

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

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Смачивание и растекание малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям стали

УДК 532.6:669.1.017:539.211

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б6Б	Котельников Глеб Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Феоктистов Дмитрий Владимирович	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Татьяна Григорьевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Немцова Ольга Александровна	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Бульба Елена Евгеньевна	к.т.н., доцент		

Томск – 2020 г.

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) **Бульба Е.Е.**
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
5Б6Б	Котельникову Глебу Евгеньевичу

Тема работы:

Смачивание и растекание малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям стали

Утверждена приказом директора (дата, номер) 10.02.2020, №41-31/с

Срок сдачи студентом выполненной работы: 11.06.2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования – смачивание и процесс растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям стали. Предмет исследования – применение молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей для описания динамических процессов в условиях растекания капли жидкости по поверхностям стали, текстурированным лазерным излучением.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Проведение обзора научных публикаций по тематике: смачивание и растекания малых объемов жидкости на поверхностях, текстурированных лазерным излучением. Разработка процедуры оценки геометрических размеров элемента текстуры и параметров шероховатости. Определение основных характеристик процесса динамического смачивания (наступающий и отступающий

	динамические контактные углы, гистерезис). Определение экспериментальных зависимостей динамического контактного угла от микроструктуры поверхности стали, и скорости движения контактной линии.
Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Трубченко Т.Г.
Социальная ответственность	Немцова О.А.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	25.12.2019
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Феоктистов Д.В.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б6Б	Котельников Глеб Евгеньевич		

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

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

P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б6Б	Котельников Глеб Евгеньевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	И.Н.Бутакова
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

Смачивание и растекание малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям стали	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: текстурированные поверхности стали.</p> <p>Области применения: в устройствах медико-биологического назначения, системах охлаждения, автомобилестроение, авиационная промышленность.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <p>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы:</p> <p>-Недостаточная освещенность рабочей зоны</p> <p>-Отклонение показателей микроклимата в лаборатории</p> <p>-Повышенный уровень электромагнитных излучений</p> <p>-Повышенный уровень статического электричества</p> <p>-Опасность поражения электрическим током</p>
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>Литосфера, атмосфера и гидросфера: люминесцентные лампы, твердые бытовые отходы: бумажные, пластиковые);</p> <p>Утилизация люминесцентных ламп и твердых бытовых отходов по</p>

	регламенту СанПиН 2.1.7.1038-01
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможная и наиболее типичная ЧС: Пожар (причиной возникновения пожара может стать нарушение противопожарного режима, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	25.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Немцова Ольга Александровна	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б6Б	Котельников Глеб Евгеньевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б6Б	Котельников Глеб Евгеньевич

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Полная стоимость проекта 217778,8 руб., из них материальные затраты 74172руб., амортизация 9723,43руб., заработная плата участников проекта 79880,7 руб., продолжительность выполнения работы 122 дня, электропотребление 158,6 кВт*ч.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Накладные расходы 16%; Норма амортизации 20 %
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на социальные нужды 30 % Районный коэффициент – 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	-Описание потенциальных потребителей; -Анализ конкурентных технических решений; -SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	-Планирование работ; -Разработка графика Ганта. -Формирование бюджета затрат на научное исследование.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	-Определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Многоугольник конкурентоспособности
2. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	25.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Татьяна Григорьевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б6Б	Котельников Глеб Евгеньевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 108 с. 22 рис., 30 табл., 96 источников.

Ключевые слова: смачивание, растекание, лазерное текстурирование, гидрофильность, молекулярно-кинетическая теория, гидродинамическая теория.

Объектом исследования является смачивание и процесс растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям стали.

Цель работы – установить применимость молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей к описанию динамических процессов в условиях растекания капли жидкости по поверхностям стали, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

В процессе исследования проводились эксперименты по определению статических и динамических контактных углов на поверхностях стали с анизотропной и упорядоченной текстурой.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: экспериментальная установка, включающая в себя оптическую теневую систему и систему визуализации процесса.

Область применения: энергетика (конструирование высокоинтенсивных теплообменных систем), химическая промышленность (транспортировка, разделение жидкостей), авиация (создание самоочищающихся, противотуманных, водоотталкивающих поверхностей), машиностроение (разработка тепловых двигателей), медицина (создание противомикробных поверхностей).

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.

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 – неподвижное состояние 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 – это минимальный угол, достигаемый до того момента, когда линия начинает движение в сторону жидкой фазы.

Номенклатура и единицы измерения

θ_S – статический контактный угол, °;

θ_D – динамический контактный угол, °;

α – угол скольжения, °;

θ_A – наступающий контактный угол, °;

θ_R – отступающий контактный угол, °;

θ_m – микроскопический контактный угол, °;

L – макроскопическая длина;

L_m – микроскопическая длина;

Ca – капиллярное число;

U – скорость перемещения линии трехфазного контакта, мм/с;

k_B – постоянная Больцмана, Дж/К;
 T – абсолютная температура, К;
 κ^0 – частота равновесия случайных молекулярных смещений, Гц;
 λ – среднее расстояние каждого смещения, м;
 h – постоянная Планка, Дж·с;
 γ – поверхностное натяжение, Н/м;
 η – динамическая вязкость, Па·с;
 ξ – коэффициент трения ЛТК, Па·с;
 S_a – среднее арифметическое высоты, мкм;
 S_q – среднее квадратичное высоты, мкм;
 S_{sk} – асимметрия;
 S_{ku} – эксцесс;
 S_{dr} – уровень развернутой межфазной поверхности, %;
 S_z – максимальная высота, мкм;
 S_p – максимальная высота выступов, мкм;
 S_v – максимальная высота впадин, мкм;
 S_{dq} – приращение среднего квадратичного отклонения;
 d – диаметр кратера, мкм;
 s – глубина кратера, мкм;
 h – глубина кратера, мкм;
 d_{cp} – средний арифметический диаметр кратера, мкм;
 $\tilde{\sigma}$ – среднеквадратичное отклонение;
 Δ_{cl} – длина доверительного интервала, мкм;
 $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента;
 α – доверительная вероятность;
 s_{cp} – средняя арифметическая глубина кратера, мкм;
 h_{cp} – средняя арифметическая глубина кратера, мкм;
 v – скорость линейного перемещения лазера, мм/с;
 n – количество линий прохода лазера, мм⁻¹;
 $\theta_{уст}$ – установившийся контактный угол, °;

a – константа, характеризующая время, за которое контактный угол превысит 50% от установившегося значения, сут.;

t – время стабилизации свойств смачиваемости, сут.

R^2 – коэффициент детерминации;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ – плотность, кг/м³;

Обозначения и сокращения

ЛТК – линия трехфазного контакта

МКМ – молекулярно-кинетическая модель

ГДМ – гидродинамическая модель

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп

СКУ – статический контактный угол

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»
2. СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам»
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»
5. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
6. ГОСТ 12.1.005-87 «Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования»

7. СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»
8. ГОСТ 12.0.003-74ССБТ «Система стандартов безопасности труда, опасные и вредные факторы»
9. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Физические факторы производственной среды электромагнитные поля в производственных условиях»
10. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда»
11. ГОСТ 12.1.045–84 «Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»
12. СанПиН 2.2.2./2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
13. РД 39-22-113-78 «Временные правила защиты от проявлений статического электричества»
14. ГОСТ 12.1.030-81ССБТ «Электробезопасность»
15. ГОСТ 12.4.113-82 «Система стандартов безопасности труда»
16. ГОСТ 12.1.009-2016 «Межгосударственный стандарт система стандартов безопасности труда. Электробезопасность.»
17. ГОСТ 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнений»
18. ГОСТ 12.1.007–76ССБТ. «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»
19. ГОСТ 30772-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами.
20. СНиП 21-01-97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений»
21. ГОСТ Р 22.0.01-2016 «Безопасность в ЧС. Защита населения»

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	17
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СМАЧИВАНИЮ И ПРОЦЕССАМ РАСТЕКАНИЯ МАЛЫХ ОБЪЕМОВ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	18
1.1 Изменение свойств смачиваемости после обработки лазерным излучением.....	18
1.1.1 Изменение свойств смачиваемости после обработки пикосекундным лазерным излучением.....	23
1.1.2 Изменение свойств смачиваемости после обработки фемтосекундным лазерным излучением	24
1.1.3 Изменение свойств смачиваемости после обработки наносекундным лазерным излучением.....	27
1.2 Гистерезис контактного угла и динамические контактные углы. Способы определения гистерезиса контактного угла.....	29
1.3 Метод «сидячей капли»	31
1.4 Теоретические и эмпирические модели	32
1.4.1 Гидродинамическая теория.....	32
1.4.2 Молекулярно-кинетическая теория.....	34
1.4.3 Комбинированные модели	36
1.5 Выводы по первой главе	37
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	40
2.1 Обработка поверхности стали одиночным лазерным импульсом	40
2.2 Процедура оценки геометрических размеров элемента текстуры и параметров шероховатости	41
2.3 Описание экспериментальной установки по исследованию поверхностных явлений (смачивания и растекания малых объемов жидкости).....	47

2.4	Исследование микрорельефа.....	49
3	ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	50
3.1	Результаты анализа влияния одиночного лазерного импульса на формирование элемента текстуры на поверхности стали	50
3.2	Инверсия свойств смачиваемости после лазерного текстурирования	56
3.3	Математическое описание гидродинамических процессов в условиях растекания жидкости по текстурированным поверхностям.....	59
4	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	69
	Введение.....	69
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности...	69
4.2	Производственная безопасность	71
4.2.1	Анализ выявленных вредных и опасных факторов.....	71
4.2.2	Обоснование мероприятий по снижению воздействия.....	76
4.3	Экологическая безопасность	77
4.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	79
	Выводы по разделу	80
5	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	81
	Введение.....	81
5.1	Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения...	81
5.1.1	Описание потенциальных потребителей	81
5.1.2	Анализ конкурентных технических решений	82
5.1.3	SWOT – анализ	84
5.2	Планирование и формирование бюджета научных исследований.....	85
5.2.1	Планирование работ.....	85
5.2.2	Разработка графика Ганта	86
5.2.3	Формирование бюджета затрат на научное исследование	88

5.3	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	93
5.3.1	Определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности	93
	Выводы по разделу	95
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
	Список использованных источников	101

ВВЕДЕНИЕ

Контроль смачивания и процесса растекания малых объемов жидкости на технологических поверхностях является актуальной проблемой в связи с возможностью применения полученных результатов. Например, создание самоочищающихся, противомикробных, антикоррозийных, водонепроницаемых материалов, уменьшение сил трения, сопротивления на поверхности. Исследования в этой области, будут интересны предприятиям занимающимся разработкой оборудования для транспортировки, разделения жидкостей, устройств зондирования, антенн, радаров, в космической отрасли, при конструировании спутников.

Лазерное текстурирование – один из перспективных методов создания текстуры на поверхности, позволяющей управлять малыми объемами жидкости. За последние годы ведущими научными учреждениями в области поверхностях явлений ведется поиск обоснования механизма инверсии свойств смачиваемости на различных материалах после лазерного текстурирования.

Цель работы установить применимость молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей к описанию динамических процессов в условиях растекания капли жидкости по поверхностям стали, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

Для достижения поставленной цели решались задачи:

1. Изучить современное состояние исследований по теме бакалаврской работы.
2. Определить параметры импульсной наносекундной лазерной обработки.
3. Выявить связи между свойствами смачиваемости, их изменением во времени после обработки лазерным излучением и текстурой поверхности стали.
4. Установить применимость молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей к описанию динамических процессов в условиях растекания капли жидкости по поверхностям стали, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СМАЧИВАНИЮ И ПРОЦЕССАМ РАСТЕКАНИЯ МАЛЫХ ОБЪЕМОВ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

1.1 Изменение свойств смачиваемости после обработки лазерным излучением

Смачиваемость – свойство, влияющее на различные процессы, такие как коррозия [1], стойкость к биообрастанию, органическим загрязнениям [2,3] или фазовый переход малых объёмов жидкости на поверхностях теплообмена [4,5]. Свойства смачиваемости поверхности характеризуются контактам углом θ и углом скольжения α . Контактный угол определяется как угол между касательной к окружности, образованной каплей, и поверхностью, на которой расположена капля. При контактном угле (краевом угле) $\theta > 90^\circ$ поверхность является гидрофобной, в противном случае она является гидрофильной. Другим свойством поверхности является угол скольжения, который косвенно определяет силу сцепления (адгезии) жидкости и поверхности [6]. Следует отметить, что только в нескольких известных работах угол скольжения измеряется в дополнение к углу контакта. Чаще угол скольжения заменяют гистерезисом контактного угла.

Лазерное текстурирование на основе коротких (наносекундных) или ультракоротких (пикосекундных и фемтосекундных) импульсов является одним из способов для изменения топографии поверхности в микро- и наномасштабе. Данный способ позволяет обрабатывать большую площадь материала за относительно короткое время. Отсутствие особых требований, таких как вакуумная среда или химические покрытия вместе с его адаптивностью к различным материалам может способствовать его использованию для изменения свойств смачиваемости металлов [7], полимеров [8], керамики [9] или природного камня [10].

Переход смачиваемости от супергидрофильных к гидрофобным свойствам по мере прохождения времени после лазерной обработки поверхностей металлов, изучалось ведущими научными группами под руководством ученых мирового уровня. Однако, несмотря на это, механизм инверсии свойств смачиваемости после лазерного текстурирования не ясен. Авторы [11,12] утверждают, что оксиды металлов, генерирующиеся при лазерной обработке, способствуют появлению гидрофильных свойств поверхности. Эти оксиды очень активны и имеют тенденцию реагировать с окружающими молекулами неорганических загрязнений с течением времени, уменьшая поверхностную энергию и смачиваемость как следствие [6]. В работах [13,14] предложена гипотеза о том, что шероховатость поверхности является основной причиной изменения смачиваемости, но в работах [15–17] утверждается, что изменение смачиваемости связано с изменением элементного состава поверхности [18].

Большинство известных работ посвящены исследованиям изменения свойств смачиваемости поверхностей металлов после их обработки лазерным излучением в воздушной среде. Однако, известна работа [5], где рассматривается роль атмосферы (окружающей среды) на изменения свойств смачиваемости поверхностей нержавеющей стали в условиях ее обработки лазерным излучением [5]. Исследование влияния среды обработки было разработано путем текстурирования поверхности нержавеющей стали AISI 304 в атмосфере кислорода, воздуха, углекислого газа, азота и аргона. Различия свойств смачиваемости были обнаружены между образцами, обработанными в различных атмосферах, с контактным углом в диапазоне от 30° до 122°. Принимая во внимание, что идентичные значения параметров шероховатости и микро топографии были определены для всех этих поверхностей, субмикроскопические свойства указывали на возможные химические различия между ними. Результаты анализа энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали изменения в относительных количествах кислорода и азота. Измерения с помощью рентгеновской

фотоэлектронной спектроскопии подтвердили наличие разного количества оксидов и нитридов для каждой атмосферы. Изменения контактных углов, измеренных на поверхностях, текстурированных лазерным излучением и хранящихся в различной среде (атмосфер кислорода, воздуха, углекислого газа, азота и аргона), обусловлены изменением элементного состава приповерхностного слоя (в частности доли кислорода и азота). Увеличение доли кислорода и азота в элементном составе приповерхностного слоя приводит к увеличению оксидов и нитридов, которые в свою очередь являются сильно полярными соединениями. С увеличением полярности в поверхностной энергии металла свойства смачиваемости ухудшаются контактный угол на таких поверхностях растет. Можно сделать вывод о том, что лазерная наносекундная обработка поверхности металла и их сплавов позволяет изменить свойства смачиваемости поверхности до супергидрофильности и супергидрофобности без использования дорогостоящих химических покрытий, которые характеризуются не долговечностью.

Придать поверхности металла и их сплавам гидрофобные свойства можно различными методами: химическим покрытием, лазерной обработкой, механическим надрезом, химическим травлением. В настоящее время гидрофобность функциональных поверхностей широко используется в различных областях науки и техники: снижение гидравлического сопротивления трубопровода, усиление конденсации жидкости (например, в конденсаторах тепловых электростанций), снижение адгезии льда и, как следствие, поверхность защищена от образования льда и т.д. Создание поверхностей с гидрофобными свойствами с помощью лазерного текстурирования в основном изучается на поверхностях алюминия, меди и стали, а также на поверхностях из различных композиционных материалов. Известно [1,3,4,19,20], что на поверхностях алюминия после лазерной обработки проявляются гидрофобные свойства, характеризующиеся контактными углами от 150° до 176° при угле скольжения $2,3^\circ$; на

поверхностях стали [21,22] проявляются гидрофобные свойства, характеризующиеся контактными углами от 130° до 160° . Поверхности меди [23–26] после лазерной обработки демонстрируют контактные углы от 148° до 160° . Полученные результаты (контактные углы и углы скольжения) варьируются в зависимости от геометрии рельефа и способов последующей обработки поверхности. Так, например, рельефное текстурирование наносекундным лазерным излучением на поверхности алюминия [23] и последующим низкотемпературным старением при температура порядка 100°C в течении 3-5 часов приводит к гидрофобизации поверхности характеризующейся контактным углом 176° и углом скольжения 6° [5].

В работе [6] проведены исследования по гидрофобизации поверхностей латуни и нержавеющей стали с использованием лазерного оборудования. Одним из эффектов, получаемых при гидрофобизации поверхности, является снижение адгезии ко льду, следовательно, использование гидрофобных поверхностей позволяет снизить интенсивность образования льда на поверхности. Проблема образования льда важна, например, в установках рекуперации воздуха (приточно-вытяжная вентиляция). В такой системе происходит теплообмен между горячим теплым воздухом, удаляемым из помещений, и холодным воздухом, подаваемым в зимнее время. Нагрев холодного воздуха позволяет снизить энергопотребление приточно-вытяжной системы в зимнее время года, повышая тем самым ее эффективность. Однако при охлаждении нагретого воздуха на холодной поверхности теплообмена, изготовленной обычно из оцинкованной стали, происходит конденсация влаги и образование наледи, что, в свою очередь, приводит к уменьшению площади прохода каналов регенератора и увеличению теплового сопротивления поверхности теплообмена. При этом может произойти замерзание вплоть до полной блокировки канала теплопередачи, что приведет к аварийному отключению приточно-вытяжной вентиляции. Возможным решением проблемы является гидрофобизация

поверхности теплообменной оцинкованной стали с помощью лазерного текстурирования упорядоченного рельефа [6].

Супергидрофильные поверхности привлекли большое внимание благодаря своим интересным применениям, таким как межклеточные манипуляции [27], теплопередача [28,29], бимолекулярная иммобилизация [28,30], уменьшение сопротивления [28,31] и снижение адгезии льда [32]. Смачиваемость поверхности металла изменяется со временем из-за любого химического воздействия [33] или загрязнение органическими/углеродными материалами при воздействии воздуха [34]. Поэтому, сохранение долговременных супергидрофильных свойств на металлической поверхности является основной задачей при изучении таких поверхностей. Известны методы получения поверхностей металлов с супергидрофильными свойствами, таких как плазменная обработка [35], поверхностные покрытия [36] и химическая или электрохимическая обработка [37]. Эти методы, однако, сложны и включают в себя несколько этапов. Обработка поверхности лазером может быть простой и экологически чистой, и ее можно использовать для модификации различных материалов [38,39]. На сегодняшний день известна работа [18] по созданию стабильной супергидрофильной поверхности металла с использованием простого, экологически чистого и одностадийного процесса. В работе [18] продемонстрирован простой одностадийный метод изготовления стабильной (не менее 6 месяцев) супергидрофильной поверхности с использованием наносекундного лазерного текстурирования поверхности подложки из нержавеющей стали с одновременным осаждением стекла. Благодаря сочетанию изменения шероховатости поверхности, химического состава поверхности и поверхностной энергии долговечность супергидрофильности сохранялась в течение более шести месяцев. С увеличением числа проходов лазерного луча и уменьшением его скорости перемещения по поверхности шероховатость и количество кислорода и диоксида кремния в элементном

составе приповерхностного слоя увеличиваются, что приводит к повышению смачиваемости поверхности [18].

1.1.1 Изменение свойств смачиваемости после обработки пикосекундным лазерным излучением

В работе [40] исследовалось – изменение свойств смачиваемости и бактериальной адгезии после пикосекундного лазерного текстурирования поверхности мартенситной нержавеющей стали AISI 420. Такая сталь является наиболее распространенным материалом для медицинских изделий и использовалась в качестве подложек для образцов, которые разрезались до размеров 10 мм (ширина) × 10 мм (длина) × 1 мм (толщина). Полированные образцы сначала очищали в ультразвуковой ванне в среде этанола в течение 10 минут, а затем текстурировали поверхность с помощью пикосекундной лазерной системы. Последняя характеризуется длительностью импульса 10 пс, частотой 400 кГц, длиной волны 515 нм, энергией в импульсе 1 мДж. Текстурирование проводилось в лабораторных условиях с контролируемой температурой 25°C и относительной влажностью 21%. Образец после лазерного текстурирования погружали в 0,01 моль/л раствор стеариновой кислоты (Sigma-Aldrich) при температуре окружающей среды в течение 60 минут и сушили в печи (60°C) в течение 10 минут для достижения супергидрофобных свойств. Для изучения антибактериальных свойств были изготовлены три типа образцов: полированная поверхность, поверхности металлов демонстрирующие супергидрофильные и супергидрофобные свойства. Были созданы три типа текстур поверхности: «периодическая рябь», «двумерная иерархическая матрица микровыпуклостей» и «матрица микропитч с нанопульсациями». После обработки лазерным текстурированием сталь первоначально показала гидрофильность с контактным углом θ менее 10°; затем он постепенно приобрел высокую гидрофобность и супергидрофобность с контактным углом более 150°. Утверждается, что эта инверсия смачиваемости обусловлена изменением

топографии и химического состава поверхности, вызванных лазерным излучением, из-за изготовления двухмерной иерархической структуры поверхности и рендеринга углеродного образования, что приводит к уменьшению поверхностной энергии. Лазерные текстурированные супергидрофобные поверхности нержавеющей стали будут иметь практическое применение во многих областях, таких как медицинское оборудование, фармацевтическое производство, контейнеры для пищевых продуктов. Лазерно-индуцированные текстуры поверхности на подложках из металлических пресс-форм затем копировались на полипропиленовые подложки литографией под давлением. Контактный угол поверхности полипропилена изменился с 96° до 156° , что указывает на то, что была достигнута супергидрофобная поверхность полипропилена. Этот разработанный процесс имеет потенциал для применения при изготовлении микрофлюидных устройств и потребительских пластмассовых изделий с легкой функцией очистки [40].

