помимо вышеуказанных теорий существует теория описания поведения динамического контактного угла (ДКУ) и скорости перемещения контактной линии (КЛ), созданная Ю.Д. Шихмурзаевым [32]. Она основывается на положениях гидродинамики и неравновесной термодинамики:

$$\cos \theta_\delta = \cos \theta - \frac{2 \cdot [\sigma_{тжс} - \sigma_{гжс} \cdot V_0(\theta_\delta)]}{[1 - \sigma_{гжс}] \cdot [(1 + \sigma_{тжс} / V_\kappa^2)^{1/2} + 1]}, \quad (4)$$

где $V_0(\theta_0)$ – тангенциальная компонента скорости свободной поверхности в системе отчета, движущейся с КЛ.

Преимуществом такого подхода является то, что микроскопический ДКУ связан непосредственно с потоком и не является независимой величиной.

Получены соотношения [33], позволяющие перейти от динамических краевых углов (наступающего и отступающего) к статическому краевому углу:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\Gamma_a \cdot \cos\theta_A + \Gamma_r \cdot \cos\theta_R}{\Gamma_a + \Gamma_r}\right),$$

где

$$\Gamma_r = \left(\frac{\sin^3\theta_R}{2 - 3 \cdot \cos\theta_R + \cos^3\theta_R}\right)^{1/3},$$

и

$$\Gamma_a = \left(\frac{\sin^3\theta_A}{2 - 3 \cdot \cos\theta_A + \cos^3\theta_A}\right)^{1/3}.$$

где θ_a - наступающий динамический контактный угол, θ_r - отступающий динамический контактный угол.

1.2 Растекание на реальных шероховатых поверхностях. Гистерезис контактного угла

Согласно уравнению Юнга контактный угол зависит только от поверхностных натяжений на границах раздела фаз ($\sigma_{ТГ}$, $\sigma_{ТЖ}$, $\sigma_{ЖГ}$) и является уникальной характеристикой рассматриваемой системы «жидкость-газ-твердое тело». Однако в действительности контактный угол зависит от нескольких дополнительных факторов и может принимать разные значения. Это явление называется гистерезисом КУ.

Численное значение гистерезиса можно получить, измерив наступающий и отступающий контактные углы (рис. 1.1). Наступающий КУ (θ_A) это максимальный угол, достигаемый перед тем, как контактная линия

начинает двигаться в сторону газовой фазы. Отступающий угол (θ_R) характеризуется минимальным значением до того момента, когда линия начинает движение в сторону жидкой фазы. При неподвижной контактной линии статический угол принимает определенное значение в интервале $\theta_R \leq \theta \leq \theta_A$.

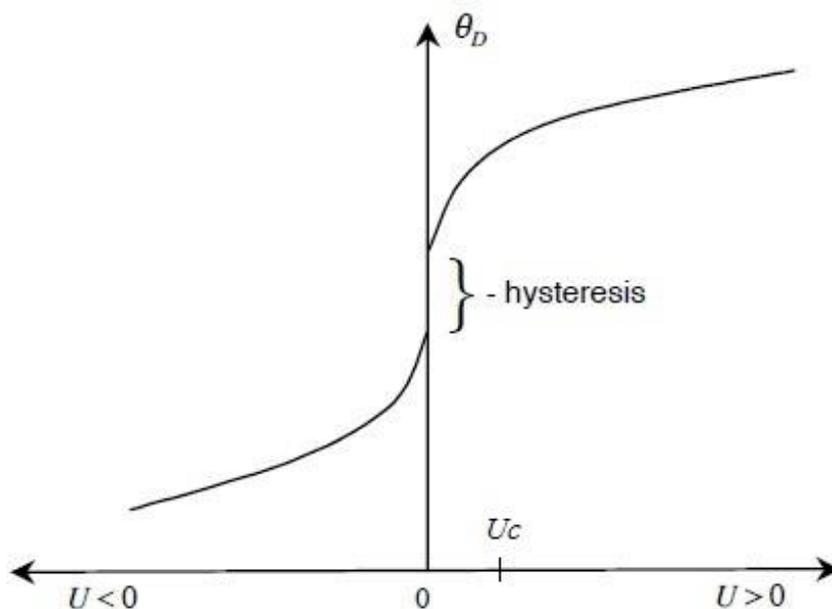


Рисунок 1.1. – Типичная экспериментальная зависимость ДКУ от скорости перемещения КЛ. При $U > 0$ контактная линия наступающая, при $U < 0$ – отступает [34].

Эти углы (θ_A , θ_R) могут быть измерены при разных значениях скорости перемещения фронта жидкости. Для низких скоростей (порядка мкм/с) значение углов будут близки или равны статическому.

Установлено [35, 36], что при скорости больше некоторого значения U_c (каждая определенная система «жидкость-твердое тело-газ» обладает своим конкретным значением скорости U_c) контактная линия движется равномерно, а при $U < U_c$ движение неравномерное и скачкообразное. Эксперименты проведены для системы «бензол-вода-боросиликатное стекло» со скоростью $U_c = 0,03 \text{ см/с}$. Для достижения меньшей скорости (

$0,03 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}$) подложку обработали диметилдихлорсиланом. При таком изменении скорости θ_A и θ_R уменьшились на 10° .

Первые исследования гистерезиса в России проводились академиком П.А. Ребиндером в 1930-х гг. Он объяснил причину возникновения этого явления следующим образом: помимо адгезии и поверхностного натяжения на линию трехфазного контакта действует еще одна сила ψ (мН/м), схожая с трением. При натекании на сухую поверхность сопротивление имеет одно значение ψ_n , при оттекании с ранее смоченной площади – другое ψ_{om} . Обычно $\psi_n > \psi_{om}$.

Тогда с учетом силы трения формулы для нахождения углов натекания и оттекания примут вид:

$$\cos \theta_A = \cos \theta_0 - \frac{\psi_n}{\sigma_{жг}}, \quad (5)$$

$$\cos \theta_R = \cos \theta_0 - \frac{\psi_{om}}{\sigma_{жг}}. \quad (6)$$

Опытным путем установлено, что сила ψ состоит из статического трения, которое преодолевает КЛ для начала движения, и динамического (во время скольжения линии). Последнее на 25-30% меньше статического.

Ребиндер выявил причины возникновения сил трения на ЛТК – шероховатость и гетерогенность поверхности. Эти первые исследования стали основной теории гистерезиса КУ. Позднее эти же две основные причины описаны в работах [35, 36].

Наиболее важными исследованиями влияния степени шероховатости на гистерезис угла считаются работы, проведенные Деттре и Джонсоном [35]. Результаты измерений углов на поверхностях с возрастающей степенью шероховатости представлены на рисунке 1.2. Полученные значения демонстрируют немонотонную зависимость θ_R от степени шероховатости.

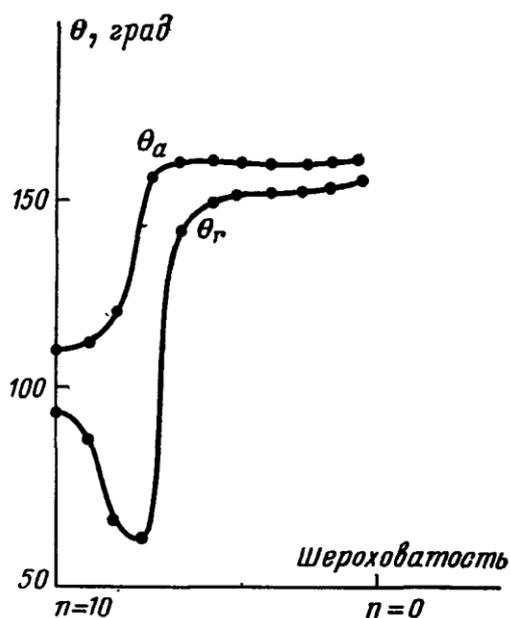


Рисунок 1.2 – Наступающие и отступающие углы для системы «воздух-вода-фторуглеродный воск» [35].

Минимумы θ_r объяснены авторами в рамках модели «с параллельными бороздками». Если контактная линия параллельна бороздкам на шероховатой поверхности, то могут возникать многочисленные зацепления. Также возможно численно рассчитать величину энергетического барьера, который необходимо преодолеть КЛ при движении по такой поверхности. Когда впадины достаточно глубоки пузырьки воздуха остаются в них под слоем жидкости. Исходя из расчетов, такая сложная структура обладает меньшим энергетическим барьером. Таким образом, при увеличении степени шероховатости сначала обнаруживается естественное увеличение высоты барьеров, и соответственное уменьшение θ_r , но когда впадины становятся достаточно глубокими, возникает описанная выше сложная структура и угол увеличивается.

