

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Исламова Анастасия Гомильевна

**СМАЧИВАНИЕ, РАСТЕКАНИЕ И ИСПАРЕНИЕ
СПЕЦИАЛЬНЫХ ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ НА
ШЕРОХОВАТЫХ И НАГРЕТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители
Доктор физико-математических наук
Кузнецов Гений Владимирович
Кандидат технических наук
Феоктистов Дмитрий Владимирович

Томск – 2021

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СМАЧИВАНИЯ, РАСТЕКАНИЯ И ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ГЛАДКИХ И ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	14
1.1 Проблемы тушения лесных пожаров	14
1.2 Смачивание и растекание капель жидкостей на поверхности элементов лесных горючих материалах	17
1.3 Испарение капель однокомпонентных жидкостей и солевых растворов	21
1.4 Исследование процессов смачивания и растекания жидкостей на твердых поверхностях.....	23
1.5 Смачивание и растекание капель на шероховатых абразивно-обработанных поверхностях.....	27
Выводы по первой главе.....	29
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	31
2.1 Определение свойств смачивания и характеристик процесса растекания малых объемов жидкости	31
2.2 Методика исследования процессов испарения капель жидкости.....	33
2.3. Исследование испарение капель солевых растворов на поверхности сплава Амг634	
2.4. Методика изучения смачивания и испарения специальных огнетушащих составов	35
2.4.1 Материалы ЛГМ и растворы огнетушащего состава, используемые при изучении смачивания ЛГМ	35
2.4.2 Методика исследования испарения капель специальных огнетушащих составов, лежащих на поверхности ЛГМ и абразивно-обработанных металлов	36

2.4.3 Методика исследования испарения капель специальных огнетушащих составов при кондуктивном, конвективном и радиационном подводе тепла	39
2.5 Методика исследования смачивания и растекания капель жидкости на поверхностях металлов.....	41
2.5.1 Материалы	42
2.5.2 Анализ микротекстуры поверхности и элементного состава приповерхностного слоя.....	44
2.5.3 Определение свободной поверхностной энергии.....	44
ГЛАВА 3. ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ СОСТАВОВ (РАСТВОРОВ, ЭМУЛЬСИЙ И СУСПЕНЗИЙ) НА НАГРЕТЫХ И ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	48
3.1 Испарение капель растворов на нагретых поверхностях	48
3.2 Смачивание и испарение капель специальных составов (растворов, суспензий и эмульсий) на поверхностях элементов лесного горючего материала.....	57
3.2.1 Смачивание поверхностей лесного горючего материала каплями огнетушащих составов.....	57
3.2.2 Испарение капель огнетушащих составов с поверхности ЛГМ	69
3.3 Испарение капель огнетушащих составов на поверхностях меди и стали....	77
3.4 Испарение капель огнетушащих составов при кондуктивном, конвективном и радиационном подводе тепла	81
Выводы по третьей главе.....	96
ГЛАВА 4. СМАЧИВАНИЕ И РАСТЕКАНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА АБРАЗИВНО-ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛОВ.....	99
4.1 Текстуры поверхностей меди и стали, сформированные в условиях абразивной обработки.....	99
4.1.1. Трехмерные высотные характеристики шероховатости.....	102

4.1.2. Трехмерные гибридные характеристики шероховатости	106
4.1.3. Трехмерные характеристики дискретизации	108
4.1.4. Характеристики элемента.....	109
4.2 Изменение элементного состава образцов меди и стали после абразивной обработки	111
4.3 Поверхностная энергия и смачивание абразивно-обработанных образцов меди и стали.....	113
4.4. Смачивание и растекание капель жидкости на абразивно-обработанных поверхностях алюминиево-магниевого	117
4.4.1 Смачивание абразивно-обработанного алюминиево-магниевого сплава	119
3.4.2 Динамические характеристики процесса растекания капель на абразивно-обработанных поверхностях алюминиево-магниевого сплава	121
4.4.3 Математическое моделирование растекания капель жидкости по абразивно-обработанным поверхностям алюминиевого сплава.....	124
Выводы по четвертой главе.....	127
Основные результаты и выводы	130
Список принятых сокращений и условных обозначений	134
Список литературы	137