Влияние пикосекундного текстурирования на инверсию свойств смачиваемости также изучалось в работе [41]. В этом исследовании регулярные иерархические структуры, состоящие из массивов микростолбцов и различных нанотекстур, были изготовлены на поверхностях нержавеющей стали под воздействием пикосекундного лазерного излучения. После текстурирования поверхности характеризовались контактными углами от $152,3^\circ$ до $159,7^\circ$ и сильными адгезионными свойствами, что в основном можно объяснить реализацией состояния Касси на поверхности. Эти результаты продемонстрировали, что на контактные углы и адгезию существенно влияет текстура поверхности.

1.1.2 Изменение свойств смачиваемости после обработки фемтосекундным лазерным излучением

Исследовалось [14] изменение свойств смачиваемости после обработки фемтосекундным лазерным излучением. В качестве подложек были

использованы листы нержавеющей стали 316L толщиной 1 мм. Лазерные импульсы длиной волны 800 нм, частотой повторения 1 кГц, длительностью импульса 150 фс и максимальной выходной мощностью около 2 Вт использовались для текстурирования образцов. Мощность падающего лазерного луча регулировалась в диапазоне 5–1700 мВт (пиковая плотность потока: 1,5–480 Дж/см²), а диапазон скорости сканирования варьировался от 250 до 1850 мкм/с. Характеристики свойств смачивания текстурированных образцов оценивали по контактному углу. Результаты анализа изображений поверхности образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ-изображения), показали, что геометрические элементы текстуры полученных микро/наноструктур сильно зависят от параметров лазера (мощности, количество импульсов на точку, скорости сканирования и перекрытия). В этом исследовании влияние мощности лазера и скорости сканирования на изменение текстуры поверхности было исследовано путем поддержания постоянного перекрытия сканирования до 50%.

Одной из основных целей этой экспериментальной работы было определение текстуры, которая «максимизирует» гидрофобность поверхности. Было исследовано влияние параметров лазера, таких как плотность потока лазера и скорость сканирования, на сгенерированные элементы микро/наноструктуры. Было создано четыре наноструктуры, а именно: «нано-волнистые», «параболические колонны», «удлиненные синусоидальные колонны» и «наноструктуры с тройной шероховатостью». Они были классифицированы в соответствии с коэффициентом интенсивности луча, который связан с плотностью потока лазерного излучения и скоростью сканирования (перемещения). Обнаружено, что коэффициент интенсивности луча монотонно коррелирует с периодом модуляции (периодичность микроструктур). Химическая обработка (силанизация) использовалась для уменьшения поверхностной энергии изготовленных подложек. После процедуры силанизации поверхности демонстрировали контактные углы около 105°.

Установлено, что в результате увеличения коэффициента интенсивности луча, контактный угол увеличивается, а гистерезис контактного угла уменьшается. Кроме того, микронеровности покрыты тонким сферическим нано-узором, который называют «тройной шероховатостью» [14]. Такая текстура способствует реализации состояния Касси, либо переходного состояния из Венциля к Касси, а также низкой смачиваемости поверхности и малому гистерезису контактного угла, что придает поверхности супергидрофобные свойства.

В работе [42] использовали поверхности аустенитной нержавеющей стали (AISI 316L) 12 мм × 25 мм и толщиной 0,3 мм. Перед обработкой лазером образцы очищали в ультразвуковой ванне в течение 20 минут в среде ацетона. Для текстурирования образцов использовался сапфировый фемтосекундный лазер с длиной волны 800 нм, длительностью импульса 120 фс, частотой 1 кГц и максимальной непрерывной эквивалентной выходной мощностью 800 мВт.

После лазерной обработки зарегистрировано образование двухуровневых иерархических текстур. Определены гистерезис контактного угла и угол скольжения. Гистерезис контактного угла не превышал $\sim 14^\circ$, угол скольжения $\sim 7^\circ$. Элементный состав приповерхностного слоя обработанной поверхности определен с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. По результатам анализа установлено увеличение количества углерода и кислорода, возможно, из-за абляции и образования оксида. Уменьшение количества Fe указывает на образование оксидов железа.

Чтобы установить влияние лазерной обработки на различные материалы, была проведена серия экспериментов с алюминием (Al6061) и карбидом вольфрама. Al6061 - это широко используемый материал во многих отраслях промышленности, а карбид вольфрама - это материал, используемый для изготовления поверхностей режущих инструментов. До лазерного текстурирования поверхность алюминия характеризовалась

контактным углом порядка 76° . После лазерной обработки контактный угол увеличился до 160° . Контактный угол для не текстурированного карбида вольфрама не превышал 75° . После лазерной обработки контактный угол увеличился до 147° . Эти результаты указывают на то, что гидрофобность не зависит от материала, а гидрофобное поведение поверхности обусловлено образованием двухуровневых иерархических текстур.

После начальных измерений контактного угла было выполнено многократное смачивание/удаление влаги с поверхности образца. Обнаружено, что контактный угол остается в пределах 10° от исходного значения до тех пор, пока не достигнет состояния Венциля. После этого происходит быстрое ухудшение гидрофобных свойств (контактный угол приблизительно на 30° меньше первоначального значения). Состояние Венциля достигается из-за гидростатического давления, при дозировании капли большого объема (50 мкл и более), или погружении образца на 10 см под воду на продолжительный период времени. Однако, после испарения всей влаги, гидрофобные свойства восстанавливаются, и значения контактного угла возвращаются к исходным.

Установлено, что по истечению 20 дней хранения образцов на открытом воздухе гидрофобные свойства не меняются [42].

1.1.3 Изменение свойств смачиваемости после обработки наносекундным лазерным излучением

Большинство известных работ опираются на дорогостоящие и сложные (фемто-/пико-секундные) лазеры [7,14,42–47]. Для этих лазеров энергия импульса является относительно низкой, поэтому для создания модификации поверхности требуется высокое перекрытие импульсов, и, следовательно, скорость обработки низкая. Для реальных промышленных применений важна возможность создания супергидрофобных поверхностей металла с использованием компактных, надежных и экономически эффективных альтернатив с быстрым временем обработки, таких как наносекундные

лазеры. Медь и латунь широко используются для электронных компонентов и промышленных устройств из-за их высокой теплопроводности. Однако на них легко влияют условия окружающей среды, такие как высокая влажность, приводящая к коррозии. Обнаружено, что эти проблемы могут быть предотвращены на этих материалах путем создания супергидрофобной поверхности [48]. В статье [48] описан способ придания супергидрофобных свойств поверхностям меди и латуни, текстурированных наносекундным лазерным излучением. После лазерной обработки поверхности становятся гидрофильными, однако смачиваемость поверхности со временем снижается, о чем свидетельствует увеличение контактного угла. Первое измерение было сделано после того, как образцы были оставлены в условиях окружающей среды в течение 3 дней. Контактный угол имеет высокий темп роста в течение первых 10 дней, который затем замедляется до постепенного роста, прежде чем достигнет устойчивого состояния. Устойчивое состояние было достигнуто через 11 дней для образцов меди с латунным текстурированных при 75 и 55 Дж/см². Однако для меди, текстурированной при 93 Дж/см², потребовалось гораздо больше времени, примерно 30 дней [17].

Установлено, что поверхности меди и латуни могут стать супергидрофобными с помощью компактного и экономичного наносекундного лазерного текстурирования. Гидрофильное свойство обусловлено высокой шероховатостью поверхности образованной лазерным излучением. Однако эта роль морфологии (шероховатости) поверхности изменяется со временем, что приводит к тому, что поверхности становятся супергидрофобными. Изменение смачиваемости связано с изменением элементного состава поверхности, в которой частичное окисление оксида меди до диоксида меди может являться ключевым фактором. Контактный угол в устойчивом состоянии не превышает 152°, а гистерезис 4°. Обнаружено, что супергидрофобные поверхности проявляют самоочищающиеся свойства и демонстрируют потенциал для применения в жидких химических сенсорах.

В статье [49] получены супергидрофобные поверхности на подложках из алюминия, нержавеющей стали, титанового сплава и меди путем наносекундного лазерного текстурирования и модификации фторалкилсиланом. Результаты показали, что скорость, частота и мощность лазерного излучения оказывают большое влияние на создаваемые элементы микроструктуры образцов. На поверхностях, подвергнутых лазерному текстурированию, были сформированы микромасштабные элементы текстуры (кратеры). Глубина кратера увеличивалась с увеличением мощности из-за высокой энергии лазера. Кроме того, из-за высокой температуры металлические капли разбрызгивались по поверхности, что приводило к более сложным микроструктурам. Увеличение частоты уменьшало энергию одного импульса, но увеличивало количество импульсов в единицу времени. Таким образом, распределение кратеров становилось более плотным, а поверхность имела более волнистые структуры. После текстурирования и модификации фторалкилсиланом эти поверхности характеризовались контактным углом более 160° [49].

1.2 Гистерезис контактного угла и динамические контактные углы. Способы определения гистерезиса контактного угла.

Согласно закону Юнга косинус контактного угла можно выразить через поверхностные и межфазные натяжения. Однако в действительности существует ряд дополнительных факторов, таких как адсорбция загрязнений на поверхности, ее химической неоднородность и другие факторы, которые способствуют формированию нескольких устойчивых контактных углов, отличных по значению от равновесного. Это явление называется гистерезисом контактного угла.

Определить значение гистерезиса можно, измерив, динамические контактные углы: наступающий и отступающий. Наступающий контактный угол (θ_A) это максимальное значение контактного угла, достигаемого перед началом движения контактной линии в сторону газовой фазы. Отступающий

угол (θ_R) это минимальный угол перед началом движения контактной линии в сторону жидкой фазы. Статический угол принимает определенное значение в интервале $\theta_R \leq \theta_S \leq \theta_A$.

На практике численное значение гистерезиса получают из разности между наступающим и отступающим углами неподвижной контактной линии (рис.1.1).

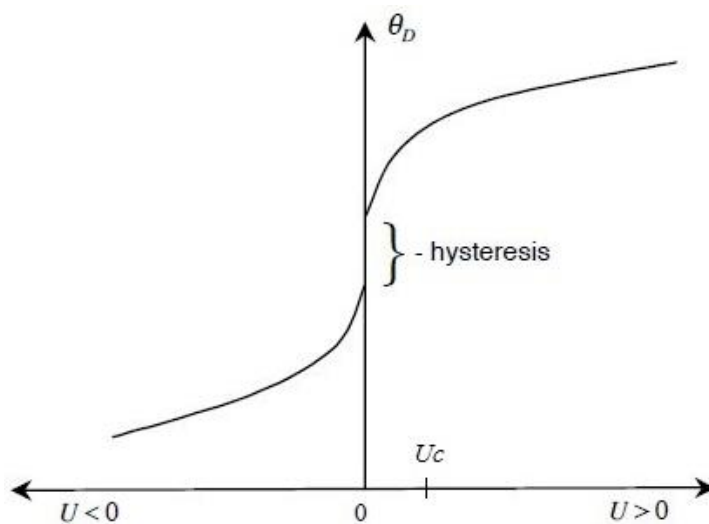


Рисунок 1.1 – Зависимость динамического контактного угла от скорости перемещения линии трехфазного контакта. При $U > 0$ линия наступающая, при $U < 0$ – отступающая [50]

По результатам рассмотренных публикаций гистерезис контактного угла на металлах обработанных наносекундным лазерным излучением составил $3\text{--}4^\circ$ [17], на металлах обработанных фемтосекундным лазерным излучением составлял $5\text{--}14^\circ$ [42], и на металлах обработанных пикосекундным лазерным излучением 3° [51].

Таким образом, по величине гистерезиса контактного угла можно оценить гладкость и химическую однородность поверхностей. Например, поверхность является гладкой и ровной, если гистерезис $\theta_A - \theta_R \leq 5^\circ$ [52]. Известно, что супергидрофобные поверхности характеризуются большими значениями динамического контактного угла и малым значением

гистерезиса, за счет чего ослабляются силы пиннинга. Это позволяет капле воды беспрепятственно перемещаться по такой поверхности.

1.3 Метод «сидячей капли»

Наиболее распространенным методом дозирования капли является метод «сидячей капли» (рис.1.2). Используя шприц, игла которого находится в объеме капли над подложкой, либо посредством шприцевого насоса при подаче жидкости через отверстие в исследуемой подложке каплю помещают на горизонтальную поверхность. Данный метод является достаточно простым и обладает хорошей точностью получения динамических контактных углов.

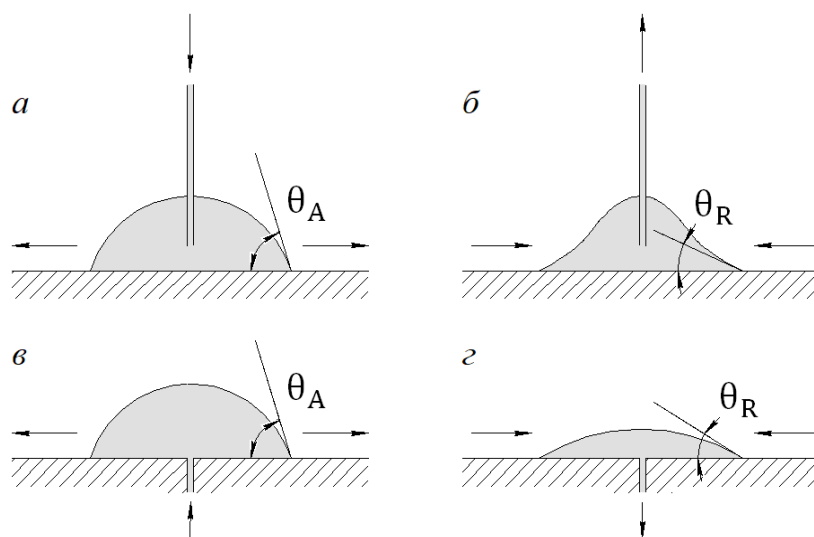


Рисунок 1.2 – Способ получения наступающей (а,в) и отступающей (б,г) контактной линии методом сидячей капли

Для реализации данного метода в ряде экспериментальных исследований применялся шприцевой насос. Метод обладает рядом преимуществ: возможность контролировать начальный объем капли и увеличивать его после формирования капли. Наиболее важной особенностью метода является отсутствие столкновения капли с поверхностью, что позволяет исключить из рассмотрения динамику этого процесса.

1.4 Теоретические и эмпирические модели

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 [52–54]. В основе второго подхода лежит гидродинамика. В её рамках рассматривается влияние вязких напряжений на изменение краевого угла при движении трехфазной линии контакта [55–59]. Строго говоря, ни гидродинамическая, ни молекулярно-кинетическая теория не являются теорией. Это конкретные модели, основанные на более широких теоретических системах: с одной стороны, гидромеханика, с другой - кинетическая теория жидкостей.

1.4.1 Гидродинамическая теория

Гидродинамическая теория, основывается на принципе: изменения динамического контактного угла, последнее объясняются вязким изгибом границы раздела “жидкость-газ” в мезоскопической области ниже зоны наблюдения. Обычно предполагается, что микроскопический угол θ_m определяется межмолекулярными силами ближнего действия и сохраняет свое статическое значение θ_s , хотя в качестве способа определения θ_m также предложены эмпирические зависимости между θ_m и U . Таким образом, в рамках этой гидродинамической модели имеются три соответствующие шкалы величин (рис. 1.3).

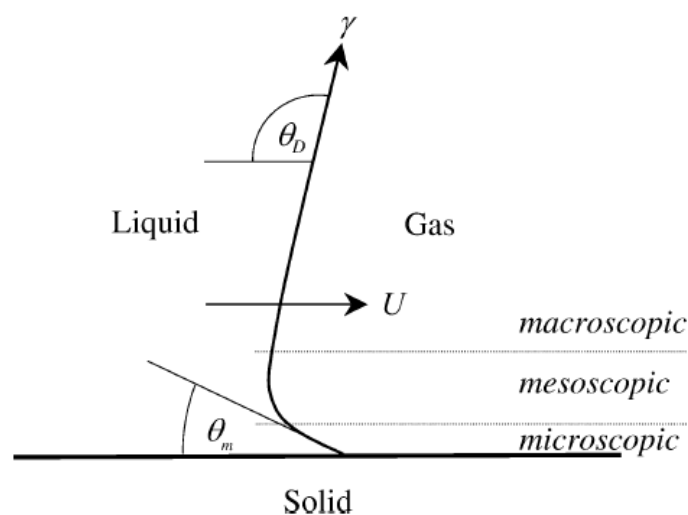


Рисунок 1.3 – Вязкое изгибание на мезомасштабах для движущейся контактной линии [60]

Классический гидродинамический подход к описанию потока вблизи движущейся линии смачивания не приводит к физически приемлемому решению. Из-за конфликта между движущейся контактной линией и обычным граничным условием скольжения между жидкостью и твердым телом напряжения на линии смачивания не ограничены, и сила, оказываемая жидкостью на твердое тело, становится бесконечной [61]. Вязкое изгибание становится важным только в мезомасштабах. Макроскопический динамический контактный угол затем определяется путем экстраполяции статической границы раздела к твердой поверхности.

Формула, описывающая изменение динамического угла контакта из-за вязкого изгиба границы раздела “жидкость-газ” (рис. 1.3), может быть записана через капиллярное число:

$$\theta_D^3 - \theta_m^3 = 9Ca \ln\left(\frac{L}{L_m}\right), \theta_m = \theta_s, \theta_D < 3\pi/4, \quad (1.1)$$

где L и L_m – соответственно выбранные макроскопические и микроскопические шкалы длины соответственно, $Ca = \frac{U\eta}{\gamma}$ – капиллярное число, θ_m – микроскопический угол, θ_D – динамический контактный угол.

Некоторые авторы, в том числе Войнов [62], признают, что θ_m может зависеть от скорости. Однако, за исключением случая смачивания пленкой-предшественником, нет прямых экспериментальных свидетельств вязкого изгиба до степени, необходимой для объяснения широкой зависимости динамического контактного угла от скорости.

1.4.2 Молекулярно-кинетическая теория

Другой подход основан на представлении о переносе жидкости как процесса изменения молекулярной скорости с изменением напряжения. Этот подход исключает рассеяние из-за вязкого потока и вместо этого сосредотачивается на том, что происходит в непосредственной близости от движущейся ЛТК вследствие процесса прикрепления или отрыва частиц жидкости (молекул) к или от твердой поверхности (рис. 1.4).

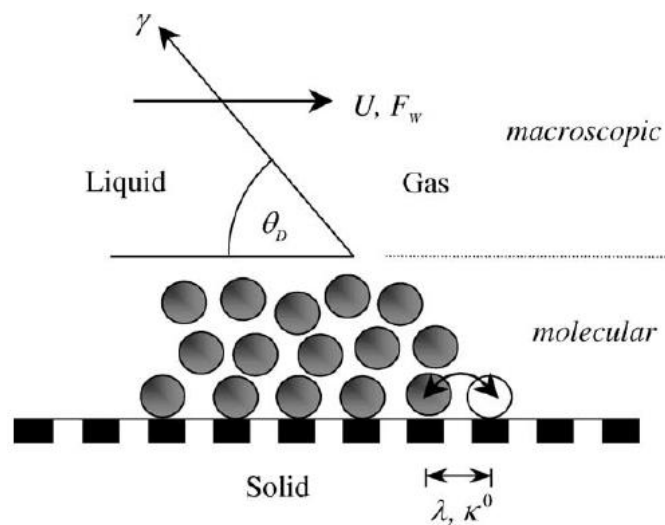


Рисунок 1.4 – Динамическое смачивание по молекулярно-кинетической теории [60]

Согласно этой второй модели, каналом диссипации является динамическое трение, связанное с движущейся контактной линией. Кроме того, контактный угол зависит от скорости и идентичен наблюдаемому в эксперименте углу, то есть $\theta_D = \theta_m$. Таким образом, есть только две шкалы

величин: молекулярная шкала, где происходит диссипация, и макроскопическая шкала, где видны ее эффекты. Этот подход обычно называют молекулярно-кинетической теорией.

Согласно противоположной точке зрения, представленной молекулярно-кинетической теорией, движение линии контакта определяется статистической динамикой молекул в трехфазной зоне, где встречаются твердая, жидкая и газовая фазы (рис. 1.4). В молекулярном масштабе эта зона имеет конечный размер, сравнимый с толщиной границ ее компонентов, но в модели она не указана. Основными параметрами являются κ^0 , частота равновесия случайных молекулярных смещений, происходящих в трехфазной зоне, и λ , среднее расстояние каждого смещения. Зависимость динамического угла контакта от скорости обусловлена нарушением адсорбционных равновесий и, следовательно, изменением локальных поверхностных натяжений при смачивании. Таким образом, движущая сила движения контактной линии в заданном направлении равна несбалансированной силе поверхностного натяжения, которая возникает при нарушении равновесия: $F_w = \gamma (\cos\theta_s - \cos\theta_D)$. В этом случае предполагается, что λ - расстояние между областями адсорбции на твердой поверхности.

Уравнение скорости движения линии трехфазного контакта тогда:

$$U = 2\kappa^0\lambda \sinh[\gamma(\cos\theta_s - \cos\theta_D)\lambda^2/2k_B T], \quad (1.2)$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, κ^0 – частота равновесия случайных молекулярных смещений, λ – среднее расстояние каждого смещения, h – постоянная Планка, γ – поверхностное натяжение, θ_s – статический контактный угол, θ_D – динамический контактный угол.