Помимо использования разности в значениях контактных углов, гистерезис можно описать в рамках сил, действующих на контактную линию. Важным параметром в этом случае будет являться порог сил на единицу длины [37], под действием которой линия наступает:

$$f_c^+ = \sigma(\cos\theta_{eq} - \cos\theta_a),$$

или отстывает:

$$f_c^- = \sigma(\cos\theta_R - \cos\theta_{eq}),$$

На практике равновесный контактный угол θ_{eq} невозможно измерить, а численное значение гистерезиса получают по следующему уравнению:

$$H = \sigma(\cos\theta_R - \cos\theta_A).$$

Экспериментально значение гистерезиса получено [38] путем погружения пластины в жидкость и ее последующем выталкивании (рис.1.3).

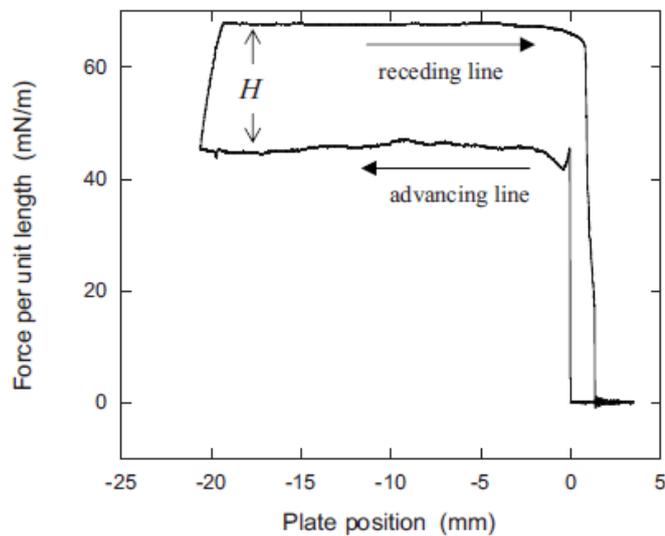


Рисунок 1.3 – Сила на единицу длины при погружении пластины в жидкость и извлечении (за вычетом подъемной силы) [37].

Таким образом, по значению гистерезиса КУ можно судить о гладкости и однородности поверхностей. Например, поверхность считается достаточно гладкой и ровной, если гистерезис $\theta_A - \theta_R \leq 5^\circ$ [37].

Экспериментальные исследования гистерезиса проводились на поверхностях с различным рельефом (хаотично сформированный, микро структурированный) и свойствами смачиваемости (супергидрофобные, гидрофобные, гидрофильные).

Известно, что супергидрофобные поверхности характеризуются большим значением динамического КУ и малым значением гистерезиса ($\theta_A \approx \theta_R$), за счет чего ослабляются силы пиннинга. Это позволяет капле воды беспрепятственно перемещаться по такой поверхности.

1.3 Экспериментальное исследование гистерезиса контактного угла при подаче жидкости через отверстие в подложке

Экспериментально наступающую и отступающую контактную линию для определения гистерезиса КУ можно получить различными методами (рис.1.4).

Первый метод заключается в исследовании контактных углов при помещении капли на наклонную поверхность, в результате чего происходит ее движение (рис.1.4 а). При этом угол, образующийся на нижней поверхности будет наступающим, а на верхней – отступающим. Описанный метод обладает существенным недостатком. Измерения необходимо проводить в динамическом режиме, что является достаточно сложным процессом.

Также для определения КУ возможно использовать метод подвешенного пузырька воздуха. Нижняя поверхность исследуемого образца располагается в жидкости, где и происходит формирование пузырька воздуха, объем которого возможно изменять с помощью отверстия в образце или иглы шприца. Этот метод очень сложен в реализации.

Наиболее точным методом является метод пластины Вильгельми, при котором наступающий и отступающий КУ измеряются при погружении в жидкость и последующем вытягивании из нее исследуемого образца. При этом жидкость смачивает пластину вдоль вертикального контура. Основным недостатком метода заключается в том, что он требует полного смачивания материала пластинки. Для этого их подвергают специальной обработке в вакууме, электрических полях, химическими веществами, подбирают для них специальные материалы [39].

Последним наиболее распространенным методом является метод сидячей капли на горизонтальной поверхности при увеличении и уменьшении ее объема (рис.1.4 б), что возможно осуществить двумя способами: использованием шприца, игла которого находится в объеме капли, либо посредством шприцевого насоса при подаче жидкости через отверстие в исследуемой подложке (так называемый “bottom-up” метод). Для уменьшения влияния испарения на процесс исследования необходимо проводить в атмосфере насыщенного водяного пара.

Основным преимуществом последнего является простота в реализации и достаточно хорошая точность получения ДКУ (от $0,1^\circ$ до 3° в зависимости от способа обработки результатов).

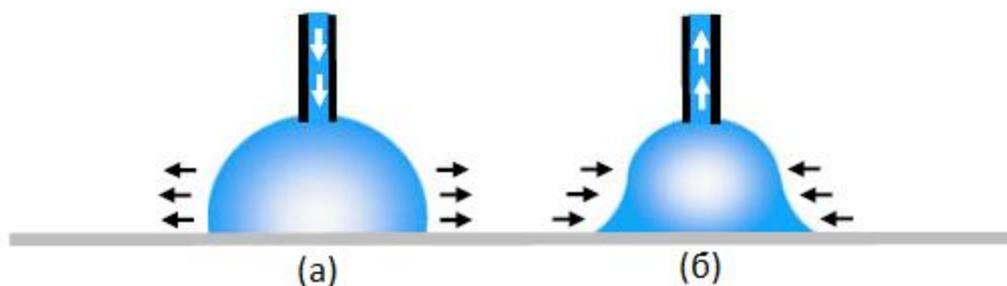


Рисунок 1.4 – Способ получения наступающей (а) и отступающей (б) контактной линии

В ряде экспериментальных исследований применялся шприцевой насос для реализации “bottom-up” метода. Использование этого метода обусловлено рядом преимуществ: возможность контролировать начальный объем капли и увеличивать объем после того, как капля полностью сформировалась. Наиболее важной особенностью метода является отсутствие столкновения капли с поверхностью, что позволяет исключить из рассмотрения динамику этого процесса.

Выводы по первой главе

По результатам проведенного анализа публикаций, посвященных исследованию динамики процесса растекания капли жидкости по твердой поверхности, установлено отсутствие обобщенной теории, вследствие чего невозможно произвести прогностическую оценку влияния различных факторов на данный процесс.

Обнаружено большое количество экспериментальных и теоретических работ по динамике растекания жидкостей, изучению гистерезиса контактного угла, использованию известных теоретических моделей при сравнении с результатами экспериментов. Однако до сих пор не существует общих зависимостей, характеризующих процесс ($\theta = f(U)$), которые были бы справедливы для любой системы «жидкость-газ-твердое тело», а также для любых условий формирования динамической контактной линии.

При изучении возможных методов формирования линии трехфазного контакта установлено, что метод с подачей жидкости снизу подложки (“bottom-up” метод) является наиболее предпочтительным, поскольку при простоте его реализации он обладает достаточно хорошей точностью ($0,5^\circ$ - 3° в зависимости от способа обработки результатов).

Отсюда можно сделать следующий вывод: изучение динамики процесса растекания с использованием описанного выше метода формирования динамической контактной линии совместно со скоростной видеосъемкой является перспективным и актуальным направлением научных исследований.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ ДИСТИЛИРОВАННОЙ ВОДЫ

2.1 Описание экспериментальной установки

Исследование смачивания при растекании капли по твердой горизонтальной поверхности проводилось на установке (рис. 2.1), предназначенной для определения характеристик гидродинамических и теплофизических процессов в условиях интенсивного нагрева капель.