Введение

Актуальность работы. Проблема лесных пожаров с каждым годом становится все более и более актуальной в связи с тем, что число таких природных катастроф локального масштаба растет, несмотря на усилия, предпринимаемые многими государствами с лесопокрытыми территориями (США, Канада, Россия, Австралия и др.) в борьбе с лесными пожарами [1,2]. Во многом неэффективность такой борьбы в последние годы обусловлена отсутствием научно-обоснованных методов, способов и средств подавления (или локализации) процессов горения леса на больших площадях. При этом уже достаточно очевидно, что наиболее эффективна борьба с лесными пожарами с использованием авиации и специальных огнетушащих составов [3–5]. Но применение последних осуществляется по результатам их экспериментальной отработки, стендовых или летных испытаний в условиях отсутствия моделей, адекватно описывающих механизмов подавления горения лесных горючих материалов (ЛГМ) конкретными огнетушащими составами (растворами, эмульсиями или суспензиями). Поэтому актуальной и практически значимой в области лесной пожарной опасности является задача установления основных закономерностей процессов взаимодействия капель специальных огнетушащих составов с типичными элементами лесных горючих материалов (хвоинками, листьями, веточками). Поверхности элементов лесных горючих материалов не являются молекулярно-гладкими, их рельеф характеризуется хаотичным расположением неоднородностей (впадин и выступов) микрометрового и нанометрового масштаба, что должно влиять на характеристики процессов смачивания и растекания капель разного рода жидкостей (однородных, эмульсий, растворов, суспензий). Такие поверхности относятся к категории шероховатых.

Но интенсивные экспериментальные исследования процессов смачивания, растекания и испарения малых объемов жидкостей (капель, ривулетов, фрагментов пленок) проводились ранее и ведутся в последние годы на гладких, в основном, поверхностях [6–8]. Наиболее значимые в этой области результаты

получены научными коллективами под руководством О.А. Кабова, В.И. Терехова, Ю.А. Кузма-Кичты, А.Н. Павленко, Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко, О.В. Воинова, R.G. Cox, D. Brutin, P.G. De Gennes, T.D. Blake, R. Hoffman, L.H. Tanner, R. Sedev, M. I. Newton.

Кроме этого следует отметить, что в реальной практике, как показывают тенденции развития техники и технологии последних десятилетий, все чаще и чаще возникают задачи обеспечения регламентных тепловых режимов работы малоразмерных элементов конструкций энергонасыщенного оборудования различного назначения, решить которые традиционными методами невозможно. Капли жидкостей (как правило специальных составов) становятся основным инструментом регулирования температур интенсивно тепловыделяющих элементов, например, электронной или радиоэлектронной техники, средств связи. При этом часто целесообразно локальное охлаждение зон наиболее интенсивного выделения теплоты с малой площадью открытой поверхности. В этих условиях становится очевидной необходимость управления процессами смачивания и растекания одиночной или группы капель, а также испарения жидкости. Сделать это можно, регулируя шероховатость поверхности. Но до настоящего времени не опубликованы результаты исследования процессов смачивания, растекания и испарения капель на шероховатых и нагретых поверхностях.

В связи с вышеизложенным необходимо проведение экспериментальных исследований основных закономерностей смачивания, растекания и испарения капель на твердых нагретых поверхностях или со значимой шероховатостью с целью обоснования возможности стабилизации положения капли на малом по площади участке поверхности, соответствующем зоне интенсивного тепловыделения.

Степень разработанности темы исследования. До настоящего времени задачи экспериментального или теоретического обоснования эффективности тушения лесных пожаров с использованием специальных жидкостей – эмульсий, растворов, суспензий даже не ставились. Пока такие составы разрабатываются методом проб в условиях отсутствия не только теории, описывающей смачивание,

процессы растекания и испарения капель специальных составов на поверхностях шероховатых элементов лесных горючих материалов (хвоинках, листьях, веточках), но и достоверных экспериментальных данных об основных закономерностях этих процессов.