Предполагается, что энергия, создаваемая потоком, увеличивает движущую силу F_w поверхностного натяжения посредством напряжения сдвига, действующего в трехфазной зоне. Тем не менее, этот упрощенный подход несовершенен, поскольку в нем сочетаются концепции из двух совершенно разных теоретических основ. Хотя молекулярно-кинетическая

теория была впервые разработана вокруг простой адсорбционно-десорбционной модели рассеяния энергии в трехфазной зоне, с самого начала был предусмотрен широкий спектр альтернативных процессов с активированной скоростью [60].

1.4.3 Комбинированные модели

Несмотря на принципиальные различия, как гидродинамическая, так и молекулярно-кинетическая модели достаточно эффективны для описания динамического контактного угла. Однако, как трение на линии смачивания, так и вязкое рассеяние играют определенную роль в определении динамического контактного угла. Авторы [63] сформулировали интегрированную теорию простым способом объединения уравнений (1.1) и (1.2), используя (1.2) для предоставления значения θ_m в (1.1), получили уравнение с тремя регулируемыми параметрами, λ , κ^0 и $\ln(L/L_m)$. Аппроксимация кривой с этим уравнением оказалась успешной, давая лучшее согласие с экспериментальными данными, чем только (1.1) или (1.2), особенно для отступающих линий смачивания и малых контактных углов. Аналогичные результаты были получены другими [64,65]. Авторы [66] использовали другой подход. Рассматривая динамическое смачивание как необратимый процесс, скорость рассеивания энергии на единицу длины линии смачивания является произведением потока U и несбалансированной силы поверхностного натяжения $\gamma(\cos\theta_s - \cos\theta_D)$. Если затем предположить, что полное рассеяние энергии включает в себя вязкие потери в (тонком) слое жидкости рядом с движущейся линией смачивания плюс потери из-за трения на линии смачивания, то, используя упрощенные аргументы, получено:

$$U = \frac{\gamma(\cos\theta_s - \cos\theta_D)}{\xi + \frac{6\eta}{\theta_D} \ln\left(\frac{L}{L_m}\right)}, \quad (1.3)$$

где θ_s – статический контактный угол, θ_D – динамический контактный угол, γ – поверхностное натяжение, длины L и L_m вместе с углом θ_D

определяют слой жидкости, в котором происходит вязкое рассеяние. Длина L характеризует размер слоя, а L_m – молекулярный предел, где механика сплошной среды нарушается, η – динамическая вязкость, $\xi = \frac{k_B T}{k^0 \lambda^3}$ – коэффициент трения по линии смачивания. Поскольку угол слоя θ_D находится в знаменателе вязкого слагаемого, вязкая диссипация доминирует под малыми углами. Используя немного другой метод, авторы [67] вывели уравнение, аналогичное уравнению (3) для растекающейся капли. Их анализ показывает, что режим трения смачивающей линии предшествует режиму вязкости, который становится доминирующим только тогда, когда угол контакта становится небольшим.

Объединив, таким образом, молекулярно-кинетическую и гидродинамическую модели, установлено, что реальная физика движущейся линии смачивания, является более сложной, чем можно предположить по отдельным моделям. Тем не менее, комбинация является по существу феноменологической, и существует риск чрезмерной параметризации с последующим отсутствием устойчивости в установленных значениях. Кроме того, объединенные уравнения остаются ограниченными для потока при капиллярных числах $< 0,1$. Хотя они могут быть полезны для количественной оценки сравнительно медленных событий смачивания, таких как распространение капель и капиллярный поток, уравнения могут иметь лишь предельное значение при прогнозировании результатов высокоскоростных процессов смачивания, таких как сплошное полотно или волокнистое покрытие, где $Ca > 1$ [68].

1.5 Выводы по первой главе

По результатам проведенного обзора литературы, посвященной исследованию смачивания и растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям, установлено, что механизм инверсии свойств смачиваемости после лазерного текстурирования на данный момент остается не изучен на достаточном уровне. Существует несколько гипотез.

Первая гипотеза гласит, что оксиды металлов, генерирующиеся при лазерной обработке, очень активны и имеют тенденцию реагировать с окружающими молекулами с течением времени, уменьшая поверхностную энергию и смачиваемость как следствие. Вторая гипотеза, что основной причиной изменения смачиваемости поверхности является шероховатость. Существует и третья гипотеза, что изменение смачиваемости связано с изменением элементного состава поверхности.

Стабильные супергидрофобные и супергидрофильные поверхности могут быть созданы с использованием пикосекундной, фемтосекундной и наносекундной и лазерной обработки. Изготавливают такие поверхности чаще всего из материалов, хорошо зарекомендовавших себя в производстве, таких как нержавеющая сталь, медь и алюминий. Метод нанесения микроструктуры лазерным излучением имеет достоинства: это бесконтактный, не требующий серьезных капиталовложений метод, который легко использовать, можно получить широкий диапазон текстур (ограничен только параметрами лазерной установки), можно получать текстуры на разных материалах.

Установлено, что формированию нескольких устойчивых контактных углов способствуют такие дополнительные факторы как адсорбция загрязнений на поверхности, ее химической неоднородность и другие. Это явление называется гистерезисом контактного угла. По величине гистерезиса контактного угла оценивают гладкость и химическую однородность поверхностей. Известно, что супергидрофобные поверхности характеризуются большими значениями динамического контактного угла и малым значением гистерезиса.

Рассмотрено несколько моделей для описания процесса смачивания. Одна из которых основана на молекулярно-кинетической теории, в которой смачивание рассматривается с точки зрения кинетики молекулярных процессов, происходящих на линии трехфазного контакта. Другая модель основана на гидродинамике, здесь рассматривается влияние вязких

напряжений на изменение краевого угла при движении трехфазной линии контакта. Установлено, что реальный процесс движения линии трехфазного контакта, является более сложным, чем можно предположить по отдельным моделям, поэтому, были созданы другие теоретические и эмпирические модели, например комбинированные и иные, не рассмотренные в данном обзоре.

Таким образом, можно сделать вывод: изучение процессов смачивания и растекания малых объемов жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям стали является перспективным и актуальным направлением научных исследований.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящая глава содержит описание процесса нанесения текстуры наносекундным лазерным излучением. Описана процедура оценки геометрических размеров элемента текстуры и параметров шероховатости. Приведено описание экспериментальной установки по исследованию поверхностных явлений. Описан метод исследования микроструктуры рельефа.

2.1 Обработка поверхности стали одиночным лазерным импульсом

Воздействие лазерного луча на поверхность стали ASTM A 240/ A 240M 430 (Fe 82.701, C 0.046, Si 0.38, Mn 0.36, P 0.029, S 0.003, Ni 0.22, Cr 16.23, N 0.031 in wt %) проводилось в воздушной среде при температуре 22-23°C, атмосферном давлении, относительной влажности 40–45% иттербиевым наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics с длиной волны 1064 нм. Во время обработки подложка находилась на расстоянии 0,25 м от объектива лазера размером 110x110 мм. Последний с помощью двухосевого гальваносканера перемещался в двух направлениях, параллельных относительно обрабатываемой поверхности. Одиночный лазерный импульс, падающий на полированную поверхность стали, соответствующий гауссовому профилю $M^2 < 2$, фокусировался в пятно диаметром 60 мкм. Воздействие лазерного луча на поверхность стали осуществлялось при фиксированной энергии в импульсе 1 мДж (мощность 20 Вт) в моде TEM_{00} , частоте 20 кГц, времени воздействия 200 нс лазерного излучения. При фиксированных энергии в импульсе, частоты, времени воздействия лазерного излучения, получено три элемента текстуры (кратера).

2.2 Процедура оценки геометрических размеров элемента текстуры и параметров шероховатости

Оценка геометрических размеров элемента текстуры проведена по результатам анализа двумерных и трехмерных изображений, используя программное обеспечение MountainsMap. Данные получены с помощью профилометрического комплекса «Micro Measure 3D station», который используется для измерения геометрических линейных величин, из которых формируются профили и топологии поверхности исследуемого образца. Двумерное изображение образца поверхности стали, представлено на рисунке 2.1.

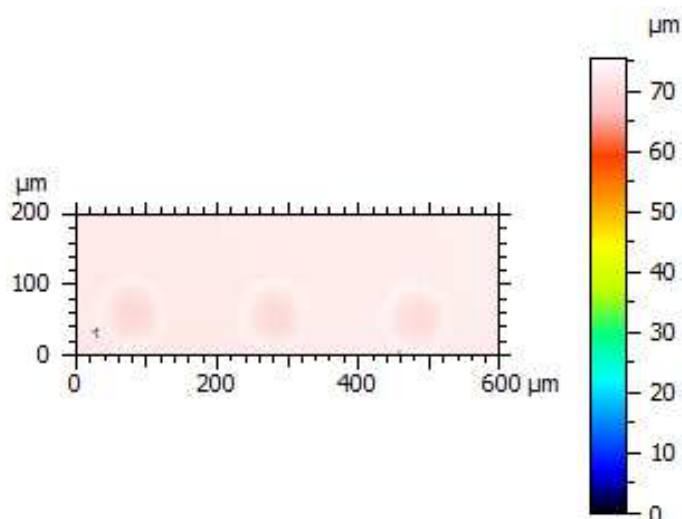


Рисунок 2.1 – Двухмерное изображение образца поверхности стали

Полученное изображение подвергалось процедуре “выравнивание по трем точкам”. Целью выравнивания являлось расположение образца поверхности параллельно плоскости XY, о чем свидетельствует однородность цвета на рисунке 2.2.

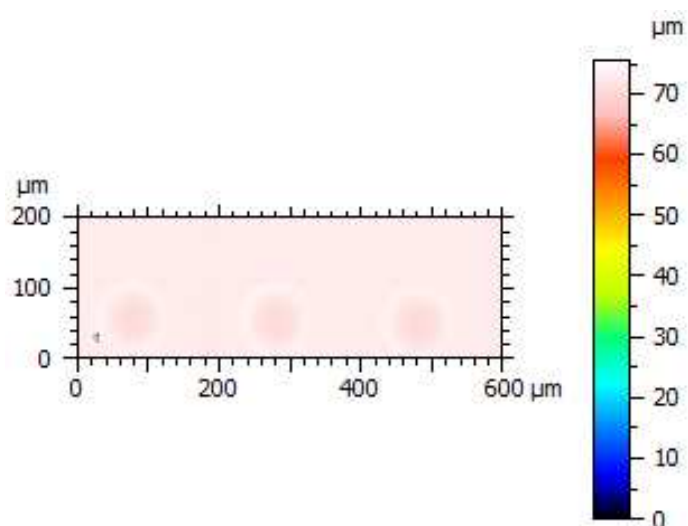


Рисунок 2.2 – Двухмерное изображение образца поверхности стали после процедуры выравнивания

После процедуры выравнивания удалялись ошибочные точки с поверхности, наличие которых определялось по изменению координаты по оси Z. Полученные изображения представлены на рисунках 2.3 – 2.4.

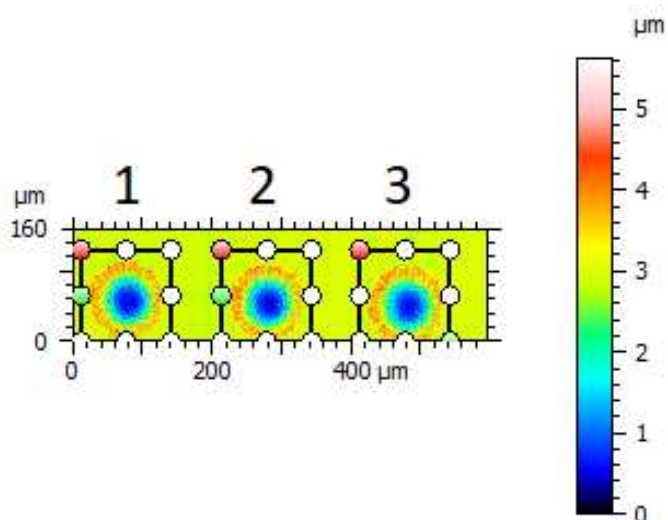


Рисунок 2.3 – Двухмерное изображение образца поверхности стали после процедуры “удаление ошибочных точек” (нумерация кратеров слева направо)

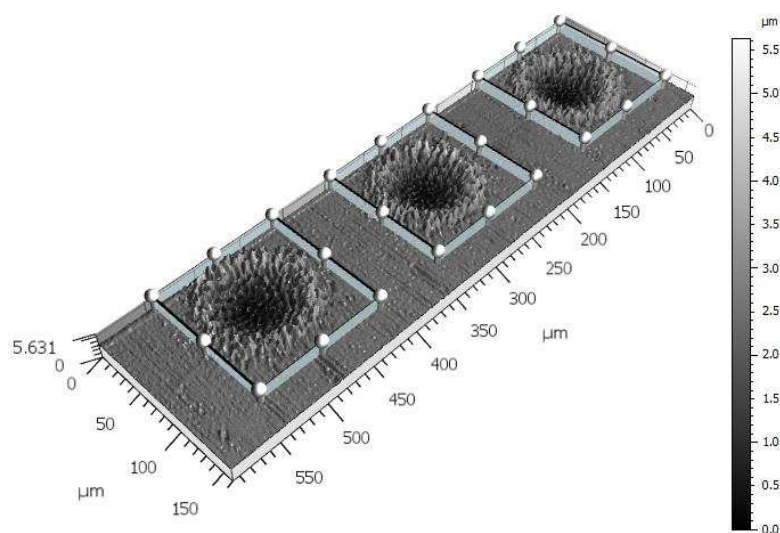


Рисунок 2.4 – Трехмерное изображение образца поверхности стали после процедуры “удаление ошибочных точек”

После применения процедуры “удаление ошибочных точек”, для образца поверхности стали с элементами текстуры определены параметры шероховатости приведенные в табл. 2.1 – 2.2.

Таблица 2.1 – Параметры высоты

Параметр	Sq	Ssk	Sku	Sp	Sv	Sz	Sa
Значение	0.6371	-1.342	7.430	2.774	2.857	5.631	0.3510
ед.изм.	мкм	–	–	мкм	мкм	мкм	мкм

Таблица 2.2 – Гибридные параметры

Параметр	Sdq	Sdr
Значение	0.2279	2.402
ед.изм.	–	%

Параметры Sa и Sq характеризуют общие амплитудные свойства поверхности, но не позволяют различать выступы и углубления. Параметр Sa используется для оценки отклонения от молекулярно-гладкой поверхности. Параметры асимметрии Ssk и эксцесса Sku характеризуют симметрию высот неровностей относительно средней плоскости. Параметр Sdr характеризует приращение относительной площади поверхности. Параметр Sz характеризует высоту неровностей. Параметр Sp характеризует

максимальные значения выступов. Параметр S_v характеризует максимальные углубления. Параметр S_{dq} характеризует приращение среднего квадратичного отклонения.

Оценка геометрических размеров и параметров шероховатости проведена в области с кратером размером $130 \times 130 \mu\text{m}$. Стоит отметить, что область анализа кратера была одинакова в каждой серии экспериментов. Полученные двухмерное и трехмерное изображения первого кратера представлены на рисунках 2.5 – 2.6.

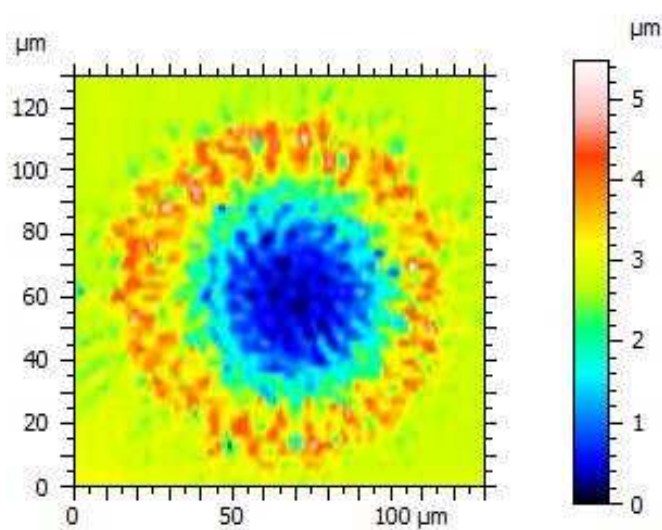


Рисунок 2.5 – Двухмерное изображение первого кратера

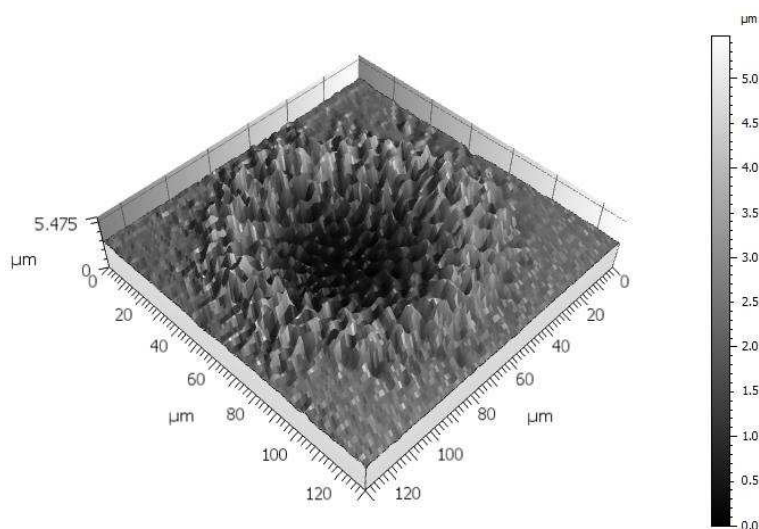


Рисунок 2.6 – Трехмерное изображение первого кратера

Определены параметры шероховатости для образца поверхности стали с первым кратером (табл. 2.3 – 2.4).

Таблица 2.3 – Параметры высоты

Параметр	Sq	Ssk	Sku	Sp	Sv	Sz	Sa
Значение	0,8633	-0,8741	3,919	2,802	2,673	5,475	0,5968
ед.изм.	мкм	—	—	мкм	мкм	мкм	мкм

Таблица 2.4 – Гибридные параметры

Параметр	Sdq	Sdr
Значение	0,3167	4,580
ед.изм.	—	%

Основные измеряемые геометрические размеры элемента текстуры: диаметр кратера, толщина кромок, средняя глубина впадины. Данные размеры кратера оценивались на профиле, полученном по сечениям (рис. 2.7).

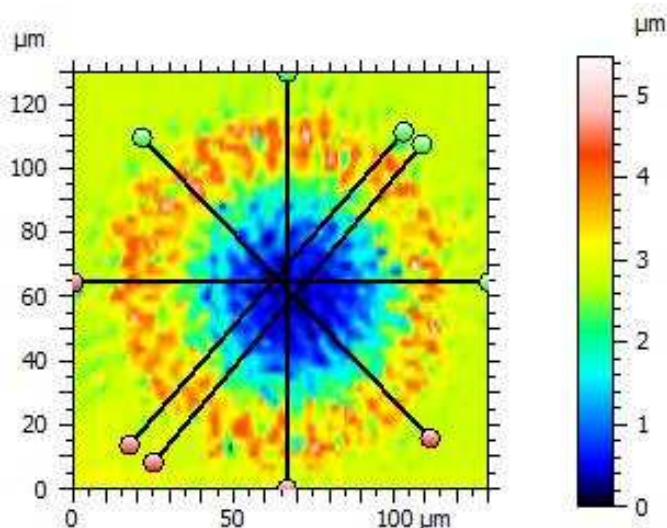


Рисунок 2.7 – Двумерное изображение первого кратера с расположением проведенных сечений

Замер диаметра проводился от вершин кромок кратера. Пример измерения представлен на рисунке 2.9.

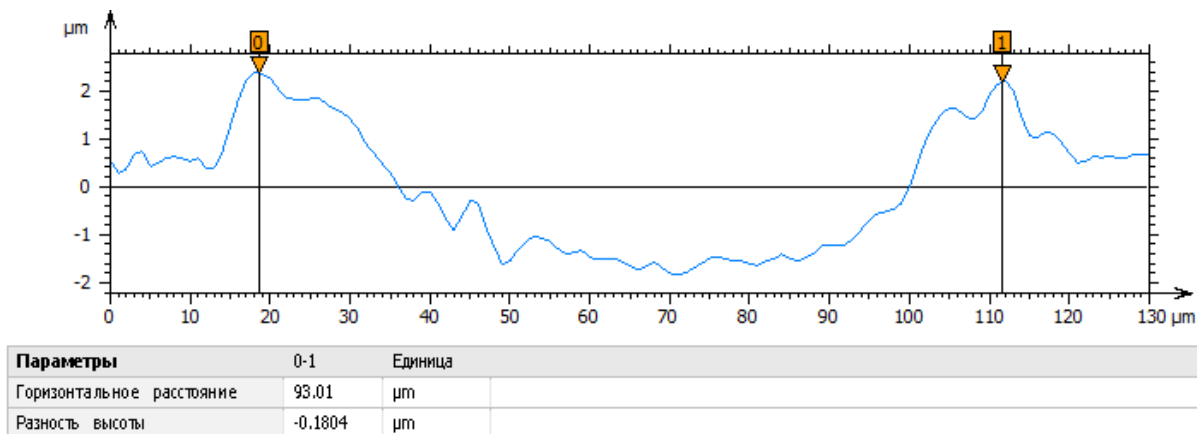


Рисунок 2.9 – Измерение диаметра кратера по профилю

Пример замера толщины кромок представлен на рисунке 2.10.