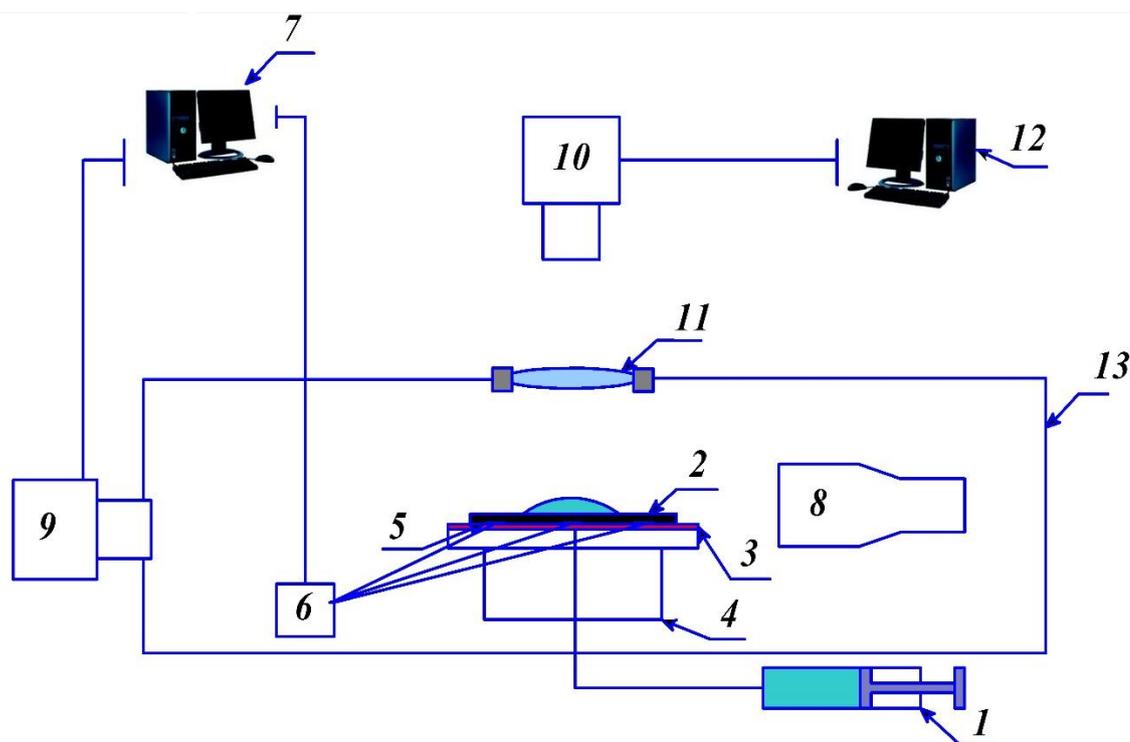


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – насос шприцевой (EW-74905-04); 2 – подложка; 3– термоэлектрический модуль (А-2ТМ 8.0-127/126-1.4 HR1) (GNL18/M); 4 – гониометр; 5 – термопары (ОМЕГА 5ТС-ТТ-К-40-36) 6 – контроллер (National instruments 9214); 7,12 – персональный компьютер; 8 – источник света (MI-150); 9,10 – высокоскоростные видеокамеры Fastvideo-500M; 11 – линза верхней оптической системы; 13– прозрачный бокс.

Экспериментальная установка состоит из электронного шприцевого насоса 1 с помощью которого капля жидкости выдавливалась через отверстие диаметром 2 мм с нижней стороны подложки 2. Последняя установлена на платформе оригинальной конструкции, которая может подогреваться с нижней стороны термоэлектрическим модулем 3 (A-2TM 8.0-127/126-1.4 HR1), закрепленным на алюминиевой пластине гониометра 4..

Пучок света от источника 8 проходил через волоконно-оптический иллюминатор попадая в телецентрическую трубу, где преобразовывался в плоскопараллельный свет. Последний освещал каплю, лежащую на поверхности подложки. Видеозапись теневого изображения процесса динамического смачивания проводилась высокоскоростной камерой Fastvideo-500M с максимальным разрешением 1280 x 1024 пикселей и частотой 10 кадров в секунду оснащенной макрообъективом (Sigma AF 105 mm f/ 2.8 EX DG).

Для контроля симметричности капли используется высокоскоростная камера 10. Объектив данной регистрационной аппаратуры не обеспечивал получение видеок кадров, анализ которых позволял бы определить отклонение капли от шарового сегмента. Поэтому при видеозаписи для увеличения размеров видеок кадров использовалась линза 11.

Экспериментальная установка изолирована от внешних факторов, изменяющих температуру (скорость и влажность окружающей среды) прозрачным боксом 13 изготовленным из полимерного стекла толщиной 3мм (рис. 2.2).

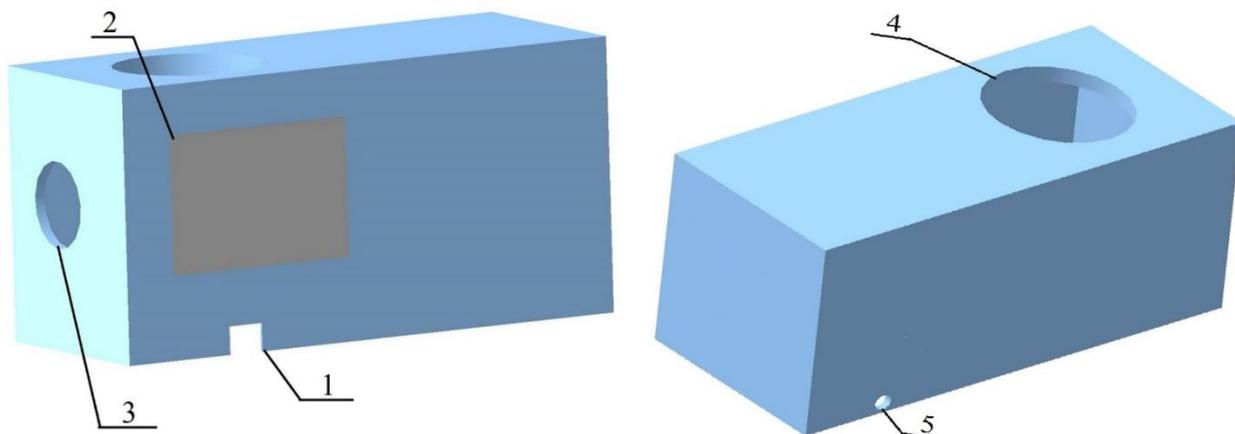


Рисунок 2.2 – Бокс из полимерного стекла: 1 – вырез для установки термопар; 2 – дверца, для проведения эксперимента. 3,4 – отверстия, выполненные для исключения искажений видеофиксации растекания капли жидкости по подложке; 5 – отверстие, для присоединения патрубка шприцевого насоса к рабочему участку.

2.2 Методика проведения эксперимента

2.2.1 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований

При проведении эксперимента на начальной стадии необходимо установить некоторые взаимосвязи при протекании различных явлений. В заключительной стадии формируется цель исследования, определяются величины – факторы, влияющие на свойства объекта и вид их взаимосвязи. Иными словами, выдвигается гипотеза о виде модели исследуемого объекта. В соответствии с видом модели строится план проведения эксперимента. От того, насколько правильно выбран план проведения эксперимента, в особенности, если объект сложный, зависит успех дальнейших исследований. Правильно выбранный план позволяет несколько уменьшить объем исследований, а также минимизировать влияние на результат исследования неучтенных или неконтролируемых (неуправляемых) факторов.

Наиболее предпочтительным является активный эксперимент, который предполагает возможность воздействия на ход процесса и выбора в каждом опыте уровней факторов. При планировании активного эксперимента решается задача рационального выбора факторов, существенно влияющих на объект исследования, и определения соответствующего числа проводимых опытов. Выбранные факторы должны быть однозначно управляемыми и операциональными, то есть поддающимися регулированию с поддержанием на заданном уровне в течение всего опыта при соблюдении последовательности необходимых для этого действий. Должна быть назначена также точность измерения факторов в выбранном диапазоне измерения. При проведении эксперимента варьировалась скорость подачи жидкости.

2.2.2 Выбор области изменения основных факторов

В работе исследуется процесс растекания капли дистиллированной воды на металлических поверхностях. Необходимо включить в исследование все факторы, влияющие на процесс, а также выбрать локальную область факторного пространства. Выбранные факторы должны быть управляемыми, поскольку эксперимент является активным.

При планировании эксперимента важным условием является независимость факторов, т. е. возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. Если это условно невыполнимо, то невозможно планировать эксперимент.

После определения всех факторов необходимо выбрать их основной уровень (нулевой уровень). Далее для каждого фактора следует выбрать уровни, на которых он будет варьироваться в эксперименте (верхний уровень +1, нижний уровень -1).

Интервалом варьирования факторов называется некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровни фактора. Другими словами, интервал варьирования – это расстояние на координатной оси между основным и верхним (или нижним) уровнем. Таким образом, задача выбора уровней сводится к более простой задаче выбора интервала варьирования.

На выбор интервалов варьирования накладываются естественные ограничения сверху и снизу. Интервал варьирования не может быть меньше той ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора. Априорная информация, необходимая для установления интервалов варьирования факторов: сведения о точности, с которой экспериментатор фиксирует значения факторов, о кривизне поверхности отклика и о диапазоне изменения параметра оптимизации.

Для определения интервалов варьирования факторов проведен предварительный эксперимент. По результатам предварительного эксперимента

определены основные значения различных факторов на трех уровнях (табл.2.2.1).