Также следует отметить, что несмотря на то, что в последние десятилетия активно разрабатываются способы (лазерная обработка [9,10], литография [11], травление [12], абразивная обработка [13,14], аддитивные технологии [15]) изменения смачивания различного рода поверхностей и управления растеканием капель жидкости на них в результате создания текстуры микрометрового и нанометрового масштаба, в настоящее время получены только результаты, устанавливающие влияние текстуры (расположения ее элементов, например, микро- или нано столбиков правильной геометрической формы) на свойства смачивания и процессы растекания и испарения капель по поверхностям определенного элементного состава. Не определены количественные характеристики текстуры, изменение которых позволяет управлять процессами смачивания и растекания. Для разработки теоретических положений, позволяющих проводить прогностическую оценку интенсивности процессов смачивания, растекания и испарения вследствие модификации текстуры, необходимо, в первую очередь, получить экспериментальные данные, связывающие свойства смачивания и процесс растекания с характеристиками микрорельефа поверхности, на которой находится капля.

Целью работы является установление в результате экспериментальных исследований основных закономерностей смачивания, растекания и испарения капель специальных огнетушащих составов на шероховатых поверхностях лесных горючих материалов в условиях их нагрева, а также на поверхностях металлов, модифицированных абразивной обработкой, и оценка возможности стабилизации положения капли жидкости на шероховатой нагретой поверхности.

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

1. Разработка методики экспериментального исследования процессов смачивания, растекания и испарения капель огнетушащих составов (растворов,

эмульсии и суспензии) на поверхности элементов лесного горючего материала (листьев, хвоинок, веточек).

2. Установление временных характеристик фазовых превращений капель растворов с выделением режимов и механизмов испарения при нагреве на поверхностях лесных горючих материалов и металлов.

3. Экспериментальное определение основных закономерностей смачивания, растекания и испарения капель огнетушащих составов (растворов, эмульсии и суспензии) на поверхности элементов лесных горючих материалов.

4. Экспериментальное определение основных закономерностей смачивания, растекания и испарения капель жидкостей на шероховатых поверхностях меди М1, стали 12Х18Н10Т и алюминиево-магниевого сплава АМг6.

5. Установление по результатам экспериментов влияния микрорельефа поверхности (описываемого характеристиками шероховатости) на смачивание и динамические характеристики (динамические контактные углы, диаметр растекания, скорость движения линии контакта трех фаз) растекания капель дистиллированной воды на абразивно-обработанных поверхностях меди и стали.

6. Обоснование возможности применения известных моделей (молекулярно-кинетической, гидродинамической и комбинированной) к описанию процессов растекания жидкости малого объема по поверхностям металлов с различной шероховатостью.

7. Обоснование возможности стабилизации положения капли на шероховатых нагретых поверхностях.

Научная новизна работы. Установлены закономерности процессов смачивания и испарения капель воды и специальных огнетушащих составов на поверхностях лесных горючих материалов (хвоинках, листьях, веточках). Определены времена и скорости испарения капель огнетушащих составов с поверхности листа при температурах 50-110 °С. Установлены отличия скоростей испарения капель исследовавшихся достаточно типичных составов от аналогичных характеристик воды без примесей. Показано, что при идентичных начальных размерах капель огнетушащих суспензий, эмульсий и растворов

времена их испарения отличаются значительно. Также обоснована возможность управления процессами смачивания, растекания и испарения капель жидкости на технологических поверхностях нагрева в результате создания текстуры, характеризующейся различной шероховатостью. Установлены зависимости статических и динамических контактных углов, диаметра растекания, скорости движения линии контакта трех фаз при растекании капель дистиллированной воды на абразивно-обработанных поверхностях металлов от характеристик шероховатости. Показана возможность применения молекулярно-кинетической модели для описания процессов растекания жидкости малого объема по поверхностям металлов с различной шероховатостью.

Теоретическая ценность и практическая значимость работы. Полученные аппроксимационные выражения для основных характеристик исследуемых процессов (смачивания и испарения капель на поверхностях лесных горючих материалов) могут быть использованы при разработке специальных составов для тушения лесных пожаров.