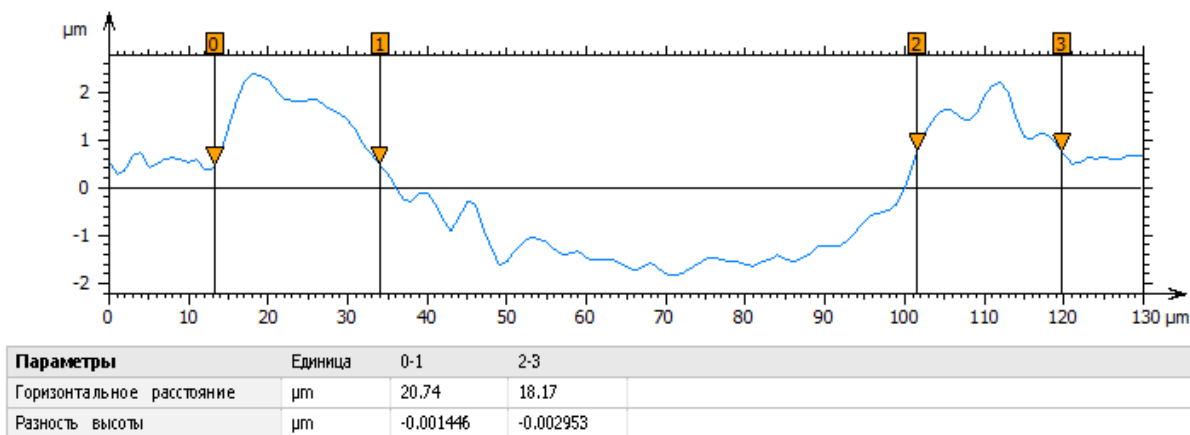


Рисунок 2.10 – Измерение толщины кромок кратера по профилю

Пример замера средней глубины впадины представлен на рисунке 2.11.

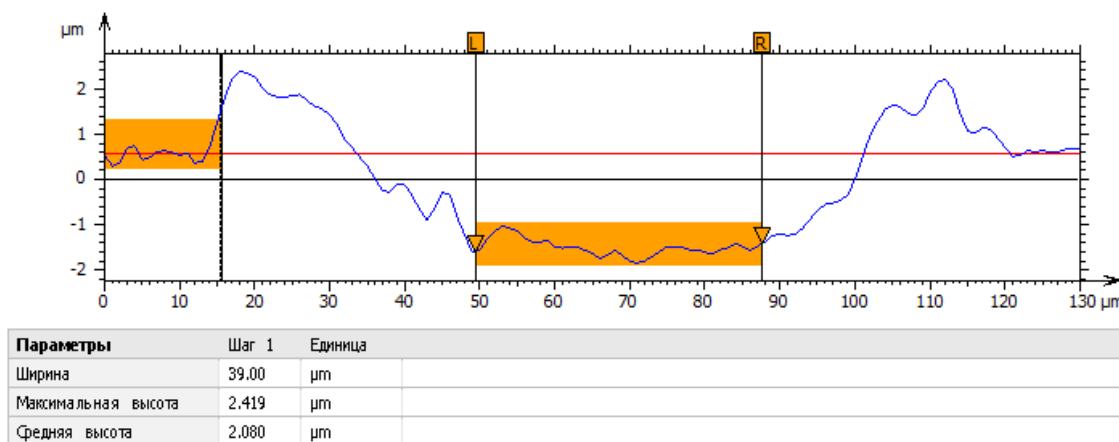


Рисунок 2.11 – Измерение средней глубины кратера по профилю

Последующие сечения обрабатывались аналогичным образом. По каждому кратеру проводилось пять измерений каждого геометрического размера, что позволило отбросить промахи и грубые погрешности.

2.3 Описание экспериментальной установки по исследованию поверхностных явлений (смачивания и растекания малых объемов жидкости).

Изучение процессов смачивания и растекания жидкости на текстурированных поверхностях стали проводились с использованием экспериментального стенда, принципиальная схема которого, представлена на рисунке 2.12.

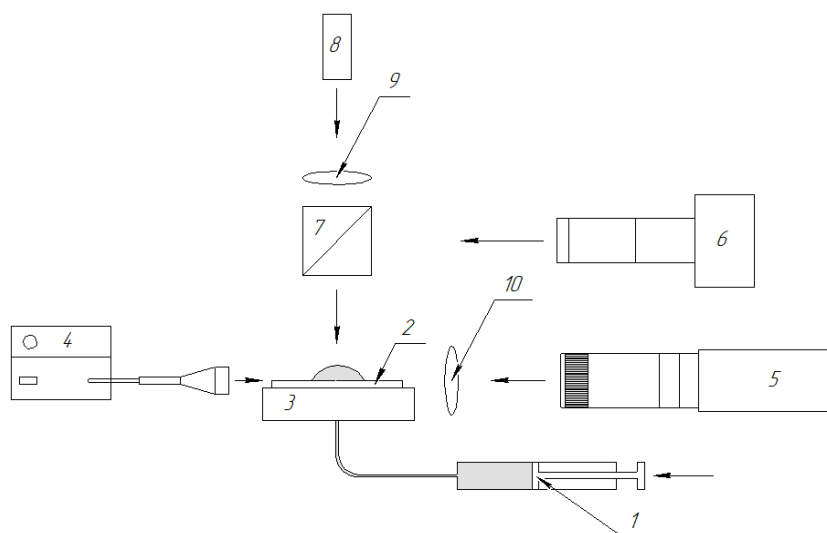


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – высокоточный шприцевой насос; 2 – подложка; 3 – гониометр; 4 – источник плоскопараллельного света; 5 – высокоскоростная камера; 6 – фотокамера; 7 – светоделитель; 8 – источник направленного света; 9 – световой матовый фильтр; 10 – поляризационный фильтр.

Экспериментальная установка состоит из высокоточного электронного шприцевого насоса 1, с помощью которого с нижней стороны подложки 2 дозировалась капля дистиллированной воды объемом 30 мкл через отверстие диаметром 0,3 мм. Малый размер отверстия позволял исключить

самопроизвольное перетекание жидкости из канала при отключении насоса. На электронном насосе настраивался режим работы (последовательно сменяющие друг друга циклы нагнетания и откачки), объем и расход (10, 50, 100 и 600 мкл/мин) подаваемой жидкости, при изменении которого изменялась скорость перемещения линии трехфазного контакта. Подложка, с помощью болтового соединения и металлических шайб устанавливается на гониометре 3, который служит для выравнивания поверхности относительно горизонта в двух плоскостях. Установка также включает в себя оптическую теневую систему. Световой поток от источника 4 преобразовывался в плоскопараллельный свет, освещавший каплю на подложке. Видеосъемка теневого изображения капли проводилась высокоскоростной камерой 5 через световой фильтр 10. Последний позволяет при съемке убирать блики от воды. Для контроля формы капли использовалась фотокамера 6 и светоделитель 7. Последний изменяет направление света под прямым углом, что позволяет установить фотокамеру горизонтально для удобства работы с ней. В качестве дополнительного источника освещения рабочей зоны использовался источник направленного света 8 через матовый фильтр 9, который препятствовал образованию бликов на полированной подложке.

По полученным теневым изображениям с помощью программного обеспечения DropShapeAnalysis методами “тангенциальным 1” и “Юнга-Лапласа” определялись геометрические параметры капли (контактный угол (θ), диаметр (d) и высота (h)).

Погрешности измерений вычислялись по результатам проведенных несколько раз в идентичных условиях экспериментов. Выполнялось от трех до шести экспериментов при фиксированных значениях исследуемых факторов. Определялись средние значения статических и динамических контактных углов, скорости перемещения контактной линии и диаметра растекания капли и их среднеквадратические отклонения. Погрешность измерения статических контактных углов не превышала 3%, динамических – 5%,

скорости перемещения контактной линии и диаметра растекания капли – 3 %.

2.4 Исследование микрорельефа

Микрорельеф образцов исследовался с помощью и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-3400N (рис.2.13).

3 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

3.1 Результаты анализа влияния одиночного лазерного импульса на формирование элемента текстуры на поверхности стали

Установлено, что при падении одиночного лазерного луча на поверхности стали формировался элемент текстуры (кратер) в форме близкой к чашеобразной (рис.3.1).

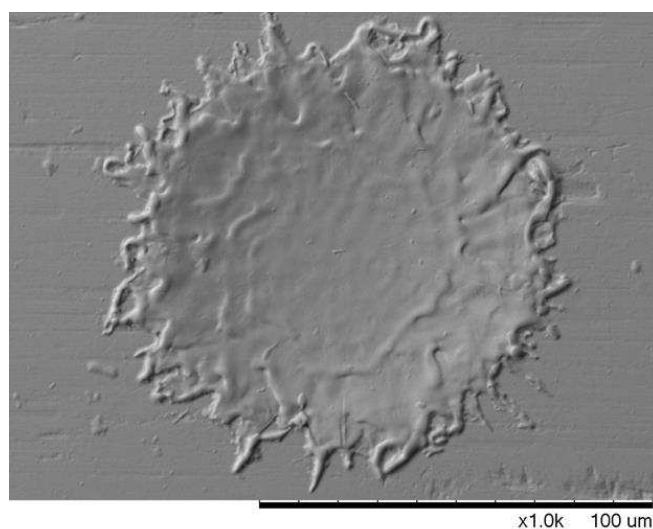


Рисунок 3.1 – Фотоизображение элемента текстуры. Энергия импульса 1 мДж, частота 20 кГц, время воздействия 200 нс

В соответствии с разработанной процедурой “оценки геометрических размеров элемента текстуры и параметров шероховатости” приведенной в пункте 2.2 выполнен анализ влияния одиночного лазерного импульса на формирование элемента текстуры на поверхности стали. Результаты анализа по кратерам №1–3 приведены в таблицах 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1 – Измеренные параметры кратера №1

Геометрический размер	Номер измерения		
	1	2	3
Диаметр d, мкм	92,58	90,74	90,73
Толщина кромок s, мкм	20,74	17,33	24,39

	15,18	21,83	18,62
Средняя глубина кратера h,мкм	2,303	2,378	2,154

Таблица 3.2 – Измеренные параметры кратера №2

Геометрический размер	Номер измерения		
	1	2	3
Диаметр d, мкм	90,44	90,02	87,65
Толщина кромок s,мкм	16,04	14,92	18,16
	13,68	16,04	18,16
Средняя глубина кратера h,мкм	2,358	2,244	2,245

Таблица 3.3 – Измеренные параметры кратера №3

Геометрический размер	Номер измерения		
	1	2	3
Диаметр d, мкм	93,01	91,09	90,42
Толщина кромок s,мкм	19,03	11,76	21,38
	11,33	20,10	18,38
Средняя глубина кратера h,мкм	2,278	2,276	2,250

Выполнен расчет погрешности измерений диаметра для кратера №1.

Средний арифметический диаметр [69]:

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \text{ мкм,}$$

$$d_{cp} = \frac{92,58 + 90,74 + 90,73}{3} = 91,35 \text{ мкм.}$$

Расчет среднеквадратичного отклонения [69]:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{cp} - d_i)^2}{n(n-1)}},$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(91,35 - 92,58)^2 + (91,35 - 90,74)^2 + (91,35 - 90,73)^2}{3(3-1)}} = 0,615.$$

Длина доверительного интервала для многократных измерений [69]:

$$\Delta d_{cl} = t_{\alpha n} \cdot \tilde{\sigma},$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента, табличное значение для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ [69]:

$$t_{\alpha n} = 4,3,$$

тогда

$$\Delta d_{\text{сл}} = 4,3 \cdot 0,615 = 2,645 \text{ мкм.}$$

Диаметр кратера №1:

$$d = 91,35 \pm 2,645 \text{ мкм.}$$

Расчет погрешности измерений толщины кромок для кратера №1:

Средняя арифметическая толщина кромок [69]:

$$s_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n}, \text{ мкм,}$$

$$s_{\text{ср}} = \frac{20,74 + 15,18 + 17,33 + 21,83 + 24,39 + 18,62}{6} = 19,682 \text{ мкм.}$$

Расчет среднеквадратичного отклонения [69]:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_{\text{ср}} - s_i)^2}{n(n-1)}},$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(19,682 - 20,74)^2 + (19,682 - 15,18)^2 + (19,682 - 17,33)^2 + (19,682 - 21,83)^2 + (19,682 - 24,39)^2 + (19,682 - 18,62)^2}{6(6-1)}} = 1,352.$$

Длина доверительного интервала для многократных измерений [69]:

$$\Delta s_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \cdot \tilde{\sigma},$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента, табличное значение для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ [69]:

$$t_{\alpha n} = 2,57,$$

тогда

$$\Delta s_{\text{сл}} = 2,57 \cdot 1,352 = 3,474 \text{ мкм.}$$

Толщина кромок кратера №1:

$$s = 19,682 \pm 3,474 \text{ мкм.}$$

Расчет погрешности измерений средней глубины для кратера №1.

Средняя арифметическая глубина [69]:

$$h_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \text{ мкм,}$$

$$h_{\text{ср}} = \frac{2,303 + 2,378 + 2,154}{5} = 2,278 \text{ мкм.}$$

Расчет среднеквадратичного отклонения [69]:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{\text{ср}} - h_i)^2}{n(n-1)}},$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(2,246 - 2,303)^2 + (2,246 - 2,378)^2 + (2,246 - 2,154)^2}{3(3-1)}} = 0,066.$$

Длина доверительного интервала для многократных равноточных измерений [1]:

$$\Delta h_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \cdot \tilde{\sigma},$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента, табличное значение для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ [69]:

$$t_{\alpha n} = 4,3,$$

тогда

$$\Delta h_{\text{сл}} = 4,3 \cdot 0,066 = 0,283 \text{ мкм.}$$

Средняя глубина кратера №1:

$$h = 2,278 \pm 0,283 \text{ мкм.}$$

Расчет погрешностей для кратеров №2–3 проводился аналогичным образом. Результаты расчетов погрешностей для кратеров №1–3 представлены в таблице 3.4–3.6.

Таблица 3.4 – Результаты расчетов погрешностей для кратера №1

Геометрический размер	Диаметр	Толщина кромок	Средняя глубина
Значение	$91,35 \pm 2,645$	$19,682 \pm 3,474$	$2,278 \pm 0,283$
ед.изм.	мкм	мкм	мкм

Таблица 3.5 – Результаты расчетов погрешностей для кратера №2

Геометрический размер	Диаметр	Толщина кромок	Средняя глубина
Значение	$89,37 \pm 3,735$	$16,167 \pm 1,86$	$2,282 \pm 0,163$
ед.изм.	мкм	мкм	мкм

Таблица 3.6 – Результаты расчетов погрешностей для кратера №3

Геометрический размер	Диаметр	Толщина кромок	Средняя глубина
Значение	91,507 ± 3,337	16,997 ± 2,632	2,268 ± 0,039
ед.изм.	мкм	мкм	мкм

В результате оценки геометрических размеров элементов текстуры определено, что при падении одиночного лазерного луча на поверхности стали формировался кратер, средние значения геометрических размеров которого представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Средние геометрические размеры кратера

Геометрический размер	Диаметр	Толщина кромок	Средняя глубина
Значение	90,7 ± 3,2	17,6 ± 2,7	2,3 ± 0,2
ед.изм.	мкм	мкм	мкм

Полученное значение диаметра позволило определить скорость линейного перемещения лазерного луча и количество линий прохода на 1 мм, что способствовало впоследствии сформировать текстуры, образованные совокупностью отдельных элементов (кратеров).

При фиксированных энергии в импульсе, частоты, времени воздействия лазерного излучения, скорости линейного перемещения v равной 1269,8 мм/с и количество линий прохода луча n равное 15 мм⁻¹, сформирована текстура (Образец №1), при условии 30 % наложения светового пятна (рис. 3.2 (а)).

При скорости линейного перемещения v равной 725,6 мм/с и количество линий прохода луча n равное 27 мм⁻¹, сформирована текстура (Образец №2), при условии 60 % наложения светового пятна (рис. 3.2 (б)).

При скорости линейного перемещения v равной 1814 мм/с и количество линий прохода луча n равное 11 мм⁻¹, сформирована текстура (Образец №3) с расстоянием между кратерами равном одному диаметру (рис. 3.2 (в)).

При скорости линейного перемещения v равной 3628 мм/с и количество линий прохода луча n равное 5 мм^{-1} , сформирована текстура (Образец №4) с расстоянием между кратерами равном двум диаметрам (рис. 3.2 (г)).

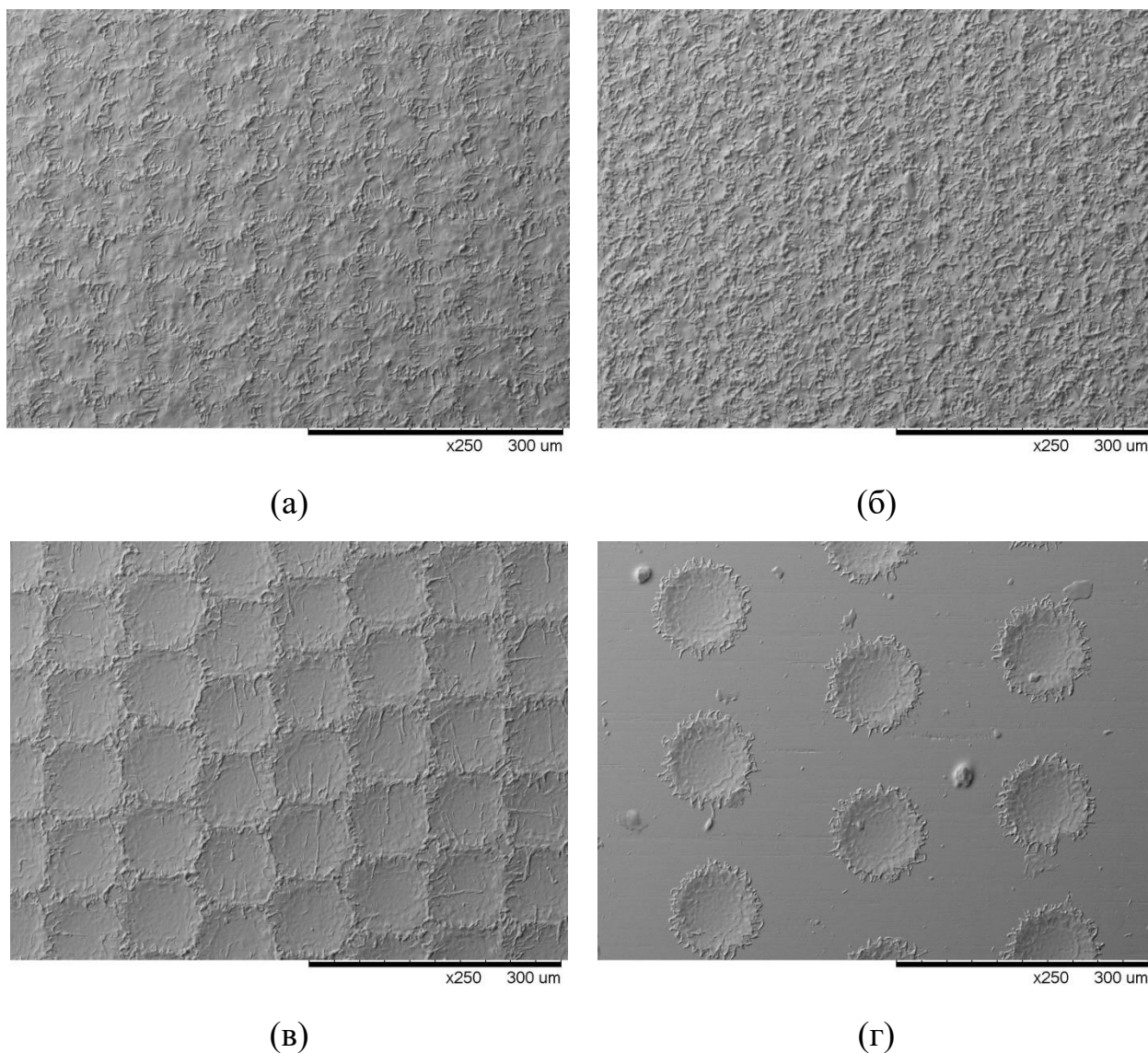


Рисунок 3.2 – Микротекстура поверхностей: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4

В соответствии с разработанной процедурой “оценки геометрических размеров элемента текстуры и параметров шероховатости” приведенной в пункте 2.2 определены параметры шероховатости полученных текстур, приведенные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – параметры шероховатости образцов №1–4

№ образца	Sa, мкм	Sz, мкм
1	2,317	16,266
2	2,531	17,599
3	1,619	14,28
4	1,534	12,94

Установлено, что образцы, сформированные в условиях соприкасающихся кратеров и с расстоянием между кратерами равным двум диаметрам кратера, классифицируются как упорядоченные текстуры. Образцы, сформированные при условии 30% и 60% наложения светового пятна, классифицируются как анизотропные текстуры. Величина параметра Sz, характеризующего максимальную высоту неровностей профиля, у анизотропных и упорядоченных текстур увеличиваются в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2. Параметр Sa, характеризующий общие амплитудные свойства поверхности, увеличивается в аналогичной последовательности.

3.2 Инверсия свойств смачиваемости после лазерного текстурирования

Смачивание поверхностей стали, текстурированных наносекундным лазерным излучением, определялось по результатам измерения статического контактного угла (СКУ). Инверсия свойств смачиваемости оценивалась при сравнении полученных измерений со СКУ на немодифицированной полированной поверхности. Установлено, что СКУ на такой поверхности составил $\theta_s = 80 \pm 2^\circ$.