Выбор варьирования такого фактора, как объем капли, лимитируется с одной стороны погрешностью шприцевого насоса, с помощью которого формируется капля, а с другой стороны – разрешающей способностью объектива камеры на установке.

Таблица 2.2.1 – Основные факторы

Фактор	Значение факторов			
Скорость подачи жидкости, мл/с	0,04	0,07	0,09	0,11
Объем капли, мкл	0,25			
Поверхности	Алюминий (АМГ6)	Латунь (Л59)	Медь (М1)	Структурированная поверхность алюминия (АМГ6)
Жидкость	Дистиллированная вода			

Немаловажными являются такие факторы как материал подложек, шероховатость поверхности.

Выходными параметрами будут являться следующие данные:

1. Контактный угол;
2. Контактный диаметр.
3. Радиус кривизны.

Исключение случайной погрешности обеспечивалось повторением экспериментов.

2.2.3 Подготовка к проведению эксперимента

Для экспериментального исследования процесса смачивания жидкостью твердых подложек использовалась дистиллированная вода. В качестве подложек использовались круглые диски толщиной 4 мм и диаметром 54 мм. Для подачи воды в каждой из них просверлено отверстие диаметром 2 мм. Было выбрано 4 материала подложек: медь, алюминий, магналий и латунь. Каждая из них была

обработана на шлифовальном станке, для получения наименьшей шероховатости. Подложки обрабатывались этиловым спиртом и дистиллированной водой для очистки от различного рода загрязнений. Использовались следующие материалы подложек: медь, латунь, алюминий.

Микрорельеф поверхностей измерялся профилометром «Micro Measure 3D station» (рис. 2.3). Основной особенностью установки является специально разработанный фирмой «STIL» (Франция) бесконтактный метод измерения оптическими датчиками. «Micro Measure 3D station» используется для измерения геометрических линейных величин, из которых формируются профили и топологии поверхности исследуемого образца.



Рисунок 2.3 – Измерительная установка «Micro Measure 3D station»

Стандартная конфигурация измерительной установки «Micro Measure 3D station» содержит (рис. 2.4):

– сенсорный блок CHR (специальная разработка фирмы «STIL»), который состоит из оптоэлектронного блока и от одного до трех оптических датчиков. Датчики установлены на моторизованном элементе оснастки, который позволяет смещать датчик по Z-оси;

- предметный стол, на который помещается объект для исследования. Стол расположен под оптическим датчиком и позволяет с высокой точностью смещать объект вдоль X и Y-оси;
- блок питания шаговых двигателей моторизованных элементов оснастки установи;
- блок управления смещением моторизованных элементов оснастки установи вдоль X, Y и Z-оси (джойстик);
- электронно-вычислительная машина с установленным программным обеспечением “Surface Map”, которая управляет процессом измерения и сохраняет результаты испытания.

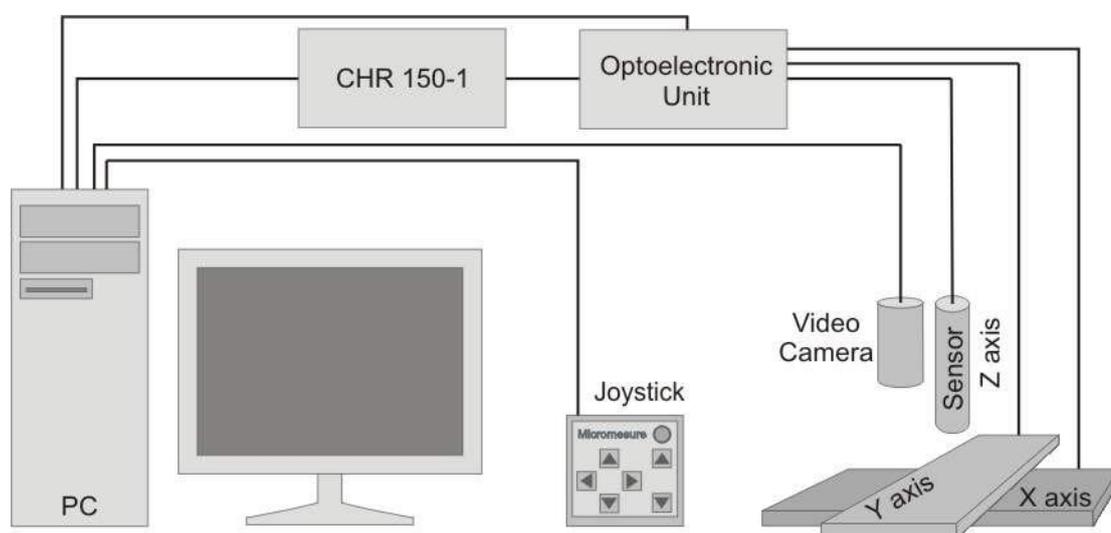
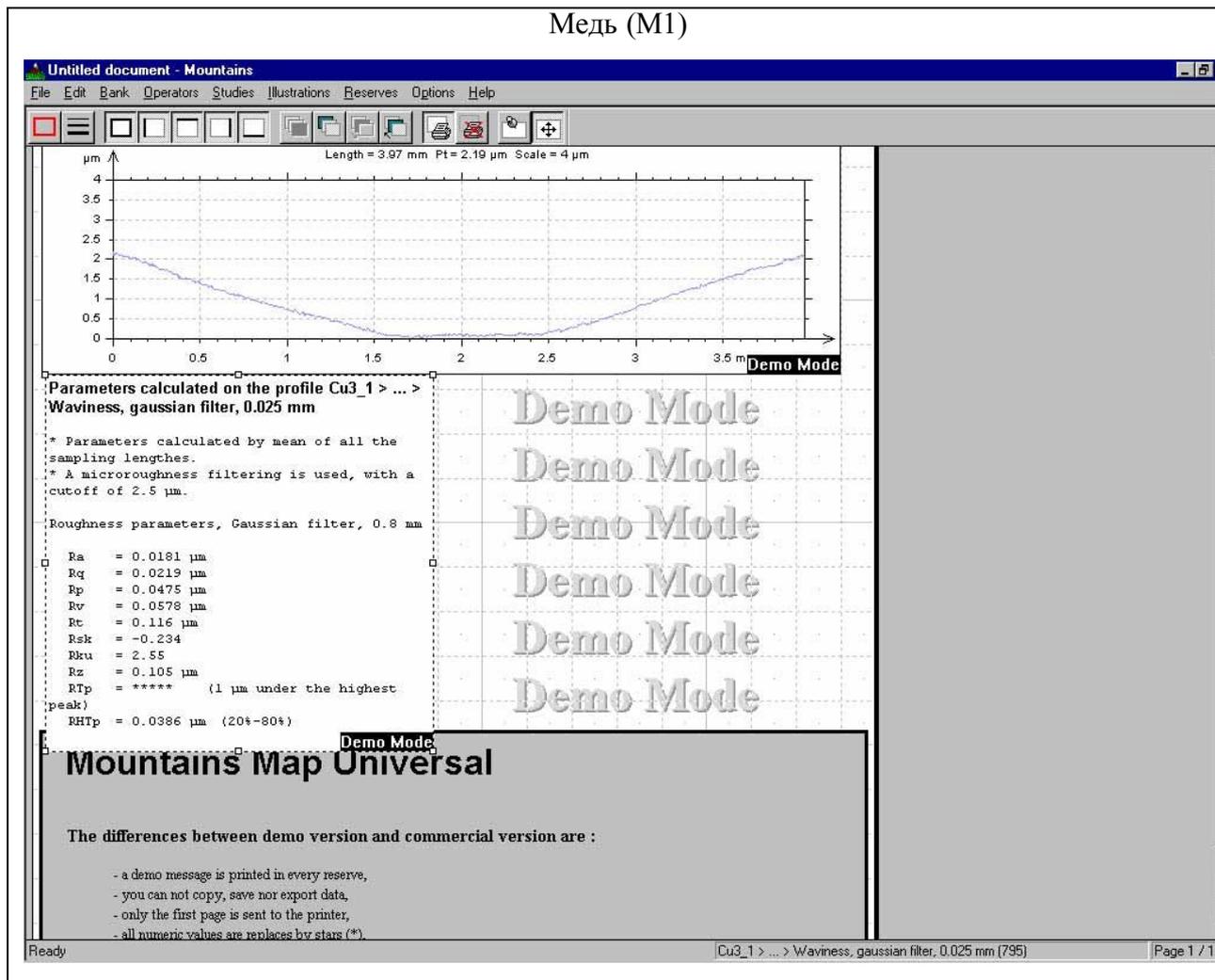


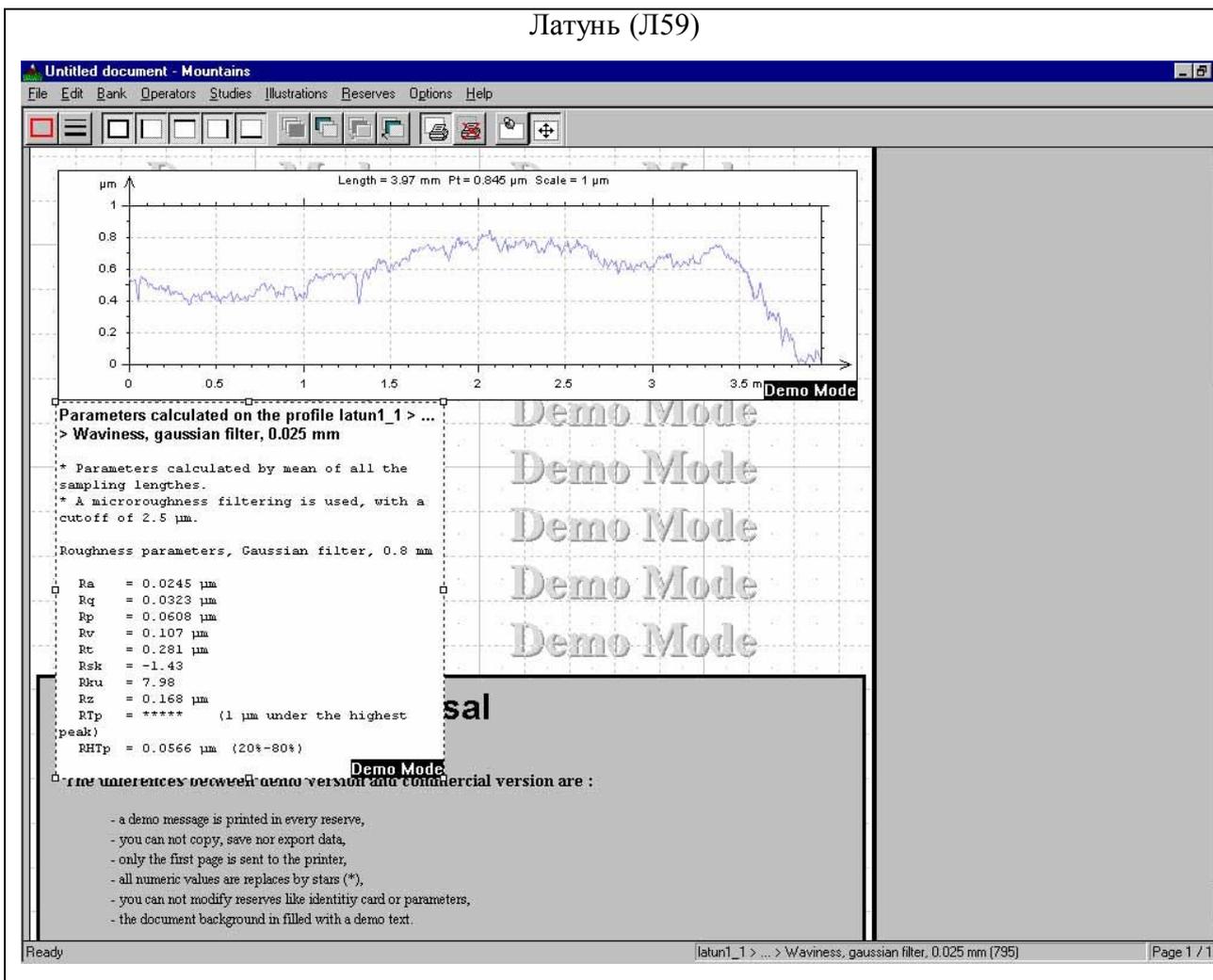
Рисунок 2.4 – Конфигурация измерительной установки “Micro Measure 3D station”.

В таблице 2.2.2 и 2.2.3 представлены профили шероховатых поверхностей и численные значения параметров шероховатости подложек, полученные с помощью профилометра “Micro Measure 3D station”.

Таблица 2.2.2 – Профили шероховатых поверхностей подложек



Латунь (Л159)



Алюминий (АМГ6)

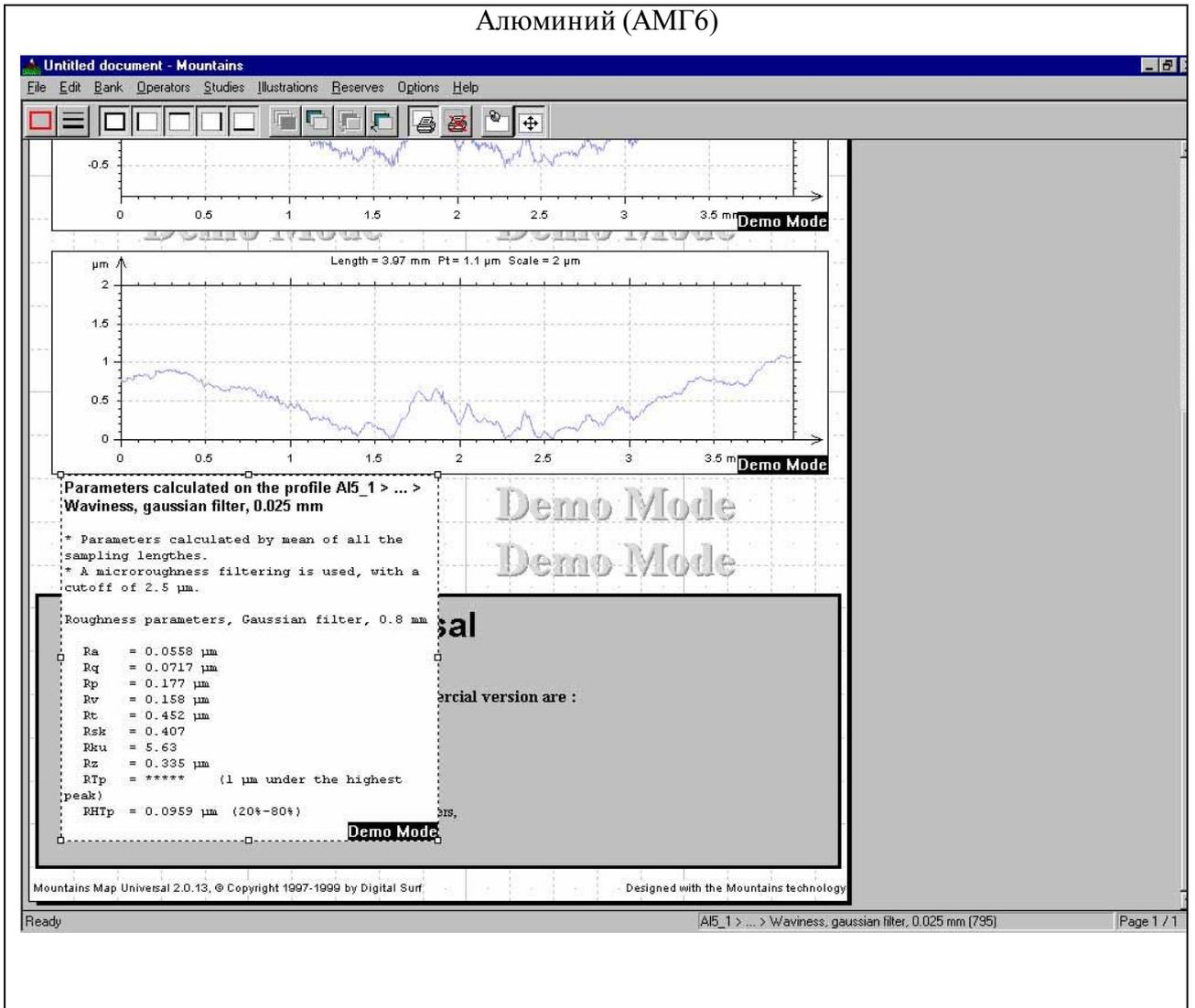


Таблица 2.2.3 – Основные параметры шероховатости поверхностей подложек

Поверхности	R_a , мкм	R_q , мкм	R_p , мкм	R_v , мкм	R_t , мкм	R_{sk} , мкм	R_{ku} , мкм	R_z , мкм	R_{HTr} , мкм
Медь	0,0181	0,0219	0,0475	0,0578	0,116	-0,234	2,55	0,105	0,0386
Алюминий (АМГ6)	0,0558	0,0717	0,177	0,158	0,452	0,407	5,63	0,335	0,059
Латунь	0,0245	0,0323	0,0608	0,107	0,281	-1,43	7,98	0,168	0,0566
Структурированная поверхность алюминия (АМГ6)	4,2096	-	-	-	-	-	-	-	-