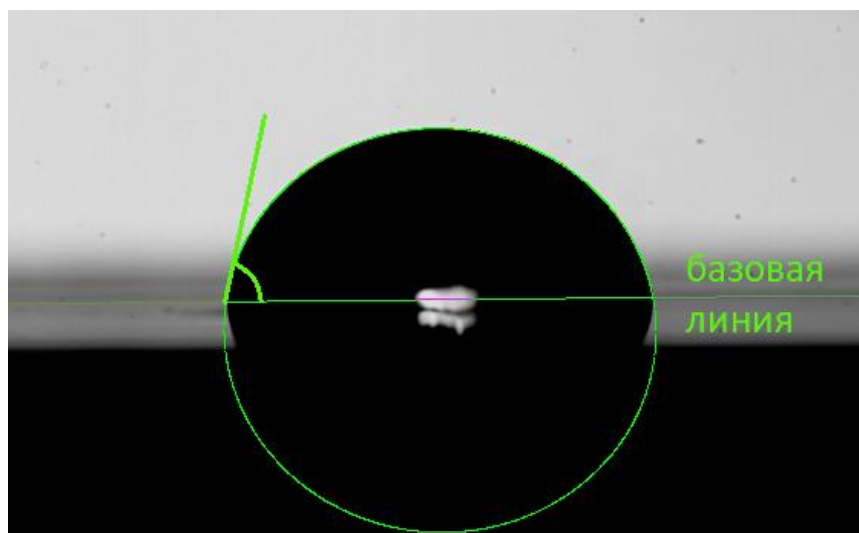


Рисунок 3.3 – Измерение статического контактного угла на полированной не модифицированной поверхности стали

По прошествии времени после текстурирования поверхностей стали регистрировался рост контактного угла, стабилизация которого произошла на 11 день для поверхности с текстурой в форме кратеров, расположенных на расстоянии двух диаметров кратеров. Для поверхности с текстурой соприкасающихся кратеров стабилизация свойств произошла на 48 день. По прошествии 117 дней после текстурирования стабилизация свойств смачиваемости на поверхностях с анизотропной текстурой не зарегистрирована.

Известно [43], что после лазерного текстурирования статический контактный угол растет. Изменение контактного угла описывается экспоненциальной зависимостью [43]:

$$\theta = \theta_{\text{уст}} (1 - e^{-t/a}), \quad (3.1)$$

где $\theta_{\text{уст}}$ – установившийся контактный угол на текстурированной лазерным излучением поверхности, °; a – константа, характеризующая время, за которое контактный угол превысит 50% от установившегося значения, сут.; t – время стабилизации свойств смачиваемости, сут.

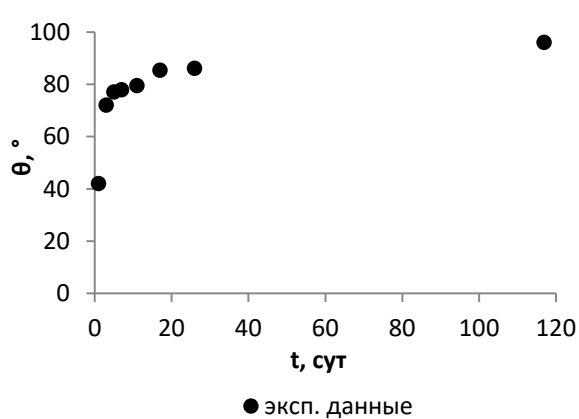
Значения зарегистрированных в проведенных экспериментах установившихся углов $\theta_{уст}$, времён их стабилизации t и констант a сведены в таблицу 3.9.

Из таблицы 3.8 видно, что с увеличением расстояния между кратерами, образующих текстуру поверхности время стабилизации свойств смачиваемости (время, за которое контактный угол перестанет изменяться) образцов уменьшается.

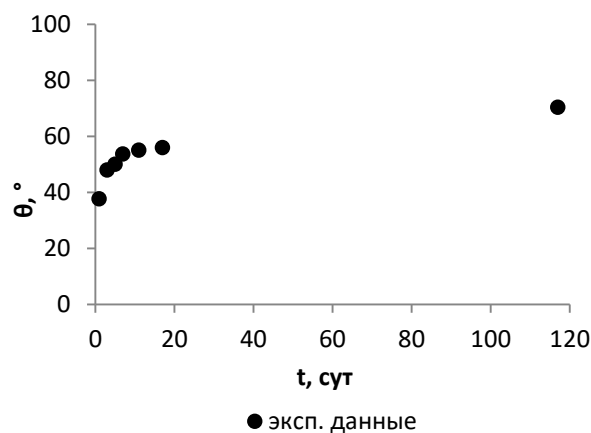
Таблица 3.9 – Коэффициенты экспоненциальной зависимости (3.1)

№ образца	$\theta_{уст}, ^\circ$	$t, \text{сут.}$	$a, \text{сут.}$
1	–	–	–
2	–	–	–
3	88	48	10
4	83	11	2

Результаты измерений контактных углов в разные моменты времени приведены на рисунке 3.4. Также на зависимостях (рисунок 3.4) приведены типичные аппроксимационные кривые, полученные по уравнению (3.1).



(a)



(б)

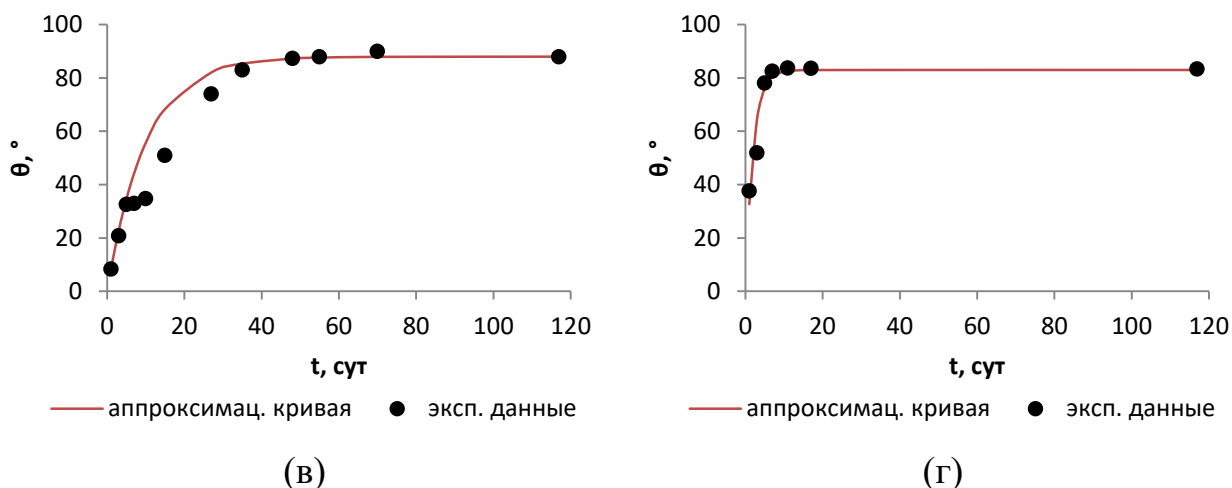


Рисунок 3.4 – Изменение статического контактного угла с течением времени на поверхностях образцов: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4.

По результатам анализа рисунка 3.4 установлено, что зависимость (3.1) достаточно хорошо аппроксимирует изменение СКУ с течением времени в условиях формирования упорядоченной в форме кратеров текстур. Аппроксимация на анизотропных текстурах (образцы №1-2) не проводилась, так как стабилизация свойств смачиваемости на поверхностях не зарегистрирована.

3.3 Математическое описание гидродинамических процессов в условиях растекания жидкости по текстурированным поверхностям

Проведен анализ применимости молекулярно-кинетических (линейной и классической) [52] и гидродинамической моделей [62] для описания процесса растекания малых объемов жидкостей (капель воды объемом 30 мкл) по поверхностям стали, текстурированным наносекундным лазерным излучением.

В рамках молекулярно-кинетической модели динамическое смачивание описывается кинетикой молекулярных процессов, происходящих на контактной линии [52,53,70]. Согласно результатам исследований Blake and Haynes [52] в условиях растекания капли по поверхности контактная линия

перемещается за счет действия силы поверхностного натяжения. Если динамический угол отличается от равновесного контактная линия движется за счет капиллярной силы $\sigma(\cos\theta_0 - \cos\theta_D)$.

Динамический контактный угол определяется по соотношению [52] (уравнение классической молекулярно-кинетической модели):

$$\theta_D = \arccos\left(\cos\theta_0 \mp \frac{2k_B T}{\lambda^2 \sigma} \operatorname{arcsinh} \frac{U}{2k^0 \lambda}\right), \quad (3.2)$$

где k^0 – характерная частота молекулярных перемещений у контактной линии, Гц; λ – среднее расстояние между перемещениями молекул капли, м. k_B – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

Если аргумент \sinh меньше 0.1, то динамический контактный угол определяется по линейному уравнению молекулярно-кинетической модели [52]:

$$\theta_D = \arccos\left(\cos\theta_0 - \frac{U\xi}{\sigma}\right), \quad (3.3)$$

где $\xi = (k_B T)/(k^0 \lambda^3)$ – коэффициент трения трехфазной линии контакта, Па·с.

Полученные экспериментальные зависимости динамических контактных углов натекания и оттекаания от числа капиллярности аппроксимированы уравнениями (3.2) и (3.3) в рамках анализа применимости молекулярно-кинетической модели.

Обработка результатов проведенных экспериментов проводилась методом наименьших квадратов. При расчете по уравнению (3.2) определялись три параметра (k^0 , λ , θ_0), коррелирующих друг с другом. Для упрощения процедуры аппроксимации за величину равновесного контактного угла приняты экспериментальные значения (для наступающей контактной линии θ_{0A} , для отступающей – θ_{0R}). Значения параметров k^0 и λ в первом приближении приняты согласно [71], поскольку авторы используют жидкости (воду и додекан), характеризующиеся вязкостью, близкой по значению к используемой в настоящих исследованиях. Соответствие результатов расчета и экспериментальных данных оценивалась

коэффициентом детерминации R^2 является квадратом корреляции между прогнозируемыми значениями и фактическими значениями, значения находятся в интервале от 0 до 1:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSTO} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{y}_1)^2}{\sum_{i=1}^n (y_1 - \bar{y}_1)^2} \quad (3.4)$$

где $SSE = \sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{y}_1)^2$ – сумма квадратов отклонений, показывает насколько экспериментальные значения θ_D отличаются от значений, полученных по зависимостям (3.2 – 3.3). Полная сумма квадратов $SSTO = \sum_{i=1}^n (y_1 - \bar{y}_1)^2$ это отклонение экспериментальных значений θ_D от среднего значения.

Основой гидродинамической модели является гипотеза о том, что движению линии трехфазного контакта препятствуют силы вязкостного трения в объеме жидкости. Поток жидкости в окрестности ЛТК приводит к искривлению межфазной поверхности «жидкость/пар». Динамический контактный угол определяется как [62]:

$$\theta_D^3 = \theta_0^3 \pm (9 \mu U / \sigma) \ln(L/L_m), \quad (3.5)$$

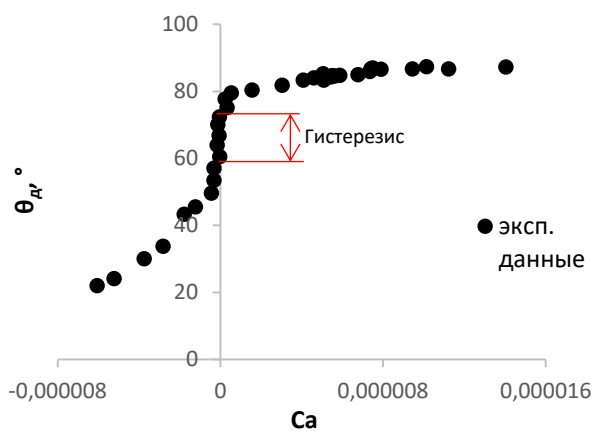
где θ_0 – равновесный или статический контактный угол, L и L_m – макроскопическая и микроскопическая длина, соответственно.

Макроскопическая длина определяется из соотношения:

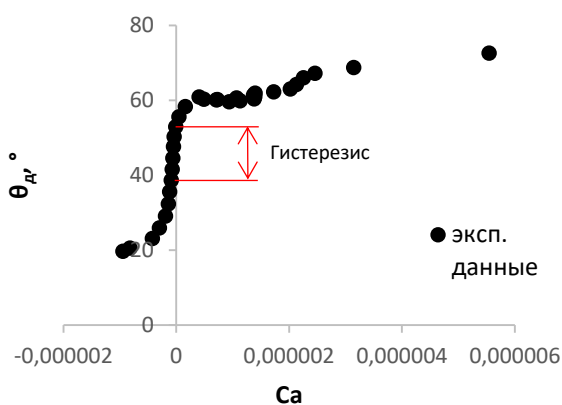
$$L = \sqrt{\frac{2\sigma_{LV}}{\rho g}} \quad (3.6)$$

Микроскопическая длина определяется аппроксимацией экспериментальных результатов зависимостью (3.4).

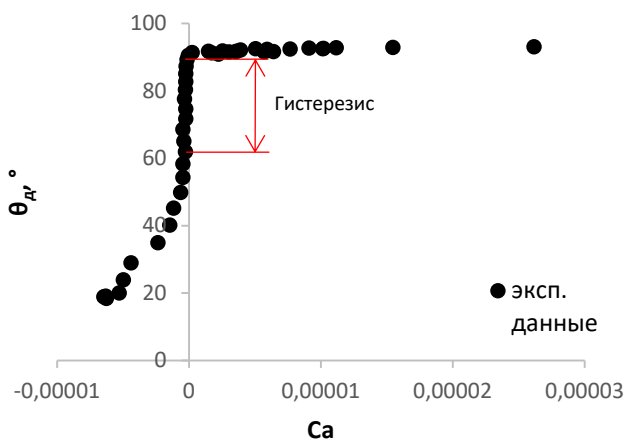
Известно, что при гистерезисе контактного угла более 5° использование молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей для описания процессов натекания и оттекания жидкости приводит к значительному отклонению экспериментальных данных от теоретических зависимостей. Типичные зависимости динамического контактного угла от числа капиллярности представлены на рисунке 3.5.



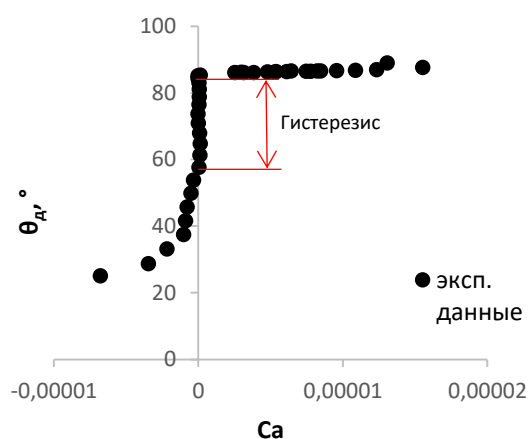
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3.5 – Типичные зависимости динамического контактного угла от числа капиллярности, полученные при расходе 600 мкл/мин на образцах: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4. Символы соответствуют экспериментальным данным

Из рис. 3.5 видно, что в условиях стабилизации свойств смачиваемости гистерезис контактного угла превышает 5° . Поэтому использование молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей для описания процессов натекания и оттекания жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям стали проводилось без учета гистерезиса контактного угла, т.е. по отдельности для наступающей и отступающей контактной линии. На рисунке 3.6 представлены аппроксимационные

зависимости и экспериментальные данные, полученные на образцах №1-4 в условиях стабилизации свойств смачиваемости.

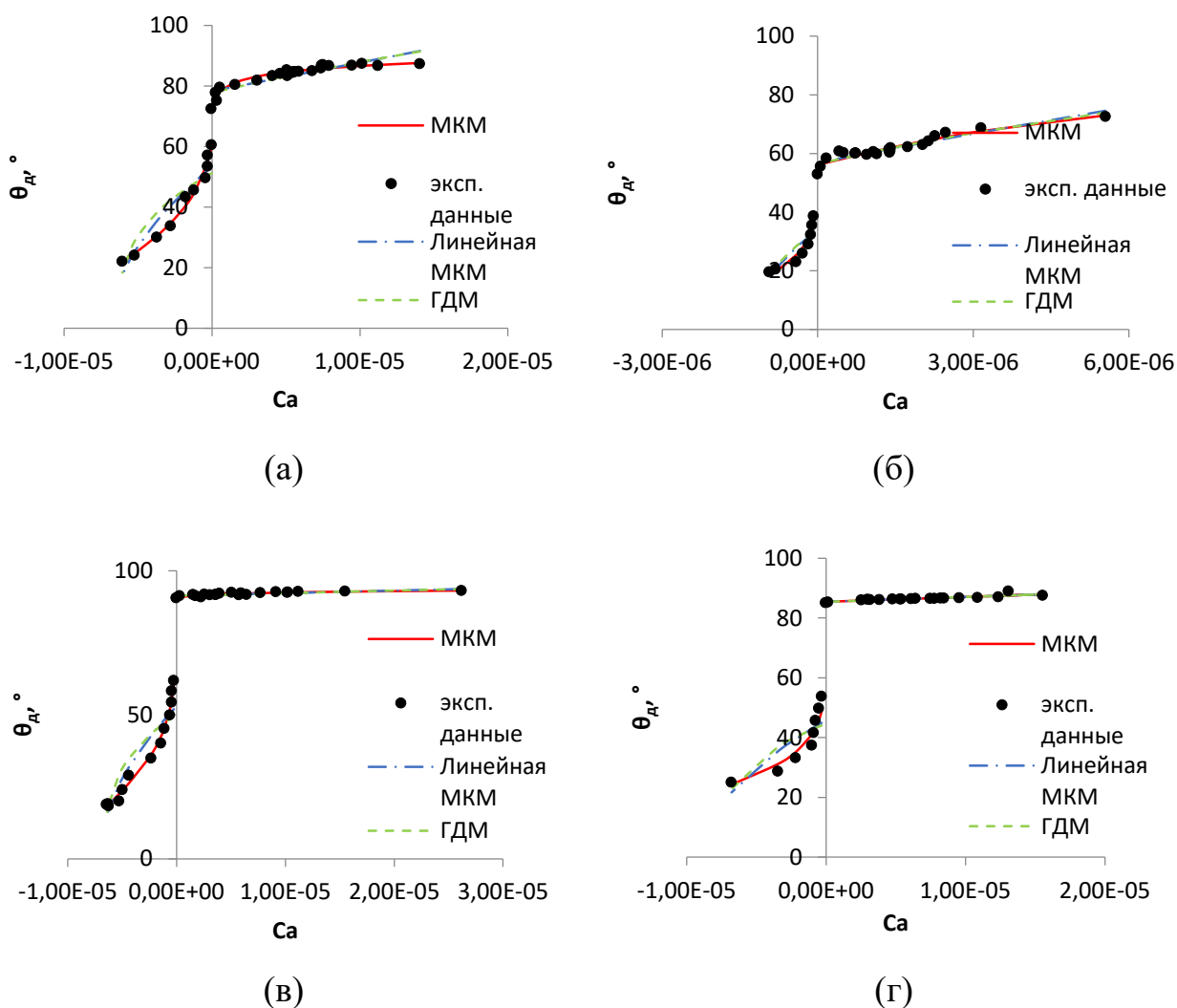


Рисунок 3.6 – Аппроксимационные и экспериментальные зависимости динамического контактного угла от числа капиллярности, полученные при расходе 600 мкл/мин на образцах: а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4.

Коэффициент детерминации R^2 и их независимые переменные рассчитаны для каждого образца и сведены в таблицах 3.10 – 3.13.