Для оценки и нормирования шероховатости поверхности известно около 30 параметров. ГОСТ 2789-73 [42] и 25142-82 [43] регламентирует шероховатость поверхности шестью параметрами:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;

R_q – среднеквадратическое отклонение шероховатости, мкм;

R_p – высота шероховатости поверхности, мкм;

R_v – максимальная глубина впадины профиля, мкм

R_t – полное отклонение (самое значительное изменение уровня между самой высокой вершиной пика и самой нижней точкой впадины), мкм;

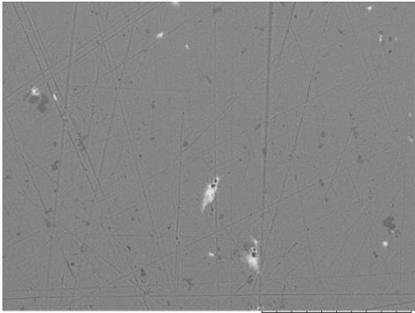
R_{sk} – перекося профиля шероховатости, мкм;

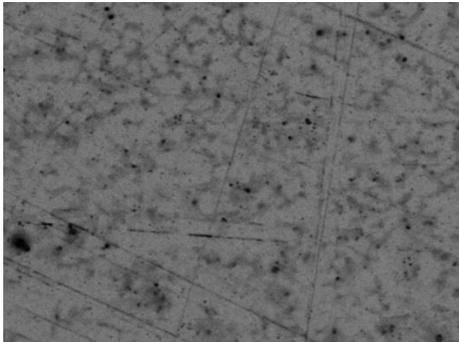
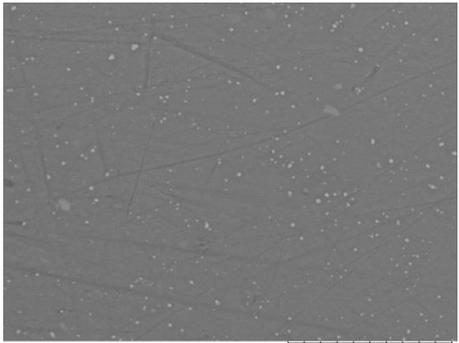
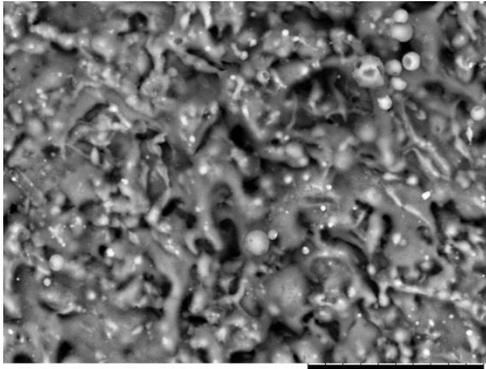
R_{ku} – эксцесс профиля шероховатости, мкм;

R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм;

В таблице 2.2.4 приведены физико-химические свойства подложек и микроструктура.

Таблица 2.2.4 – Физико-химические свойства подложек и микроструктура

 <p>latyn1_0002 2016/03/15 15:18 NL D4.3 x2.0k 30 um</p>	<p>Латунь</p> <p>Плотность $8,4 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,</p> <p>Коэффициент теплопроводности $126 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Коэффициент температурного расширения $21 \frac{1}{^\circ\text{C}}$,</p> <p>Теплоемкость $0,377 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$,</p>
---	--

 <p>Cu3_0003 2016/03/15 16:04 FL D4.9 x2.0k 30 um</p>	<p>Твердость по Бринеллю 163 МПа,</p> <p>Медь</p> <p>Плотность $8,94 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,</p> <p>Коэффициент теплопроводности $387 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Коэффициент температурного расширения $16,7 \frac{1}{^\circ\text{C}}$,</p> <p>Удельное электросопротивление 17,8 Ом · м,</p> <p>Теплоемкость $0,385 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Твердость по Бринеллю 95 МПа, Модуль Юнга 1,28 МПа.</p>
 <p>Al5_0004 2016/03/15 16:23 NL D4.4 x2.0k 30 um</p>	<p>Алюминий</p> <p>Плотность $2,77 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,</p> <p>Коэффициент теплопроводности $130 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Коэффициент температурного расширения $22,9 \frac{1}{^\circ\text{C}}$, Теплоемкость $0,9 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Твердость по Бринеллю 42 МПа, Модуль Юнга 0,72 МПа.</p>
 <p>5_ish0002 2016/05/18 10:11 N D5.0 x2.0k 30 um</p>	<p>Алюминий (структурированная поверхность)</p> <p>Плотность $2,77 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,</p> <p>Коэффициент теплопроводности $130 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Коэффициент температурного расширения $22,9 \frac{1}{^\circ\text{C}}$, Теплоемкость $0,9 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$,</p> <p>Твердость по Бринеллю 42 МПа, Модуль Юнга 0,72 МПа.</p>

2.3 Порядок проведения экспериментов

1. Исследуемая подложка, предварительно очищенная от загрязнений, закрепляется на столике с помощью силиконового водонепроницаемого герметика (т.о чтобы герметик не попал в отверстие и на термопары). После необходимое положение фиксируется с помощью зажимных винтов и крепежного элемента. Определялось положение подложки в двух плоскостях ОХ и ОУ с помощью электронного уровня-угломера (ЗУБР).

2. На пульте управления шприцевым насосом задаются следующие параметры:

- Mode (режим): Infuse/Withdraw (Накачка/ Откачка)
- Syringe (тип шприца): Hamilton 50,00 ml
- Rates: Infuse в ml/min – скорость накачки в мл/мин
- Rates: в Withdraw ml/min - скорость откачки в мл/мин
- Target: Volume в 0,2 ml – объем капли в мл

Перед каждым экспериментом менялась скорость роста капли дистиллированной воды и ее конечный объём. Затем с помощью нагнетания удалялись пузырьки воздуха из патрубка соединяющий насос и рабочий участок установки.

3. Далее настраиваем мощность источника плоскопараллельного света, который попадая на каплю, должен обеспечивать высокую контрастность силуэта. Тень фиксируется цифровой высокоскоростной камерой Fastvideo-500M, которая снимает с фронтальной стороны (рис 2.5). Необходимо настроить фокус камеры, для получения четкого изображения.

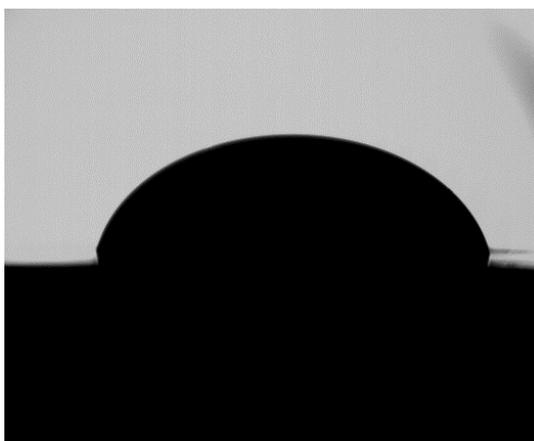


Рисунок 2.5 – Теневое изображение капли

4. С помощью камеры, закрепленной сверху, фиксируются отклонения капли от шарового сегмента. Скоростные видеокамеры запускаются одновременно с началом накачки капли шприцевым насосом через отверстие в подложке.

5. Опыт продолжается до полного исчезновения капли с подложки.

6. Затем начинается стадия обработки данных, которая включает в себя:

- Раскадровку видеофайла на отдельные снимки в программной среде Fast Video Lab;
- Преобразование кадров до необходимого расширения и изменение размеров;
- Обработку в программе Drop Shape Analysis, разработанной исследовательским центром микрогравитации Свободного университета, Брюссель, Бельгия.
- Построение графических зависимостей по результатам обработки.

2.4 Обработка экспериментальных данных

Теневое изображение капли обрабатывается с помощью программного обеспечения Drop Shape Analysis, разработанной исследовательским центром микрогравитации Свободного университета, Брюссель, Бельгия (рис. 2.6). Программа анализирует форму капли и позволяет определить такие параметры

капли, как контактный угол, радиус основания, объем и другие размеры капли для описания ее профиля, используя следующие методы: метод Юнга-Лапласа, тангенциальный метод 1, тангенциальный метод 2, метод круга, метод длины-ширины.