Таблица 3.10 – Параметры моделей для образца №1

Расход, мкл/мин	Параметры моделей									
	МКМ (ур. 3.2) [52]				Линейная МКМ (ур. 3.3) [52]			ГДМ (ур. 3.5) [62]		
	$\theta_0, ^\circ$	$k^0, \text{МГц}$	$\lambda, \text{нм}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\xi, \text{Па}\cdot\text{с}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\ln(L/L_m)$	R^2
Наступающая линия										
600	73,18	0,03168	1,48	0,952	78,24	14,65	0,778	77,75	$1,23 \cdot 10^4$	0,744
100	73	0,00498	1,83	0,934	74,53	47,84	0,816	74,39	$3,41 \cdot 10^4$	0,799
50	65,05	0,00565	0,83	0,83	66,17	180,35	0,825	65,66	$1,17 \cdot 10^5$	0,812
10	63,6	0,00047	1,1	0,98	66,24	589,53	0,892	65,66	$3,85 \cdot 10^5$	0,857
Среднее значение	68,71	0,01069	1,31	0,924	71,30	208,09	0,828	70,87	$1,37 \cdot 10^5$	0,803
Отступающая линия										
600	59,91	0,03053	1,4	0,982	53,41	52,65	0,891	51,23	$1,25 \cdot 10^4$	0,810
100	53,72	0,01083	1,4	0,979	53,11	346,07	0,978	50,41	$7,76 \cdot 10^4$	0,948
50	44,09	0,00851	1,81	0,961	42,9	657,43	0,951	40,64	$1,17 \cdot 10^5$	0,893
10	47,72	0,00092	1,96	0,873	47,72	1648,1	0,873	46,8	$4,35 \cdot 10^5$	0,842
Среднее значение	51,36	0,0127	1,64	0,949	49,29	676,1	0,92325	47,27	$1,61 \cdot 10^5$	0,873

Таблица 3.11 – Параметры моделей для образца №2

Расход, мкл/мин	Параметры моделей									
	МКМ (ур. 3.2) [52]				Линейная МКМ (ур. 3.3) [52]			ГДМ (ур. 3.5) [62]		
	$\theta_0, ^\circ$	$k^0, \text{МГц}$	$\lambda, \text{нм}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\xi, \text{Па}\cdot\text{с}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\ln(L/L_m)$	R^2
Наступающая линия										
600	47,16	0,00617	0,8	0,972	50,86	27,5	0,918	49,09	$1,47 \cdot 10^4$	0,955
100	56,1	0,0029	0,64	0,895	56,86	45,23	0,876	56,35	$2,39 \cdot 10^4$	0,890
50	56,97	0,02771	0,46	0,871	56,97	68,08	0,871	56,84	$3,33 \cdot 10^4$	0,849
10	52,89	0,00216	0,36	0,791	62,86	332,88	0,865	62,72	$1,85 \cdot 10^5$	0,857
Среднее значение	53,28	0,00974	0,57	0,882	56,89	118,42	0,883	56,25	$0,64 \cdot 10^5$	0,888
Отступающая линия										
600	52,26	0,03468	0,89	0,755	30	94,67	1	29,69	$1,45 \cdot 10^4$	1,000
100	52,26	0,01235	0,49	0,919	33,98	117,57	0,735	33,16	$1,93 \cdot 10^4$	0,692
50	46,01	0,00091	0,72	0,897	28,25	242,14	0,628	33,72	$4,44 \cdot 10^4$	0,745
10	41,84	0,00018	0,37	0,854	28,8	1424,9	0,688	28,43	$2,16 \cdot 10^5$	0,662
Среднее значение	48,09	0,01203	0,62	0,856	30,26	469,82	0,763	31,25	$0,74 \cdot 10^5$	0,775

Таблица 3.12 – Параметры моделей для образца №3

Расход, мкл/мин	Параметры моделей									
	МКМ (ур. 3.2) [52]				Линейная МКМ (ур. 3.3) [52]			ГДМ (ур. 3.5) [62]		
	$\theta_0, ^\circ$	$k^0, \text{МГц}$	$\lambda, \text{нм}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\xi, \text{Па}\cdot\text{с}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\ln(L/L_m)$	R^2
Наступающая линия										
600	90,8	0,01322	2,65	0,787	91,34	1,38	0,633	91,33	$1,35 \cdot 10^3$	0,638
100	88,74	0,01615	1,74	0,488	88,8	6,48	0,477	88,79	$5,96 \cdot 10^3$	0,478
50	88,56	0,01547	1,4	0,715	88,56	7,28	0,515	88,56	$6,58 \cdot 10^3$	0,315
10	86,95	0,01310	2,65	0,876	87,62	122,91	0,641	87,59	$1,13 \cdot 10^5$	0,652
Среднее значение	88,76	0,01448	2,11	0,717	89,08	34,51	0,567	89,07	$0,32 \cdot 10^5$	0,520
Отступающая линия										
600	52,94	0,01426	1,15	0,988	52,95	50,5	0,886	50,11	$1,12 \cdot 10^4$	0,815
100	44,68	0,01426	1,56	0,703	44,68	266,3	0,703	42,81	$5,10 \cdot 10^4$	0,595
50	45,47	0,02056	1,89	0,669	45,47	646,7	0,669	44,02	$1,34 \cdot 10^5$	0,591
10	42,43	0,01949	2,3	0,729	42,43	2197,75	0,729	40,72	$4,14 \cdot 10^5$	0,659
Среднее значение	46,38	0,01714	1,725	0,772	46,38	790,3	0,746	44,42	$1,53 \cdot 10^5$	0,665

Таблица 3.13 – Параметры моделей для образца №4

Расход, мкл/мин	Параметры моделей									
	МКМ (ур. 3.2) [52]				Линейная МКМ (ур. 3.3) [52]			ГДМ (ур. 3.5) [62]		
	$\theta_0, ^\circ$	$k^0, \text{МГц}$	$\lambda, \text{нм}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\xi, \text{Па}\cdot\text{с}$	R^2	$\theta_0, ^\circ$	$\ln(L/L_m)$	R^2
Наступающая линия										
600	85,42	0,03009	1,91	0,742	85,42	2,52	0,742	85,41	$2,15 \cdot 10^3$	0,742
100	83,87	0,09727	2,53	0,858	84,59	14,5	0,889	84,57	$1,22 \cdot 10^4$	0,860
50	83,97	0,01384	2,02	0,801	84,13	23,01	0,831	84,11	$1,91 \cdot 10^4$	0,804
10	79,31	0,00091	2,87	0,838	84,2	246,36	0,495	84,16	$2,08 \cdot 10^5$	0,834
Среднее значение	83,14	0,03553	2,33	0,810	84,58	71,60	0,740	84,56	$0,61 \cdot 10^5$	0,662
Отступающая линия										
600	87,87	0,02569	1,69	0,906	45,85	30,65	0,682	44,7	$6,74 \cdot 10^3$	0,624
100	42,01	0,08572	1,6	0,961	37,78	71,82	0,652	37,41	$1,42 \cdot 10^4$	0,618
50	45,41	0,01244	2,39	0,993	38,41	135,74	0,745	37,52	$2,41 \cdot 10^4$	0,684
10	42,29	0,02141	2,1	0,979	32,92	344,12	0,642	32,76	$6,16 \cdot 10^4$	0,627
Среднее значение	54,40	0,03631	1,95	0,960	38,74	145,58	0,680	38,10	$0,27 \cdot 10^5$	0,638

По результатам анализа параметров из таблиц 3.10 – 3.13 установлено, что значения среднего расстояния между молекулярными перемещениями λ ,

лежат в пределах 0,36–2,95 нм, что больше размера молекулы воды 0,28 нм. Этот параметр является характеристикой твердой поверхности и определяет расстояние между областями адсорбции молекул жидкости при перемещении линии трехфазного контакта. Полученный диапазон согласуется с результатами расчетов [71–75]. Установлено, что коэффициент трения ξ уменьшается с увеличением расхода от 10 до 600 мкл/мин и, соответственно, скорости перемещения линии трехфазного контакта на образцах с упорядоченной и анизотропной текстурах (табл. 3.10 – 3.13).

По результатам анализа λ можно сделать вывод, что среднее расстояние между молекулярными перемещениями зависит от шероховатости поверхности. Из таблиц 3.10 – 3.13 видно, что в случае наступающей и отступающей линии трехфазного контакта λ уменьшается с увеличением шероховатости в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2 (в этой же последовательности шероховатость увеличивается согласно параметру S_z и S_a в табл. 3.8).

Установлено, что частота случайных молекулярных перемещений k^0 (табл. 3.10 – 3.13), также как λ , зависит от шероховатости поверхности. В случае наступающей и отступающей линии трехфазного контакта с ростом шероховатости (табл.3.8) частота случайных молекулярных перемещений уменьшается в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2.

Логарифм отношения $\ln(L/L_m)$ (см. табл. 3.10 – 3.13) характерного размера макроскопической и микроскопической областей при аппроксимации полученных кривых принимает большие значения. В проведенных исследования L принята равной капиллярной постоянной жидкости (3,83 мм для дистиллированной воды). Известно, что длина микроскопической области L_m имеет порядок длины свободного пробега молекулы. Величина $\ln(L/L_m)$ должна лежать в диапазоне 10–100 [71]. Полученные в настоящей работе величины логарифма, значительно превышают этот диапазон и варьируются от $1.35 \cdot 10^3$ до $4.35 \cdot 10^5$. Следовательно, величина L_m значительно меньше величины свободного пробега молекулы, что ставит под сомнение

достоверность аппроксимации значений θ_d гидродинамической моделью. Однако столь малые значения величины L_m показывают также отсутствие перкуссионной пленки и сильное взаимодействие твердого тела и жидкости (сильную адгезию).

3.4 Выводы по третьей главе

Установлено, что при падении одиночного лазерного луча при фиксированной энергии в импульсе 1 мДж (мощность 20 Вт), частоте 20 кГц, времени воздействия 200 нс на поверхности стали формировался элемент текстуры (кратер) в форме близкой к чашеобразной, диаметр которого составил $90,7 \pm 3,2$ мкм. Используя геометрические размеры элемента текстуры, определены параметры лазерного излучения (скорость линейного перемещения лазерного луча и количество линий прохода на 1 мм) для формирования анизотропных ($v = 1269,8$ мм/с, $n = 15$ мм⁻¹ (30% наложение элемента текстуры); $v = 725,6$ мм/с, $n = 27$ мм⁻¹ (60% наложение элемента текстуры)) и упорядоченных текстур ($v = 1814$ мм/с, $n = 11$ мм⁻¹ (с соприкасающимися кратерами); $v = 3628$ мм/с, $n = 5$ мм⁻¹ (с расстоянием между кратерами равным двум диаметрам кратера)).

После лазерного текстурирования зарегистрирована инверсия свойств смачиваемости поверхности стали. Непосредственно после текстурирования поверхности характеризовались гидрофильными свойствами со СКУ $< 90^\circ$. По прошествии времени зарегистрирован рост контактного угла, стабилизация, которого происходила через 11 дней для текстуры с расстоянием между кратерами равном двум диаметрам кратера и 48 дней для текстуры с соприкасающимися кратерами. Для анизотропных текстур по прошествии 117 дней стабилизация свойств смачиваемости не зарегистрирована, рост контактного угла продолжается.

Установлено, что значения среднего расстояния между молекулярными перемещениями λ больше размера молекулы H₂O (0,28 нм) и лежит в пределах 0,36–2,95 нм. Полученный диапазон согласуется с результатами

расчетов [71–75]. Зарегистрирована зависимость среднего расстояния между молекулярными перемещениями от шероховатости поверхности, в случае наступающей и отступающей линии трехфазного контакта λ уменьшается с увеличением шероховатости в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2.

Установлено, что частота случайных молекулярных перемещений k^0 также как λ , зависит от шероховатости поверхности, с ростом шероховатости частота случайных молекулярных перемещений уменьшается в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2.

Зависимости ГДМ неудовлетворительно описывают экспериментальные данные согласно коэффициенту детерминации (таблицы 3.11-3.13). Аппроксимационные кривые в рассматриваемом диапазоне динамических контактных углов ($30-90^\circ$) и чисел капиллярности ($10^{-10}-10^{-5}$) близки к линейному виду. Эти кривые не удовлетворительно описывают экспериментальные данные (рисунок 3.6). Параметр – логарифм отношения характерного размера макроскопической и микроскопической областей $\ln(L/L_m)$ в этом случае физически не обоснован. Характеристическая длина макроскопической области L принимается равной капиллярной постоянной жидкости, длина микроскопической области L_m в исследованиях других авторов [71] имеет порядок длины свободного пробега молекулы. Следовательно, величина $\ln(L/L_m)$ должна лежать в диапазоне $10 - 100$ [71]. Полученные в настоящей работе величины логарифма имеют порядок 10^5 , что значительно превышает этот диапазон.

По результатам проведенного анализа установлено, что в области малых чисел капиллярности от 10^{-10} до 10^{-5} уравнение молекулярно-кинетической модели, лучше аппроксимирует экспериментальные данные по сравнению уравнением гидродинамической модели. Последнее подтверждается коэффициентами детерминации.

4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

В разделе рассмотрены вопросы социальной ответственности работников лаборатории “Тепломассопереноса и гидродинамики пленочных и ривулентных течений в теплообменниках” 8 корпуса ауд.№264 НИТПУ. На рабочем месте в лаборатории должны быть предусмотрены меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов. Уровни этих факторов не должны превышать предельных значений, оговоренных правовыми, техническими и санитарно-техническими нормами. Эти нормативные документы обязывают к созданию на рабочем месте условий труда, при которых влияние опасных и вредных факторов на работников либо устранено совсем, либо находится в допустимых пределах.

В данной работе проводились экспериментальные исследования процессов растекания и смачивания. За последние годы предприняты усилия, направленные на поиск способов по обоснованию механизма инверсии свойств смачиваемости на различных материалах после лазерного текстурирования. В данной работе рабочая жидкость - дистиллированная вода. Жидкость помещается на рабочий участок с помощью высокоточного дозирующего устройства и с помощью высокоскоростной камеры фиксировались динамические и статические контактные углы.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ [76] устанавливает общие эргономические требования к рабочим местам при выполнении работ в положении сидя при проектировании нового, модернизации действующего оборудования и производственных процессов.

Специфика труда оператора заключается в больших зрительных нагрузках в сочетании с малой двигательной активностью, монотонностью

выполняемых операций, вынужденной рабочей позой. Эти факторы отрицательно влияют на самочувствие работающего. Зрительные нагрузки связаны с воздействием на зрение дисплея. Чтобы условия труда оператора были благоприятными, снималась нагрузка на зрение, видеотерминал должен соответствовать следующим требованиям:

- Экран должен иметь антибликовое покрытие;
- Цвета знаков и фона должны быть согласованы между собой.

Для многоцветного отображения рекомендуется использовать одновременно 6 цветов – пурпурный, голубой, синий, зеленый, желтый, красный, а также черный и белый, так как вероятность ошибки тем меньше, чем меньше используется цветов и чем больше разница между ними, а для одноцветного отображения – черный, белый, серый, желтый, оранжевый и зеленый. Красный и голубой цвета на границе видимого спектра применять нельзя.

Необходимо тщательное регулярное обслуживание ПЭВМ специалистами.

В СанПиН 2.2.2.542 – 96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [77] даются общие требования к организации и оборудованию рабочих мест операторов ПЭВМ.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. Высота рабочей поверхности стола должна регулироваться в пределах 680 – 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности должна составлять 725 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для постановки ног, которое составляет: высоту не менее 600 мм, ширину не менее 500 мм, глубину – на уровне колен, не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Конструкция рабочего стула должна поддерживать рациональную рабочую позу при работе с ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения утомления. Рабочий стул должен быть подъемно – поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула должна быть полумягкой с нескользящим, не электризующимися и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

При работе в лаборатории тепломассопереноса и гидродинамики пленочных и ривулентных течений в теплообменниках следует выполнять правила безопасности. Во время работы в лаборатории соблюдать чистоту, порядок. В помещении запрещается пить воду, принимать пищу, курить.

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Таблица 4.1 – Опасные и вредные факторы при выполнении экспериментов в лаборатории тепломассопереноса и гидродинамики пленочных и ривулентных течений в теплообменниках

Этапы работы	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Проведение экспериментов (работа за установкой и персональным компьютером)	1. Недостаточная освещенность рабочей зоны. 2. Отклонение показателей микроклимата в лаборатории	1. Повышенный уровень статического электричества 2. Опасность поражения электрическим током	<ul style="list-style-type: none"> • параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4-548-96 • Электромагнитные поля в производственных условиях. СанПиН 2.2.4.1191–03.
2. Обработка экспериментальн	3. Повышенн		<ul style="list-style-type: none"> • СП 52.13330.2011 Естественное и

ых данных (работа за персональном компьютером)	ый уровень электромагнитны х излучений		искусственное освещение
--	---	--	-------------------------

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [78].

Основные требования к рабочему освещению:

- 1) Создание достаточной освещённости на рабочих местах согласно нормам;
- 2) Высокое качество освещения – спектральный состав, близкий к естественному, ограничение прямой и отражённой блёсткости, рациональное направление света, постоянство освещённости во времени;
- 3) Бесперебойность и длительность работы установки в данных условиях среды;
- 4) Пожарная и электрическая безопасность осветительных устройств;
- 5) Экономичность осветительной установки.

По СП 52.13330.2011 [79] для лабораторий научно-исследовательских учреждений норма освещенности составляет 400 лк.

Отклонение показателей микроклимата в лаборатории

Научно-исследовательскую лабораторию №264 8 корпуса НИТПУ можно отнести к помещениям первого класса (помещения с незначительными избытками явного тепла (до 23 Дж/м³·с и менее)) исходя из производственных условий [80,81].

Допустимые микроклиматические условия рабочей зоны с учетом избытков тепла, времени года (табл. 2.3) и тяжести выполняемой работы (Iб категория) указаны в СанПиН 2.2.4.548–96 [82].

Выбрана категория работ по уровню энергозатрат Iб, так как большинство работ производится сидя, стоя и с кратковременной ходьбой сопровождающейся незначительной физической нагрузкой.

Таблица 4.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений, СанПиН 2.2.4.548-96

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб (140-174)	21-23	20-24	40-60	0,1
Теплый	Iб (140-74)	22-24	21-25	40-60	0,1

Лаборатория оборудована следующими средствами для обеспечения благоприятных микроклиматических условий:

- система вентиляции (позволяет удалять загрязненный воздух);
- система кондиционирования (позволяет поддерживать относительную влажность на заданном уровне и регулировать температуру);
- система отопления (позволяет поддерживать температуру);

Температура, относительная влажность, скорость движения воздуха в рабочей зоне помещения, относящегося к первому классу, должны соответствовать оптимальным нормам метеорологических условий, указанных в табл. 4.2, которые обеспечиваются и поддерживаются на необходимом уровне с помощью систем, перечисленных выше.

Повышенный уровень электромагнитных излучений

В научно-исследовательской лаборатории №264 8 корпуса НИТПУ установлено 6 персональных компьютеров. Компьютер имеет два источника электромагнитного излучения (монитор и системный блок).

Персональный компьютер оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека по следующим причинам:

- Пользователь ПК лишен возможности работать на безопасном расстоянии.
- Длительное время влияния компьютера (для современных пользователей может составлять более 12 часов, при официальных нормах, запрещающих работать на компьютере более 6 часов в день).

Таким образом, степень воздействия ЭМП на организм человека зависит от интенсивности облучения, длительности воздействия и диапазона частот [83].

В соответствии с СанПиН 2.2.4.1191-03 [84] нормы допустимых уровней напряженности электрических полей зависят от времени пребывания человека в контролируемой зоне.

Работа в условиях облучения электрическим полем с напряженностью 20–25 кВ/м продолжается не более 10 минут. При напряженности не выше 5 кВ/м присутствие людей в рабочей зоне разрешается в течение 8 часов.

Так как напряженность магнитного поля в лаборатории не слишком велика, и сотрудники находятся там не более 8 часов день, то в специальных средствах защиты нет необходимости.

В зависимости от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки за рабочую смену при работе с ПЭВМ устанавливается суммарное время регламентированных перерывов (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Время регламентированных перерывов при проведении экспериментов в лаборатории тепломассопереноса и гидродинамики пленочных и ривулентных течений в теплообменниках

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ группа В, ч	Суммарное время регламентированных перерывов, мин.	
		При 8 часовой смене	При 12 часовой смене
III	до 6	90	140

В нашем случае вид трудовой деятельности – В, так как во время эксперимента работа происходит в режиме диалога. Категория тяжести и напряженности работы с ПЭВМ – III, так как в среднем эксперимент занимает до 5 часов [85].

Повышенный уровень статического электричества

Статическое электричество представляет опасность для обслуживающего персонала. Лёгкие «уколы» при работе с сильно наэлектризованными материалами вредно влияют на психику рабочих и в определённых ситуациях могут способствовать травмам на технологическом оборудовании. При постоянном прохождении через тело человека малых токов электризации возможны неблагоприятные физиологические изменения в организме, приводящие к профзаболеваниям. Вследствие этого в нашей стране в соответствии с ГОСТ 12.1.045–84 [86] введены допустимые уровни напряжённости электростатических полей – $E_{\text{пред}}$. Так, для $E_{\text{пред}} = 60$ кВ/м максимальное время пребывания $t_{\text{чел}}$ без средств защиты составляет 1 ч. Для $E=20$ кВ/м время пребывания персонала в электростатических полях не регламентируется.

К числу основных методов защиты первой группы относится заземление технологического оборудования, тела человека, являющееся наиболее простым, но необходимым средством, поскольку энергия искрового разряда с проводящих незаземлённых элементов технологического оборудования во много раз (сотни и тысячи) выше энергии разряда с диэлектриков. Заземляться должны все электропроводящие части и элементы оборудования, на которых возможно накопление зарядов. Электросопротивление всей цепи заземления должно быть не более 100 Ом. Непроводящее оборудование, считается электростатически заземлённым, если в любой его точке сопротивление по отношению к земле – не больше $5 \cdot 10^9$ Ом.

В рассматриваемом помещении выполнено заземление всего электрического оборудования.

Опасность поражения электрическим током

Согласно «Правилам устройства электроустановок» категория помещения по степени опасности поражения электрическим током для лаборатории относится к «помещениям без повышенной опасности поражения людей электрическим током».

Экспериментальная установка расположена на столе.

Поражение электрическим током может произойти в следующих случаях:

- При появлении электрического потенциала на частях оборудования установки, которая в нормальных условиях не должна находиться под напряжением.
- При случайном прикосновении к не изолированным проводникам электрического тока.
- При образовании электрической дуги между токоведущими частями установки и человеком в результате пробоя воздушного пространства.

4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия

Так как расчет освещенности лаборатории показал соответствие нормам СНиП 2.2.1/2.1.1.1278-03 [78]. Отсутствует необходимость в мероприятиях по снижению воздействия данного вредного фактора. Аналогично отсутствуют отклонения показателей микроклимата в лаборатории.

В качестве защиты от электромагнитного излучения компьютера могут быть предложены следующие мероприятия:

1. Системный блок и монитор должен находиться как можно дальше от работника.

2. Не оставлять компьютер включённым на длительное время. Возможно использование «спящего режима» для монитора.

3. В связи с тем, что электромагнитное излучение от стенок монитора намного больше, необходимо поставить монитор в угол, так чтобы излучение поглощалось стенами. Особое внимание стоит обратить на расстановку мониторов в офисах.

4. По возможности сократить время работы за компьютером и как можно чаще делать перерывы в работе.

5. Компьютер должен быть заземлён. Если приобретены защитные экраны, то их тоже следует заземлить, для этого специально предусмотрен провод на конце которого находится металлическая прищепка [87].

Мероприятия по снижению воздействия статического электричества:

- ликвидация или снижение возможности возникновения искровых разрядов
- уменьшение электризации веществ и материалов;
- обеспечение рассеивания или отвод возникающих электростатических зарядов [88].

Во избежание поражения электрическим током при работе на установке разработаны мероприятия по технике безопасности [89]:

- установка защитного заземления;
- при монтаже установки использовать изолированные кабели и провода;
- к работе на установке допускать лица, прошедшие инструктаж по ТБ [90].

4.3 Экологическая безопасность

Отходы один из существенных источников загрязнения окружающей среды (атмосферы, воды, в том числе подземной, почвы) вредными или опасными веществами, требующими выделения больших средств на ликвидацию последствий загрязнения такого рода [91].

В процессе экспериментальных исследований, проводимых в лаборатории, возникает проблема утилизации люминесцентных ламп, так как важным компонентом является ртуть. Ртуть - вещество I класса опасности (по ГОСТ 17.4.1.02-83) [92], это чрезвычайно опасное химическое вещество.