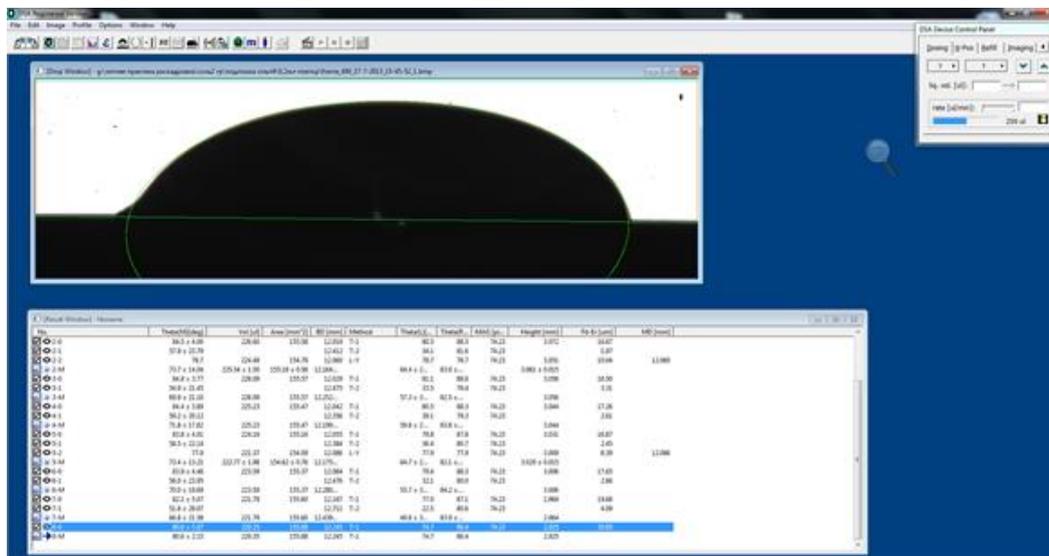


Рисунок 2.6 – Интерфейс программы Drop Shape Analysis

Наиболее часто используемым является метод Юнга – Лапласа (метод лежащей капли), поскольку данный метод отличается достаточно высокой точностью. При расчете этим методом учитывается то, что не только межфазные взаимодействия разрушают форму капли, но и ее собственный вес. Модель предполагает, что форма капли симметрична. Контактный угол определяется из уравнения Юнга по основным размерам капли (диаметру d и высоте h):

$$\cos \theta = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2}.$$

В методе круга капля представляется как часть круга, и контактный угол рассчитывается с помощью сегмента окружности.

В методе длины-ширины оценивается длина растекания капли и ее высота. Контур, являющийся частью окружности, вписывают в прямоугольник и рассчитывают контактный угол из соотношения ширины и высоты. Данный метод более точен для мелких капель, формы которых ближе к сфере. Не

подходит для динамического краевого угла, т.к. игла остается в капле и нельзя точно определить высоту капли.

При использовании тангенциального метода 1 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. контактный угол. Этот метод может использоваться с динамическими методами оценки.

В тангенциальном методе 2 часть контура лежащей капли, расположенной рядом с базовой линией, адаптирована к функции полинома типа $y = a + bx + cx^{0.5} + \frac{d}{\ln x} + \frac{e}{x^2}$. Эта функция получилась в результате многочисленных математических моделирований. Метод считается точным, но чувствительным к загрязнениям и посторонним веществам в жидкости. Подходит для определения динамических контактных углов, но он требует высокой четкости изображений, особенно в точке контакта фаз.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ41	Малыхиной Екатерине Руслановне

Институт	Энергетический	Кафедра	Теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	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>	
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	
2. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет.</i>	
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НИИ</i>
2. <i>Таблицы оценки вариантов проведения исследования</i>
6. <i>График проведения и бюджет НИИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А. А.	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Малыхина Екатерина Руслановна		

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью настоящего раздела является экономическое обоснование научно–исследовательской работы. В последней экспериментально определены зависимости динамического контактного угла, гистерезиса от объема капли дистиллированной воды, скорости ее образования на металлических гладких и микроструктурированных поверхностях.

5.1. Экспертная оценка

Выбор метода оценки формы лежащей капли влияет на точность анализа полученных результатов.

Проведение экспертной оценки позволит установить лучший метод обработки данных. Поэтому зададимся параметрами, по которым будем сравнивать методы.

Модель экспертной оценки построена по следующим параметрам:

1. Простота;
2. Точность;
3. Наглядность;
4. Отсутствие влияния внешних факторов;
5. Адаптированность к установлению зависимостей.

Три эксперта оценили параметры методов по 10-бальной шкале (10 - max) “ V_i ”, а также важность параметра по 5-бальной шкале (5 - max) “ P_i ”.

Для каждого метода определяем весовой коэффициент W_i , определяемый отношением $P_i/\sum P_i$, и оценку эффективности V_i*W_i .

Расчёт считается верным, если суммарный весовой коэффициент равен единице. Таким образом, весовой коэффициент W_i показывает долю важности каждого из параметров.

В таблице 5.1 приведены известные способы оценки формы капли.

Таблица 5.1 – Методы оценки формы лежащей капли

№	Название метода
1	Метод Юнга-Лапласа
2	Метод длины-ширины
3	Метод круга
4	Тангенциальный метод 1
5	Тангенциальный метод 2

В таблицах 5.2 – 5.4 представлены результаты оценки эффективности методов, проведенных экспертами.

Таблица 5.2 – Оценка эффективности методов первым экспертом

Название метода	Просто-та	Точность	Наглядность	Отсутствие влияния внешних факторов	Адаптированность к установлению зависимостей	Σ
Метод Юнга-Лапласа	7/1,27	10/2,27	8/1,45	6/1,36	6/1,09	7,45
Метод длины-ширины	6/1,09	5/1,14	10/1,82	4/0,91	4/0,73	5,68
Метод круга	7/1,27	7/1,59	10/1,82	5/1,14	6/1,09	6,91
Тангенциальный метод 1	8/1,45	8/1,82	8/1,45	6/1,36	8/1,45	7,54
Тангенциальный метод 2	3/0,54	8/1,82	8/1,45	3/0,68	9/1,64	6,14
Важность (b _i) [1-5]	4	5	4	5	4	22
Вес (W _i)	0,18	0,23	0,18	0,23	0,18	–

Таблица 5.3 – Оценка эффективности методов вторым экспертом

Название метода	Простота	Точность	Наглядность	Отсутствие влияния внешних факторов	Адаптированность к установлению зависимостей	Σ
Метод Юнга-Лапласа	9/1,63	10/2,27	9/1,63	6/1,36	7/1,27	8,18
Метод длины-ширины	5/0,91	6/1,36	8/1,45	3/0,68	5/0,91	5,32
Метод круга	8/1,45	6/1,36	10/1,82	6/1,36	4/1,73	6,72
Тангенциальный метод 1	8/1,45	9/2,04	10/1,82	6/1,36	7/1,27	7,95
Тангенциальный метод 2	4/0,72	7/1,59	9/1,64	4/0,91	8/1,45	6,32
Важность (b _i) [1-5]	4	5	4	5	4	22
Вес (W _i)	0,18	0,23	0,18	0,23	0,18	–

Таблица 5.4 – Оценка эффективности методов третьим экспертом

Название метода	Простота	Точность	Наглядность	Отсутствие влияния внешних факторов	Адаптированность к установлению зависимостей	сумма
Метод Юнга-Лапласа	4/0,72	9/2,04	8/1,45	5/1,14	7/1,27	6,63
Метод длины-ширины	9/1,64	2/0,45	9/1,63	2/0,45	2/0,36	4,54
Метод круга	7/1,27	5/1,14	7/1,27	6/1,36	7/1,27	6,32
Тангенциальный метод 1	7/1,27	7/1,59	8/1,45	7/1,59	7/1,27	7,18
Тангенциальный метод 2	2/0,36	9/2,04	8/1,45	2/0,45	9/1,64	5,95
Важность (b _i) [1-5]	4	5	4	5	4	22
Вес (W _i)	0,18	0,23	0,18	0,23	0,18	–

В таблице 5.5 представлены итоговые экспертные оценки.

Таблица 5.5 – Итоговые экспертные оценки

Название метода	Первый эксперт	Второй эксперт	Третий эксперт	Средняя оценка
Метод Юнга-Лапласа	7,45	8,18	6,63	7,42
Метод длины-ширины	5,68	5,32	4,54	5,18
Метод круга	6,91	6,72	6,32	6,65
Тангенциальный метод 1	7,54	7,95	7,18	7,56
Тангенциальный метод 2	6,14	6,32	5,95	6,14

По результатам трех независимых экспертных оценок, самый худший результат у метода длины-ширины. Наивысшую среднюю оценку по предоставленным параметрам сравнения получил метод тангенциальный 1. Проанализировав данные результаты, принимаем для определения динамического контактного угла тангенциальный метод 1. Для большей точности будем использовать два метода: тангенциальный метод 1 и метод Юнга-Лапласа. После проведения серии экспериментов можно будет сравнить между собой результаты, полученные двумя методами и сделать вывод об эффективности того или иного метода.