Количество ртути в люминесцентных лампах колеблется от 3 мг до 46 мг, в зависимости от размера лампы и возраста. Новые лампы содержат меньше ртути до 3-4 мг и продаются как низкортутные. Сломанная люминесцентная модель выпустит ртуть во внешнюю среду. Поэтому перед тем, как избавляться от лампы, её нельзя разбивать.

Контейнер для утилизации люминесцентных ламп представляет собой герметичный корпус, который выполнен из специального сплава стекла или легированной стали. На крышке либо сбоку располагается отверстие, которое закрывается при помощи автоматической защелки. Как только Вы проталкиваете лампу в него, крышка герметично закрывается, пары не проникают в окружающую среду, все совершенно безопасно [93].

Существует соответствующий закон Российской Федерации № 187, ст. 39, согласно которому существует обязанность уплатить штраф, если непозволительным способом утилизировали потенциально опасные отходы (люминесцентные лампы), либо самостоятельно установили утилизационный контейнер в ненадлежащем месте, а также организовали несанкционированный вывоз отходов за территорию их хранения. Необходимо утилизировать лампы в контейнерах, и далее вывоз отходов на полигоны хранения.

Так же в ходе работы возникали бумажные и пластиковые отходы, то есть твердые бытовые отходы.

Один из распространённых способов утилизации отходов является их размещение на специально оборудованных объектах (полигонах, свалках). Полигоны твердых бытовых отходов (ТБО) являются специальными сооружениями, предназначенными для изоляции и обезвреживания ТБО, и должны гарантировать санитарно-эпидемиологическую безопасность

населения. На полигонах обеспечивается статическая устойчивость ТБО с учетом динамики уплотнения, минерализации, газовой выделенности, максимальной нагрузки на единицу площади, возможности последующего рационального использования участка после закрытия полигон [94].

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В научно-исследовательской лаборатории №264 8 корпуса НИТПУ может возникнуть пожар - местная техногенная чрезвычайная ситуация. Пожарная безопасность может быть обеспечена мерами пожарной профилактики и активной пожарной защиты. Пожарная профилактика включает комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожара или уменьшение его последствий.

Причиной возникновения пожара может стать нарушение противопожарного режима.

Согласно СНиП 21-01-97* [95] здание 8-го корпуса НИТПУ относится к группе негорючих помещений относится к категории В-4 и с учетом наличия электроустановок напряжением до 1000 В на 100 м² должны быть: один углекислотный огнетушитель типа ОУ-8 и один пенный - типа ОП-10.

В практике тушения пожаров наибольшее распространение получили следующие принципы прекращения горения:

1. Изоляция горения очага от воздуха или снижение концентрации кислорода путем разбавления воздуха негорючими газами (углекислота $CO_2 < 12-14\%$);
2. Охлаждения очага горения ниже определенных температур;
3. Интенсивное торможение скорости химической реакции в пламени;
4. Механический срыв пламени струей газа или воды;
5. Создание условий огнепреграждения (условий, когда пламя распространяется через узкие каналы).

С целью предотвращения пожаров необходимо [96]:

1. Уходя из помещения проверить отключения всех электронагревательных приборов, электроустановок, а также силовой и осветительной сети;
2. Курить только в отведенных для курения местах;
3. В случае возникновения пожара приступить к тушению имеющимися средствами и вызвать по телефону “01” пожарную команду;
4. Сотрудники лаборатории должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной клетки.

Выводы по разделу

В ходе проведения работы были определены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Приведены сведения о возможных опасностях и вредных факторах, ожидающих работников во время рабочей деятельности, а так же возможности предотвращения этих опасностей. Было рассмотрено пагубное воздействие люминесцентных ламп а также твердых бытовых отходов на окружающую среду и приведен способ экологичной утилизации таких отходов. Приведены меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

Цель проекта – проведение научно-исследовательской работы, отвечающей современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а также является экономическое обоснование научно-исследовательской работы. Для этого будет проведен анализ конкурентоспособности технических решений, SWOT-анализ, планирование работ и рассчитан бюджет затрат.

Научно – исследовательская работа заключается в проведении серии экспериментов по исследованию процессов растекания и смачивания по текстурированной поверхности стали. Проведение экспериментов требует привлечение трудовых и материальных ресурсов.

5.1 Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1 Описание потенциальных потребителей

Лазерное текстурирование металлов – перспективный способ создания поверхностей с уникальными функциональными свойствами, например, гидрофобными/гидрофильными; повышенной стойкости к коррозии, биообрастанию, органическим загрязнениям, абразивному и кавитационному износу; высокой отражательной способностью. Основным продуктом, получаемым в ходе научно-исследовательской работы, являются текстурированные стальные подложки. Шероховатость таких поверхностей играет достаточно значимую роль при малых скоростях движения, характерных для течений капельных жидкостей. Такого рода течения реализуются в миниканальных системах охлаждения. В устройствах медико-

биологического назначения пригодилась бы стойкость к биообрастанию и органическим загрязнениям. Также в авиационной отрасли промышленности пригодилась бы стойкость к абразивному и кавитационному износу. А стойкость стали к коррозии пригодилась бы во многих областях жизнедеятельности, например в автомобилестроении.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Для успешного внедрения научной разработки необходимо изучить преимущества и недостатки конкурирующих методов создания поверхностей с уникальными функциональными свойствами, например гидрофильными или гидрофобными, для его лучшего продвижения на рынке в будущем.

Конкуренты:

- ХО – Химическая обработка
- ПП – Поверхностные покрытия
- ЛТ – Лазерное текстурирование

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных методов

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		ХО	ПП	ЛТ	К _{ХО}	К _{ПП}	К _{ЛТ}
1. Экологичность	0,3	1	2	5	0,3	0,6	1,5
2. Трудоемкость	0,3	2	2	4	0,6	0,6	1,2
3. Скорость получения поверхностей	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
4. Стоимость	0,2	3	3	3	0,6	0,6	0,6
5. Требования к помещению	0,1	3	3	4	0,3	0,3	0,4
Итого	1				1,9	2,4	4,2

В таблице 5.1 представлены основные конкуренты и критерии оценки конкурентоспособности. Каждый показатель конкурентов оценивается по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей определяются в соответствии с их значимостью и в сумме составляют 1. По таблице видим, что химическая обработка поверхностные покрытия имеют примерно одинаковое количество баллов. По баллам лазерное текстурирование немного превосходит своих конкурентов, это говорит о том, что данный метод может конкурировать с существующими методами в поставленных для него задачах. На рисунке 5.1 наглядно представлены преимущества и недостатки предложенного и существующих методов создания поверхностей с уникальными функциональными свойствами.

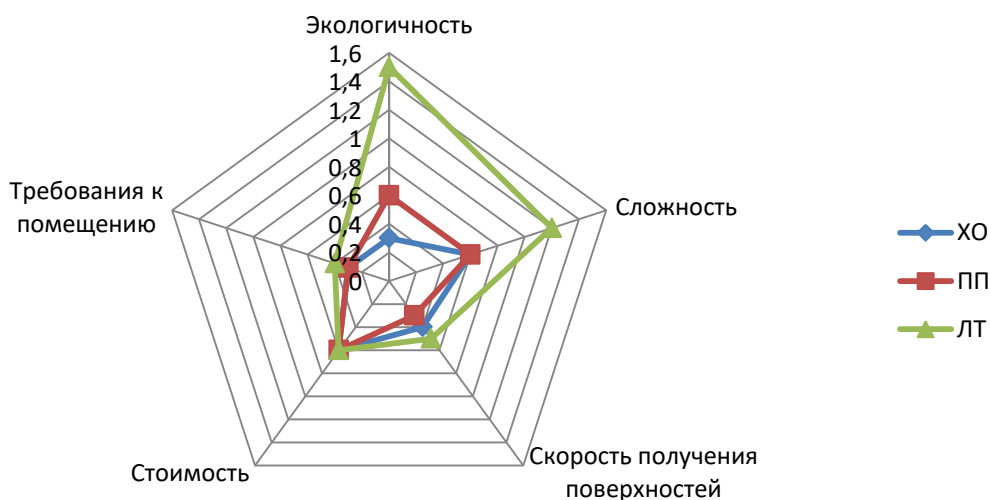


Рисунок 5.1 – Многоугольник конкурентоспособности

Рисунок показывает, что лазерное текстурирование имеет преимущество по таким показателям, как экологичность, скорость получения поверхностей, имеет минимальные требования к помещению и трудоемкость.

5.1.3 SWOT – анализ

SWOT – анализ проводится для комплексной оценки внешней и внутренней среды проекта. При SWOT-анализе рассматриваются сильные и слабые стороны, возможности и угрозы применительно к методу лазерного текстурирования относительно методов химической обработки и нанесению поверхностных покрытий. Итоговая матрица SWOT-анализа приведена в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Матрица SWOT проекта

	<p>Сильные стороны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Экологичность метода 2. Более низкая стоимость по сравнению с другими методами. 3. Отсутствие высоких требований к помещению. 4. Текстурирование является быстрым и одностадийным методом 5. Позволяет получать текстуры на разных материалах 	<p>Слабые стороны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Механизм инверсии свойств смачиваемости после лазерного текстурирования на данный момент остается не изучен на достаточном уровне 2. Дорогостоящая лазерная установка 3. Высокая точность скорости и количества проходов лазера 4. Сложность в обработке больших поверхностей
<p>Возможности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Дальнейшее исследование механизма инверсии свойств смачиваемости 2. Появление дополнительного спроса на новый продукт 3. Повышение стоимости других методов 	<p>Анализ:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Экологичность метода позволит безвредно проводить дальнейшие исследования механизма инверсии свойств смачиваемости 2. Низкая стоимость метода и отсутствие высоких требований к помещению также способствует дальнейшим исследованиям и возможному появлению дополнительного спроса на продукт 3. Повышение стоимости других методов только усилит конкурентоспособность лазерного текстурирования 	<p>Анализ:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Дальнейшие исследования механизма инверсии могут затянуться на продолжительный срок 2. Сложность обработке больших поверхностей может затруднить появление дополнительного спроса 3. Высокая точность скорости и количества проходов лазера может также способствовать конкурентному отставанию, снижению спроса

<p>Угрозы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Появление новых, более эффективных методов 2. Удешевление других методов 3. Выход из строя лазерной установки 	<p>Анализ:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Возможно появление более дешевых и эффективных методов, которые приведут к конкурентному отставанию лазерного текстурирования 	<p>Анализ:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Выход из строя дорогостоящей лазерной установки остановит весь процесс производства поверхностей 2. Возможен полный отказ использования лазерного метода
---	---	---

Из матрицы SWOT видно, что необходимо сделать упор на такие сильные стороны, как экологичность, быстрота и экономичность метода, так как именно эти сильные стороны проекта связаны с наибольшим количеством возможностей. Что касается слабых стороны, необходимо обратить внимание на улучшение технических параметров и на создание более дешевых лазерных установок. Работа над этими недостатками позволит повысить конкурентоспособность, уменьшить влияние внешних угроз на проект. Следует наращивать темпы изучения механизм инверсии свойств смачиваемости, что в конечном итоге может способствовать появлению поверхностей с контролируемым смачиванием.

5.2 Планирование и формирование бюджета научных исследований

5.2.1 Планирование работ

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

В таблице 5.3 представлен перечень работ и участников в рамках проведения научного исследования.

Таблица 5.3 – Перечень работ и определение участников каждой работы

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

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

5.2.2 Разработка графика Ганта

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

Согласно Производственному календарю на 2020 год:

В 2020 году 366 календарных дней. При пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями будет 248 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.

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 118} = 1,48.$$

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 5.4.

Таблица 5.4 – Продолжительность работ

№ раб	Содержание работ	T_{pi}	T_{ki}	Начало	Конец
1	Составление ТЗ	1	2	0	2
2	Выбор темы и направления проведения эксперимента	2	3	2	5
3	Теоретические исследования, проведение обзора литературы	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

По данным таблицы 5.4, можно сделать вывод, что число календарных дней, необходимых на разработку проекта, составляет 122 дня. Из них научный руководитель работает порядка 11 календарных дней, из них 6

рабочих, инженер – 111 календарных дней, из них 73 рабочих. На основании таблицы 4 построен график Ганта (рис. 3).

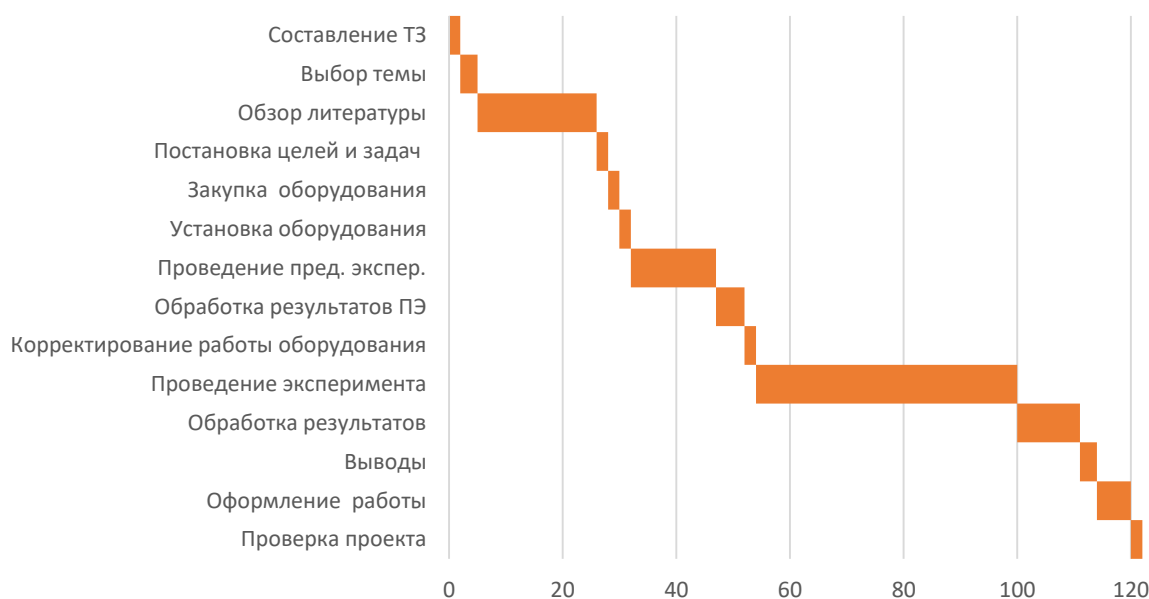


Рисунок 5.3 – График Ганта

Как видно из графика, самый затратный по времени этап научного исследования это проведение эксперимента.

5.2.3 Формирование бюджета затрат на научное исследование

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 участников проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления.

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 расходуемых 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 К – количество (объем потребления), шт.; Ц – стоимость единицы материала, руб.

В таблице 5.5 приведены материальные затраты проекта.

Таблица 5.5 – Материальные затраты проекта

Статьи расходов	Ед. изм-я.	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.
Фотоаппарат <u>Nikon D7100</u>	Шт.	39000	1	39000
Объектив Sigma	Шт.	22000	1	22000
Лист нержавеющей стали ASTM A240 2000·1000·0,5мм	Шт.	1848	1	1848
Нарезка листа стали на подложки 50·50·0,5 мм	–	1500	1	1500
Текстурирование подложек	Шт.	5200	1	5200
Клей эпоксидный «КОНТАКТ 12051»	Шт.	70	1	70
Клей эпоксидный «КОНТАКТ 12105»	Шт.	180	1	180
Трубка медная 2·0,5 мм	Шт.	300	1	300
Канц. товары				
• Ручки, карандаши, линейки и т.д.	–	–	–	250
• Бумага;	Пачка	150	1	150
• Флешка	шт.	2500	1	2500

• Дополнительные расходы	–	–	–	350
Заправка картриджей	Шт.	150	1	150
Электроэнергия	КВт·ч	4,25	158,6	674
Итого:	74172			

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

Расходы на электроэнергию определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = P \cdot \mathcal{C},$$

где P – мощность потребления, кВт.; Ч – количество часов работы, ч.

Расходы на электроэнергию представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – 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
Источник плоскопараллельного света	1	40	40
Насос	0,5	10	5
Принтер	0,25	2	0,5
Итого, кВт*ч	158,6		

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

Таблица 5.7 – Амортизация

Объекты	Норма амортизации	Первич. стоимость	Величина амортизации в год	Кол-во часов работы в год	Амортизация в час	Кол-во часов работы	С _A
Компьютер	20	40000	8000	1720	4,651163	144	669,77
Принтер	20	5100	1020	10	102	1	102
Фотоаппарат	20	39000	7800	675	11,555556	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
Источник плоскопараллельного света	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 Nikon	20	65000	13000	675	19,25926	60	1155,56
Итого:	9723,43						

Расходы по заработной плате определяются по трудоемкости выполняемой работы и действующей системы окладов и тарифных ставок. В основную заработную плату вносится премия, которая выплачивается каждый месяц в размере 20 –30 % от оклада.

Полная заработная плата работника:

$$Z_{\text{полн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата работника, руб.; $Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot Z_{\text{осн}}$ – дополнительная заработная плата работников, участвующих в работе над проектом (составляет 10-15% от основной заработной платы).

Размер основной заработной платы определяется по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p;$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата; T_p – суммарная продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником.

Размер среднедневной заработной платы определяется по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d};$$

где Z_M – заработная плата за 1 месяц научно-технического работника; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года ($M = 11,2$ для 5-ти дневной рабочей недели; $M = 10,4$ для 6-ти дневной рабочей недели); F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 5.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Число дней в году	366	366
Нерабочие дни	74	74
Выходные дни	52	52
Праздничные дни	22	22
Нерабочие дни:	48	24
Отпуск	48	24
Больничный	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени (F _д)	244	292

Зарплата за один месяц научно-технического работника определяется по формуле:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_D) \cdot k_p,$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке; k_p – районный коэффициент в г. Томске, равный 1,3; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3; k_D – коэффициент доплат и надбавок, равный 0,2.

Зарботная плата руководителя:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_D) \cdot k_p = 20000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 39000 \text{ руб.};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} = \frac{39000 \cdot 10,4}{366 - 74 - 48} = 1662,3 \text{ руб.};$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 1662,3 \cdot 6 = 9973,8 \text{ руб.};$$

$$Z_{п} = Z_{осн} + Z_{доп} = Z_{осн} + 0,15 \cdot Z_{осн} = 1,15 \cdot 9973,8 = 11469,9 \text{ руб.}$$

Зарботная плата инженера:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_D) \cdot k_p = 10000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 19500 \text{ руб.};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} = \frac{19500 \cdot 11,2}{366 - 74 - 24} = 814,9 \text{ руб.};$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 814,9 \cdot 73 = 59487,7 \text{ руб.};$$

$$Z_{п} = Z_{осн} + Z_{доп} = Z_{осн} + 0,15 \cdot Z_{осн} = 1,15 \cdot 59487,7 = 68410,9 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на заработную плату работников:

$$C_{з.пл.} = 11469,9 + 68410,9 = 79880,7 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды включают в себя отчисления во внебюджетные фонды: пенсионный фонд, фонд ОМС и т.д. Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды $k_{внеб}$ составляет 30%. Тогда расходы на социальные нужды:

$$C_{с.н.} = k_{внеб} \cdot C_{з.пл.} = 0,3 \cdot 79880,7 = 23964,2 \text{ руб.}$$

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи расходов. Накладные расходы находятся по выражению:

$$C_{накл} = (C_{м.з} + C_A + C_{з.пл.} + C_{с.н.}) \cdot k_{нр};$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы в размере 16%,

$$C_{накл} = (74172 + 9723,43 + 79880,7 + 23964,2) \cdot 0,16 = 30038,5 \text{ руб.}$$

Полная стоимость проекта составит:

$$\begin{aligned} \sum C &= C_{м.з} + C_A + C_{з.пл.} + C_{с.н.} + C_{накл} = \\ &= 74172 + 9723,43 + 79880,7 + 23964,2 + 30038,5 = 217778,8 \text{ руб.} \end{aligned}$$

5.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

5.3.1 Определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по трем вариантам исполнения приведено в таблице 5.9, 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 нужно.

Таблица 5.9 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Текущее исп.	Исп.2	Исп.3
Материальные затраты проекта	74172	1363480,93	13172
Амортизация	9723,43	28203	9723,43
Отчисления на социальные нужды	23964,2	23964,2	23964,2
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	79880,7	79880,7	79880,7
Накладные расходы (16 % от суммы ст. 1-4)	30038,5	248680,5	29674,3
Бюджет затрат проекта (Сумма ст. 1- 5)	217778,8	1744209,3	156414,6

Интегральные показатели финансовой эффективности научного исследования:

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{217778,8}{1744209,3} = 0,12;$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{1744209,3}{1744209,3} = 1;$$

$$I_{\text{исп.3}} = \frac{156414,6}{1744209,3} = 0,09.$$

В таблице 5.10 представлена оценка характеристик вариантов исполнения проекта.

Таблица 5.10 – Оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{\text{исп.1}}^p = 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,15 = 4,3;$$

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

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

Из расчетов выявлено, что текущий проект по интегральному показателю ресурсоэффективности вариантов является выгодным и превосходит аналоги.

Выводы по разделу

В результате проведения разработки раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было выяснено, что данное исследование оправдывает физические и материальные затраты.

1. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования.

2. Выявлено два конкурента: химическая обработка и поверхностные покрытия. Проведён анализ конкурентных технических решений, который показал, что лазерное текстурирование имеет преимущество по таким показателям, как экологичность, скорость получения поверхностей, имеет минимальные требования к помещению и трудоемкость.

3. В ходе SWOT-анализа установлено, что необходимо сделать упор на такие сильные стороны, как экологичность, быстрота и экономичность метода, так как именно эти сильные стороны проекта связаны с наибольшим количеством возможностей. Что касается слабых стороны, необходимо обратить внимание на улучшение технических параметров и на создание более дешевых лазерных установок. Работа над этими недостатками позволит повысить конкурентоспособность, уменьшить влияние внешних угроз на проект.