5.2 Календарный план

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

В таблице 5.6 представлен перечень работ и участников в рамках проведения научного исследования.

Таблица 5.6 – Перечень работ и определение участников каждой работы

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

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

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

Согласно Производственному календарю на 2015 год:

В 2015 году 365 календарных дней. При пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями будет 247 рабочих дней, в том числе 5 сокращенных на один час предпраздничных рабочих дней, и 118 выходных и нерабочих праздничных дней.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

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

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

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,4777.$$

Продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях:

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

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

Рассчитанные значения в календарных днях округляем до целого числа.

Результаты расчетов сведем в таблицу 4.7.

Таблица 5.7 – Продолжительность работ

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

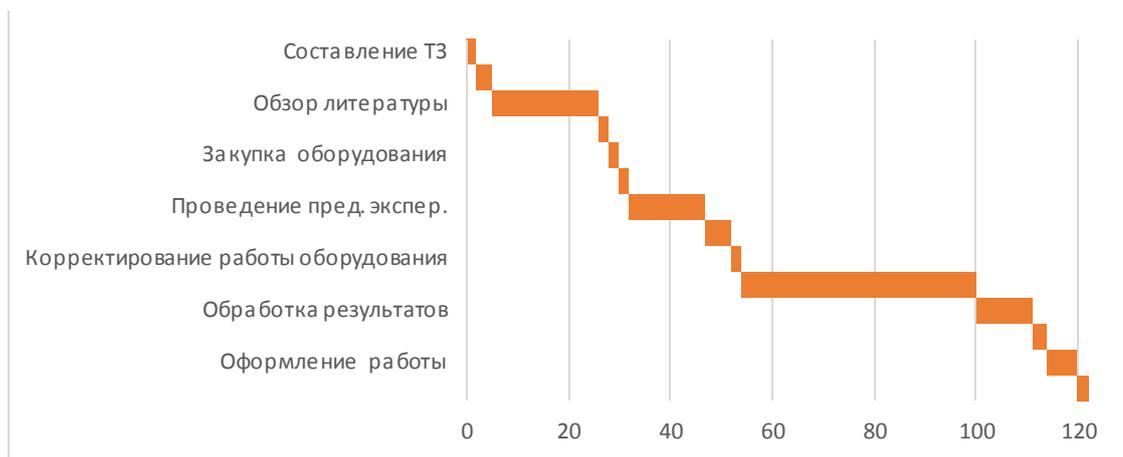


Рисунок 5.1 – График Ганта

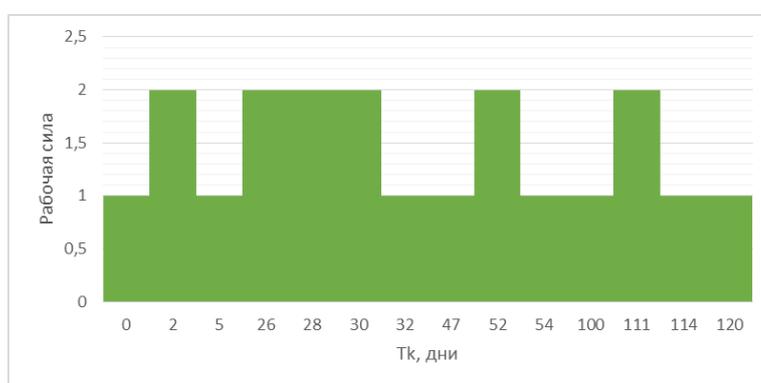


Рисунок 5.2 – Диаграмма использования рабочей силы

5.3 Смета. Бюджет проекта

При планировании сметы проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы проекта используются следующие статьи затрат:

- материальные затраты проекта;
- затраты на электроэнергию;
- полная заработная плата руководителя проекта;
- амортизация.

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

- приобретаемые со стороны материалы, необходимые для создания научно-технического стенда;

- оборудование для проведения эксперимента;
- продукции для обеспечения нормального технологического процесса или расходов на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования);
- материалы, используемые в качестве объектов исследований;
- канцелярские принадлежности, ручки, бумага, картриджи и т.п.

Стоимость каждого материала определяется по формуле:

$$C = K \cdot Ц,$$

где K – количество (объем потребления), шт.;

$Ц$ – стоимость единицы материала, руб.

В таблице 5.8 приведены материальные затраты проекта.

Таблица 5.8 – Материальные затраты проекта

Статьи расходов	Единица измерения	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.
Фотоаппарат <u>Nikon D7100</u>	Шт.	39000	1	39000
Объектив Sigma	Шт.	22000	1	22000
Батарейная блок «MB-D15 для Nikon D7100» для непрерывной съемки	Шт.	5200	1	5200
Беспроводная погодная станция In/OutDoor	Шт.	1848	1	1848
Изоляционная лента «Safeline MULTECH 911 PRO»	Шт.	48	1	48
Клей Герметик МОМЕНТ силикон	Шт.	117	1	117
Канц. товары				
• Ручки, карандаши, шпрых и т.д.	–	–	–	250
• Бумага;	Пачка	150	1	150
• Флешка	шт.	250	1	250
• Дополнительные расходы	–	–	–	350
Заправка картриджей	Шт.	150	1	150
Электроэнергия	КВт·ч	4,25	162,1	688,93
ИТОГО:				70891,93

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

Расходы на электроэнергию представлена в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Электропотребление

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

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

Таблица 5.10 – Амортизация

Объекты	Норма амортизации	Первич. стоимость	Величина амортизации в год	Кол-во часов работы в год	Амортизация в час	Кол-во часов работы	$C_{\text{Аморт}}$
Компьютер	20	40000	8000	1720	4,651163	144	669,77
Принтер	20	5100	1020	10	102	1	102
Фотоаппарат	20	39000	7800	675	11,55556	60	693,33
Видеокамера	20	300000	60000	675	88,88889	60	5333,33
Комплекс осветительного оборудования	20	12154,48	2430,896	675	3,601327	60	216,08
Термопары	20	30473	6094,6	338	18,03136	60	1081,882
Линейный источник питания постоянного тока	20	19655	3931	338	11,63018	40	465,21
Насос	20	58900	11780	169	69,70414	10	697,04
Объектив Sigma	20	22000	4400	675	6,518519	60	391,11
Объектив Nicon	20	65000	13000	675	19,25926	60	1155,56
Итого							10805,31

Оплата работы руководителя ВКР (бакалавра) почасовая. Заработная плата руководителя выпускной квалификационной работы бакалавра определяется следующим образом.

В соответствии с временным положением о порядке нормирования труда научно-педагогического процесса тариф на почасовую оплату труда – 300 руб/час. Норма времени на руководство ВКР бакалавра 22 часа.

Расходы на оплату труда:

$$C_{\text{з.пл.}} = 22 * 300 = 6600 \text{ руб.}$$

Расходы на социальные нужды:

$$C_{\text{с.н.}} = 0,3 * 6600 = 1980 \text{ руб.}$$

Итого:

$$\sum C_z = C_{\text{з.пл.}} + C_{\text{с.н.}} = 6600 + 1980 = 8580 \text{ руб.}$$

Полная стоимость проекта составит

$$\sum C = \sum C_{м.з} + \sum C_3 + \sum C_A = 70891,93 + 8580 + 10805,31 = 90277,24 \text{ руб.}$$

5.5 Ресурсоэффективность

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по трем вариантам исполнения приведено в таблице 5.11, где исполнение 2 включает в себя использование сверхскоростной видеокамеры для научных исследований Phantom Miro M/R/LC310 стоимостью 1339477 рублей, вместо нынешней фотокамеры D7100, а исполнение 3 характеризуется тем, что установка (стенд) уже собран и докупать оборудование не надо.

Таблица 5.11 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Материальные затраты проекта	90277,24	1363480,93	2003,93
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	8580	8580	8580
Накладные расходы (16 % от суммы ст. 1-2)	15817,16	219529,75	1693,43
Бюджет затрат проекта (Сумма ст. 1- 3)	114674,4	1591590,68	12277,36

Интегральные показатели финансовой эффективности научного исследования:

$$I^{1 \text{ исп}} = \frac{114674,4}{1591590,68} = 0,07 ; I^{2 \text{ исп}} = \frac{1591590,68}{1591590,68} = 1 ; I^{3 \text{ исп}} = \frac{12277,36}{1591590,68} = 0,01 .$$

В таблице 5.12 представлена оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Таблица 5.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

4. Энергосбережение	0,05	2	2	2
5. Надежность	0,15	5	5	5

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

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

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

$$I_{исп3}^p = 1 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,08 + 5 \cdot 0,15 = 3,35.$$

Наиболее ресурсоэффективным оказалось исполнение 1.