4. В ходе полной оценки стоимости проведения научного исследования был сформирован его бюджет. Все имевшееся на момент

начала проведения исследования оборудование было принято, как вновь купленное по текущим ценам. Для имевшегося оборудования рассчитана амортизация, оборудование стоимостью меньше 100000 руб. считалось приобретенным. Полная стоимость проекта 217778,8 руб., из них материальные затраты 74172руб., амортизация 9723,43руб., заработная плата участников проекта 79880,7 руб., продолжительность выполнения работы 122 календарных дня, электропотребление 158,6 кВт*ч. Полная заработная плата инженера превышает полную заработную плату научного руководителя вследствие гораздо большего затраченного времени в проекте.

5. С точки зрения ресурсоэффективности, данный проект является перспективным и конкурентоспособным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного обзора литературы, посвященной исследованию смачивания и растекания малых объемов жидкости по текстурированным поверхностям, установлено, что механизм инверсии свойств смачиваемости после лазерного текстурирования на данный момент остается не изучен на достаточном уровне, позволяющем прогнозировать изменение свойств смачиваемости. Существует несколько гипотез, объясняющих механизм инверсии свойств смачиваемости на поверхностях металлов. Первая гипотеза гласит, что оксиды металлов, генерирующиеся при лазерной обработке, очень активны и имеют тенденцию реагировать с окружающими молекулами с течением времени, уменьшая поверхностную энергию и смачиваемость как следствие. Вторая гипотеза о том, что основной причиной изменения смачиваемости поверхности является шероховатость. Существует и третья гипотеза, что изменение смачиваемости связано с изменением элементного состава поверхности.

Стабильные супергидрофобные и супергидрофильные поверхности могут быть созданы с использованием пикосекундной, фемтосекундной и наносекундной и лазерной обработки. Изготавливают такие поверхности чаще всего из материалов, хорошо зарекомендовавших себя в производстве, таких как нержавеющая сталь, медь и алюминий. Метод нанесения микроструктуры лазерным излучением имеет достоинства: это бесконтактный, не требующий серьезных капиталовложений метод, который легко использовать, можно получить широкий диапазон текстур (ограничен только параметрами лазерной установки), можно получать текстуры на разных материалах.

Рассмотрено несколько моделей для описания процесса смачивания. Одна, из которых, основана на молекулярно-кинетической теории, в этой модели смачивание рассматривается с точки зрения кинетики молекулярных процессов, происходящих на линии трехфазного контакта. Другая модель основана на гидродинамике, в ней рассматривается влияние вязких

напряжений на изменение контактного угла при движении трехфазной линии контакта.

Анализ литературных источников и обобщение результатов экспериментальных исследований, выполненных с использованием достаточно типичной жидкости (воды) и широко применяемого в промышленности материала (стали), дают основания для вывода о том, что текстурирование поверхностей металлов лазерным излучением является перспективным и актуальным направлением научных исследований.

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие основные результаты и выводы:

1. Установлено, что при падении одиночного лазерного луча при фиксированной энергии в импульсе 1 мДж (мощность 20 Вт), частоте 20 кГц, времени воздействия 200 нс на поверхности стали формировался элемент текстуры (кратер) в форме близкой к чашеобразной, диаметр которого составил $90,7 \pm 3,2$ мкм. Используя геометрические размеры элемента текстуры, определены параметры лазерного излучения (скорость линейного перемещения лазерного луча и количество линий прохода на 1 мм) для формирования анизотропных ($v = 1269,8$ мм/с, $n = 15$ мм⁻¹ (30% наложение элемента текстуры); $v = 725,6$ мм/с, $n = 27$ мм⁻¹ (60% наложение элемента текстуры)) и упорядоченных текстур ($v = 1814$ мм/с, $n = 11$ мм⁻¹ (с соприкасающимися кратерами); $v = 3628$ мм/с, $n = 5$ мм⁻¹ (с расстоянием между кратерами равным двум диаметрам кратера)).

2. После лазерного текстурирования зарегистрирована инверсия свойств смачиваемости поверхности стали. Непосредственно после текстурирования поверхности характеризовались гидрофильными свойствами со $\text{СКУ} < 90^\circ$. По прошествии времени зарегистрирован рост контактного угла, стабилизация, которого происходила через 11 для текстуры с расстоянием между кратерами равным двум диаметрам кратера и 48 дней для текстуры с соприкасающимися кратерами. Для анизотропных текстур по

прошествии 117 дней стабилизация свойств смачиваемости не зарегистрирована, рост контактного угла продолжается.

3. Установлено, что значения среднего расстояния между молекулярными перемещениями λ больше размера молекулы H_2O (0,28 нм) и лежит в пределах 0,36–2,95 нм. Полученный диапазон согласуется с результатами расчетов [71–75]. Зарегистрирована зависимость среднего расстояния между молекулярными перемещениями от шероховатости поверхности, в случае наступающей и отступающей линии трехфазного контакта λ уменьшается с увеличением шероховатости в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2.

4. Установлено, что частота случайных молекулярных перемещений k^0 также как λ , зависит от шероховатости поверхности, с ростом шероховатости частота случайных молекулярных перемещений уменьшается в последовательности поверхностей №4–№3–№1–№2.

5. Зависимости ГДМ неудовлетворительно описывают экспериментальные данные согласно коэффициенту детерминации (таблицы 3.11-3.13). Аппроксимационные кривые в рассматриваемом диапазоне динамических контактных углов (30–90°) и чисел капиллярности (10^{-10} – 10^{-5}) близки к линейному виду. Эти кривые не удовлетворительно описывают экспериментальные данные (рисунок 3.6). Параметр – логарифм отношения характерного размера макроскопической и микроскопической областей $\ln(L/L_m)$ в этом случае физически не обоснован. Характеристическая длина макроскопической области L принимается равной капиллярной постоянной жидкости, длина микроскопической области L_m в исследованиях других авторов [71] имеет порядок длины свободного пробега молекулы. Следовательно, величина $\ln(L/L_m)$ должна лежать в диапазоне 10 – 100 [71]. Полученные в настоящей работе величины логарифма имеют порядок 10^5 , что значительно превышает этот диапазон.

6. По результатам проведенного анализа установлено, что в области малых чисел капиллярности от 10^{-10} до 10^{-5} уравнение молекулярно-

кинетической модели, лучше аппроксимирует экспериментальные данные по сравнению уравнением гидродинамической модели. Последнее подтверждается коэффициентами детерминации.

В результате разработки раздела «Социальная ответственность» определены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Приведены сведения о возможных опасностях и вредных факторах, ожидающих работников во время рабочей деятельности, а так же возможности предотвращения этих опасностей. Рассмотрено пагубное воздействие люминесцентных ламп а также твердых бытовых отходов на окружающую среду и приведен способ экологичной утилизации таких отходов. Приведены меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

В результате разработки раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выяснено, что проводимое в настоящей работе исследование оправдывает физические и материальные затраты. Оценены экономические аспекты научно-исследовательской работы по исследованию свойства смачивания и процесса растекания капель жидкости по текстурированным лазерным излучением поверхностям стали. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования. Проведён анализ конкурентных технических решений. С точки зрения ресурсоэффективности, данный проект является перспективным и конкурентоспособным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang F. et al. Preparation of superhydrophobic films on titanium as effective corrosion barriers // *Appl. Surf. Sci.* Elsevier B.V., 2011. Vol. 257, № 7. P. 2587–2591.
2. Arima Y., Iwata H. Effect of wettability and surface functional groups on protein adsorption and cell adhesion using well-defined mixed self-assembled monolayers // *Biomaterials*. 2007. Vol. 28, № 20. P. 3074–3082.
3. Riveiro A. et al. Laser surface texturing of polymers for biomedical applications // *Front. Phys.* 2018. Vol. 5, № FEB.
4. Betz A.R. et al. Do surfaces with mixed hydrophilic and hydrophobic areas enhance pool boiling? // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, № 14. P. 2012–2015.
5. Pou P. et al. Laser texturing of stainless steel under different processing atmospheres: From superhydrophilic to superhydrophobic surfaces // *Appl. Surf. Sci.* Elsevier B.V., 2019. Vol. 475. P. 896–905.
6. A.V. Ryzhenkov, M.R. Dasaev, S.V. Grigoryev A.V.K. The Influence of Structured Relief on Wetting Properties of Zinc Plated Steel Surface // *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.* 2020. Vol. 8. P. 164–169.
7. Kietzig A., Mirvakili M.N. Journal of Adhesion Science and Laser-Patterned Super- Hydrophobic Pure Metallic Substrates : Cassie to Wenzel Wetting Transitions. 2012. № July 2013. P. 2789–2809.
8. Riveiro A. et al. Laser surface modification of PEEK // *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258, № 23. P. 9437–9442.
9. Qiao J. et al. The effect of attributes of micro-shapes of laser surface texture on the wettability of WC-CrCo metal ceramic coatings // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V, 2018. Vol. 334. P. 429–437.
10. Chantada A. et al. Increasing the hydrophobicity degree of stonework by means of laser surface texturing: An application on Zimbabwe black granites // *Appl. Surf. Sci.* 2017. Vol. 418. P. 463–471.
11. Long J. et al. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of

- picosecond laser microstructured aluminum in ambient air // *J. Colloid Interface Sci.* Elsevier Inc., 2015. Vol. 441. P. 1–9.
12. Cardoso J.T. et al. Influence of ambient conditions on the evolution of wettability properties of an IR-, ns-laser textured aluminium alloy // *RSC Adv.* 2017. Vol. 7, № 63. P. 39617–39627.
 13. Long J. et al. Cassie-State Stability of Metallic Superhydrophobic Surfaces with Various Micro/Nanostructures Produced by a Femtosecond Laser // *Langmuir.* 2016. Vol. 32, № 4. P. 1065–1072.
 14. Moradi S. et al. Femtosecond laser irradiation of metallic surfaces: Effects of laser parameters on superhydrophobicity // *Nanotechnology.* 2013. Vol. 24, № 41.
 15. Razi S., Madanipour K., Mollabashi M. Laser surface texturing of 316L stainless steel in air and water: A method for increasing hydrophilicity via direct creation of microstructures // *Opt. Laser Technol.* Elsevier, 2016. Vol. 80. P. 237–246.
 16. Kam D.H., Bhattacharya S., Mazumder J. Control of the wetting properties of an AISI 316L stainless steel surface by femtosecond laser-induced surface modification // *J. Micromechanics Microengineering.* 2012. Vol. 22, № 10.
 17. Ta D. V. et al. Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications // *Appl. Surf. Sci.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 357. P. 248–254.
 18. Rajab F.H., Liu Z., Li L. Production of stable superhydrophilic surfaces on 316L steel by simultaneous laser texturing and SiO₂ deposition // *Appl. Surf. Sci.* Elsevier B.V., 2018. Vol. 427. P. 1135–1145.
 19. Feng L. et al. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial // *Adv. Mater.* 2002. Vol. 14, № 24. P. 1857–1860.
 20. Drelich J. et al. Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials // *Soft Matter.* 2011. Vol. 7, № 21. P. 9804–9828.
 21. Wang S. et al. Bioinspired surfaces with superwettability: New insight on theory, design, and applications // *Chem. Rev.* 2015. Vol. 115, № 16. P.

- 8230–8293.
22. Su B., Tian Y., Jiang L. Bioinspired Interfaces with Superwettability: From Materials to Chemistry // *J. Am. Chem. Soc.* 2016. Vol. 138, № 6. P. 1727–1748.
 23. Young T. An essay on the cohesion of fluids // *Philos. Trans. R. Soc. London. B, Biol. Sci.* 1805. Vol. 95, № 1113. P. 65–87.
 24. Wenzel R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water // *Ind. Eng. Chem.* 1936. Vol. 28, № 8. P. 988–994.
 25. Cassie A.B.D. Contact Angles // *Discuss. Faraday Soc.* 1948. Vol. 3. P. 11–16.
 26. Cassie B.D. Of porous surfaces,. 1944. № 5. P. 546–551.
 27. Ren N. et al. Nanostructured titanate with different metal ions on the surface of metallic titanium: A facile approach for regulation of rBMSCs fate on titanium implants // *Small.* 2014. Vol. 10, № 15. P. 3169–3180.
 28. Zhang L., Zhao N., Xu J. Fabrication and application of superhydrophilic surfaces: A review // *J. Adhes. Sci. Technol.* 2014. Vol. 28, № 8–9. P. 769–790.
 29. Takata Y. et al. Pool boiling on a superhydrophilic surface // *Int. J. Energy Res.* 2003. Vol. 27, № 2. P. 111–119.
 30. Piret G. et al. Biomolecule and nanoparticle transfer on patterned and heterogeneously wetted superhydrophobic silicon nanowire surfaces // *Langmuir.* 2008. Vol. 24, № 5. P. 1670–1672.
 31. Byon C. et al. Drag reduction in Stokes flows over spheres with nanostructured superhydrophilic surfaces // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107, № 6. P. 3–6.
 32. Kim P. et al. Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance // *ACS Nano.* 2012. Vol. 6, № 8. P. 6569–6577.
 33. Chang F.M. et al. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of CuO nanowire films // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, № 11. P. 96–99.
 34. Long J. et al. Wettability conversion of ultrafast laser structured copper

- surface // *J. Laser Appl.* 2015. Vol. 27, № S2. P. S29107.
35. Niemi R. et al. Surface pretreatment of austenitic stainless steel and copper by chemical, plasma electrolytic or CO₂ cryoblasting techniques for sol-gel coating // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V., 2010. Vol. 204, № 15. P. 2424–2431.
 36. McDonnell A.M.P. et al. Hydrophilic and antimicrobial zeolite coatings for gravity-independent water separation // *Adv. Funct. Mater.* 2005. Vol. 15, № 2. P. 336–340.
 37. Jennissen H.P., Lattner D. Preparation and properties of ultra-hydrophilic surfaces on titanium and steel // *Materwiss. Werksttech.* 2009. Vol. 40, № 1–2. P. 108–116.
 38. Gaggi A. et al. Scanning electron microscopical analysis of laser-treated titanium implant surfaces-a comparative study // *Biomaterials.* 2000. Vol. 21, № 10. P. 1067–1073.
 39. Peto G. et al. Surface treatment of screw shaped titanium dental implants by high intensity laser pulses // *Appl. Surf. Sci.* 2002. Vol. 186, № 1–4. P. 7–13.
 40. Wang X. et al. Picosecond Laser Surface Texturing of a Stavax Steel Substrate for Wettability Control // *Engineering. Chinese Academy of Engineering*, 2018. Vol. 4, № 6. P. 816–821.
 41. Ma C. et al. Fabrication of Regular Hierarchical Structures with Superhydrophobic and High Adhesion Performances on a 304 Stainless Steel Surface via Picosecond Laser // *J. Bionic Eng.* 2019. Vol. 16, № 5. P. 806–813.
 42. Rukosuyev M. V. et al. One-step fabrication of superhydrophobic hierarchical structures by femtosecond laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* Elsevier B.V., 2014. Vol. 313. P. 411–417.
 43. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Patterned superhydrophobic metallic surfaces // *Langmuir.* 2009. Vol. 25, № 8. P. 4821–4827.
 44. Wu B. et al. Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser // *Appl. Surf. Sci.* 2009. Vol. 256, №

1. P. 61–66.
45. Jagdheesh R. et al. Laser-induced nanoscale superhydrophobic structures on metal surfaces // *Langmuir*. 2011. Vol. 27, № 13. P. 8464–8469.
46. Tang M. et al. Laser ablation of metal substrates for super-hydrophobic effect // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2011. Vol. 6, № 1. P. 6–9.
47. Vorobyev A.Y., Guo C. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 117, № 3.
48. Su F., Yao K. Facile fabrication of superhydrophobic surface with excellent mechanical abrasion and corrosion resistance on copper substrate by a novel method // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014. Vol. 6, № 11. P. 8762–8770.
49. Zhang B. et al. Fabrication of superhydrophobic surfaces on metal substrates by nanosecond laser // *Key Eng. Mater.* 2019. Vol. 815 KEM. P. 48–53.
50. Dussan E.B. On the Spreading of Liquids on Solid Surfaces: Static and Dynamic Contact Lines // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1979. Vol. 11, № 1. P. 371–400.
51. Lawrence J., Waugh D.G. Creating superhydrophobic surface structures via the rose petal effect on stainless steel with a picosecond laser // *Lasers Eng.* 2017. Vol. 37, № 1–3. P. 125–134.
52. Blake T.D., Haynes J.M. Kinetics of liquid liquid displacement // *J. Colloid Interface Sci.* 1969. Vol. 30, № 3. P. 421–423.
53. Cherry B., Holmes C.. Kinetics of wetting of surfaces by polymers // *J. Colloid Interface Sci.* 1969. Vol. 29, № 1. P. 174–176.
54. Ruckenstein E., Dunn C.S. Slip velocity during wetting of solids // *J. Colloid Interface Sci.* 1977. Vol. 59, № 1. P. 135–138.
55. Biance A.L., Clanet C., Quéré D. First steps in the spreading of a liquid droplet // *Phys. Rev. E - Stat. Physics, Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top.* 2004. Vol. 69, № 1. P. 4.
56. De Ruijter M.J. et al. Contact angle relaxation during the spreading of partially wetting drops // *Langmuir*. 1997. Vol. 13, № 26. P. 7293–7298.
57. Shikhmurzaev Y.D. Spreading of drops on solid surfaces in a quasi-static

- regime // *Phys. Fluids*. 1997. Vol. 9, № 2. P. 266–275.
58. Shikhmurzaev Y.D. Moving contact lines in liquid/liquid/solid systems // *J. Fluid Mech.* 1997. Vol. 334, № September 2000. P. 211–249.
59. Hansen R.J., Toong T.Y. Dynamic contact angle and its relationship to forces of hydrodynamic origin // *J. Colloid Interface Sci.* 1971. Vol. 37, № 1. P. 196–207.
60. Blake T.D. The physics of moving wetting lines // *J. Colloid Interface Sci.* 2006. Vol. 299, № 1. P. 1–13.
61. Huh C., Scriven L.E. Shapes of axisymmetric fluid interfaces of unbounded extent // *J. Colloid Interface Sci.* 1969. Vol. 30, № 3. P. 323–337.
62. Voinov O. V. Hydrodynamics of wetting // *Fluid Dyn.* 1976. Vol. 11, № 5. P. 714–721.
63. By P., Co I. *Langmuir Blodgett Deposition*. 1998. Vol. 9, № 7. P. 2490–2496.
64. Kistler S.F., Schweizer P.M. *Liquid Film Coating: Scientific principles and their technological implications* // *Liquid Film Coating: Scientific principles and their technological implications*. 1997.
65. Petrov J.G. et al. Dynamics of partial wetting and dewetting in well-defined systems // *J. Phys. Chem. B*. 2003. Vol. 107, № 7. P. 1634–1645.
66. Brochard-Wyatt F., De Gennes P.G. Dewetting of a water film between a solid and a rubber // *J. Phys. Condens. Matter*. 1994. Vol. 6, № 23A.
67. De Ruijter M.J., De Coninck J., Oshanin G. Droplet spreading: Partial wetting regime revisited // *Langmuir*. 1999. Vol. 15, № 6. P. 2209–2216.
68. Blake T.D., Dobson R.A., Ruschak K.J. Wetting at high capillary numbers // *J. Colloid Interface Sci.* 2004. Vol. 279, № 1. P. 198–205.
69. Н.С. Кравченко О.Г.Р. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие; Томский политехнический университет.-2-е изд., перераб.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2017. 120 р.
70. Orlova E.G. et al. Spreading of a distilled water droplet over polished and

- laser-treated aluminum surfaces // *Eur. J. Mech. B/Fluids*. Elsevier Masson SAS., 2018. Vol. 68. P. 118–127.
71. Fetzer R., Ramiasa M., Ralston J. Dynamics of liquid-liquid displacement // *Langmuir*. 2009. Vol. 25, № 14. P. 8069–8074.
72. Snoeijer J.H. Free-surface flows with large slopes: Beyond lubrication theory // *Phys. Fluids*. 2006. Vol. 18, № 2. P. 1–5.
73. Blake T.D., Bracke M., Shikmurzaev Y.D. Experimental evidence of nonlocal hydrodynamic influence on the dynamic contact angle // *Phys. Fluids*. 1999. Vol. 11, № 8. P. 1995–2007.
74. Ranabothu S.R., Karnezis C., Dai L.L. Dynamic wetting: Hydrodynamic or molecular-kinetic? // *J. Colloid Interface Sci.* 2005. Vol. 288, № 1. P. 213–221.
75. Hayes R.A., Ralston J. Forced liquid movement on low energy surfaces // *Journal of Colloid And Interface Science*. 1993. Vol. 159, № 2. P. 429–438.
76. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»
77. СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам»
78. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»
79. СП 52.13330.2011 «Свод правил естественное и искусственное освещение»
80. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
81. ГОСТ 12.1.005-87 «Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования»
82. СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»

83. ГОСТ 12.0.003-74ССБТ «Система стандартов безопасности труда, опасные и вредные факторы»
84. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Физические факторы производственной среды электромагнитные поля в производственных условиях»
85. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда»
86. ГОСТ 12.1.045–84 «Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»
87. СанПиН 2.2.2./2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
88. РД 39-22-113-78 «Временные правила защиты от проявлений статического электричества»
89. ГОСТ 12.1.030-81ССБТ «Электробезопасность»
90. ГОСТ 12.4.113-82 «Система стандартов безопасности труда»
91. ГОСТ 12.1.009-2016 «Межгосударственный стандарт система стандартов безопасности труда. Электробезопасность.»
92. ГОСТ 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнений»
93. ГОСТ 12.1.007–76ССБТ. «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»
94. ГОСТ 30772-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами.
95. СНиП 21-01-97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений»
96. ГОСТ Р 22.0.01-2016 «Безопасность в ЧС. Защита населения»