Обоснована возможность управления смачиванием, растеканием и испарением капель жидкости на поверхностях металлов после их абразивной обработки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рекомендаций к нормативным методам расчета систем капельного охлаждения энергонасыщенного оборудования (электронной и радиоэлектронной техники, средств связи и управления, электронно-вычислительной техники).

Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов РНФ № 18-19-00056 «Подавление пламенного горения и термического разложения конденсированных веществ на больших площадях при специализированной подаче воды перед и во фронте горения» и РФФИ №19-38-90136 («Аспиранты») «Теплофизические и гидродинамические процессы при растекании и испарении капель на технологических поверхностях с различной смачиваемостью».

Методология и методы исследования. Для определения геометрических характеристик капель при исследовании процессов смачивания, растекания и испарения на шероховатых и нагретых поверхностях применялась теневая

оптическая система. Текстуры на поверхностях металлов формировались абразивной обработкой при помощи шлифовально-полировального станка. Бесконтактным оптическим методом определена морфология текстурированных поверхностей, геометрия и форма отдельных элементов, образующих многомодальную шероховатость. Микроскопическим методом получены фотоизображения поверхности высокого разрешения. Анализ элементного состава выполнен методом энергодисперсионной спектроскопии.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту:

1. По результатам экспериментальных исследований свойств смачиваемости специальные огнетушащие составы условно разделены на две группы. При тушении пожаров жидкостями первой группы (суспензия бентонита, раствор бишофита) подавление пламени происходит вследствие осаждения твердых частиц и образования огнестойкого слоя в зоне пиролиза ЛГМ, благодаря чему происходит подавление процесса выхода газообразного горючего. Вторая группа жидкостей (эмульсия пенообразователя и раствор ОС-5) за счет низкого поверхностного натяжения (хороших свойств смачиваемости) пропитывает элементы ЛГМ на всю глубину слоя (до зоны пиролиза), охлаждая горючий материал и препятствуя его пиролизу.

2. Установлено, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться значительно (например, в 2 раза при $t = 50$ °С для воды и эмульсии пенообразователя). Показано, что с ростом температуры поверхности нагрева средние времена полного испарения капель исследовавшихся достаточно типичных составов становились сопоставимыми.

3. Экспериментальные исследования показали, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться при нагреве на подложке в 3,7 раза (например, при $T \approx 70$ °С для суспензии бентонита и эмульсии пенообразователя), в

потоке воздуха – в 1,25 раза (при $T \approx 100$ °С для эмульсии пенообразователя и суспензии бентонита), в муфельной печи – в 1,9 раза (при $T \approx 100$ °С для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя) при идентичных схемах и температурах источника нагрева. Эти результаты показывают, что для обеспечения полного испарения капель таких составов в зоне горения лесного массива с различным тепловыделением необходимы разные высоты сброса и, соответственно, отличающиеся длительности прогрева и движения в пламенной зоне горения.

4. Установленные экспериментально характеристики испарения специальных составов (суспензии бентонита, эмульсии пенообразователя, растворов бишофита и ОС-5) на поверхностях элементов лесных горючих материалов могут быть адекватно (с отклонениями ± 15 %) оценены по результатам экспериментов по испарению этих составов по поверхности стали.

5. Доминирующую роль при подавлении процессов термического разложения лесных горючих материалов оказывает не поглощение теплоты в результате испарения воды, а воздействие твердых продуктов (остающихся после испарения воды эмульсий, растворов и суспензий) – компонент специальных составов (бентонита и бишофита) на элементы лесных горючих материалов и соответствующее изменение их теплофизических и термохимических свойств.

6. Экспериментально установлены механизмы формирования кристаллогидратов и объемных кристаллов при испарении капель водно-солевых растворов LiBr, LiCl, CaCl₂ и NaCl на нагретых поверхностях металлов.

7. Установлено, что если после абразивной обработки поверхностей меди М1 и хромоникелетитановой аустенитной стали 12Х18Н10Т величины характеристик шероховатости не превышают значений $Sa \approx 0,14$ мкм, $Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$ мкм, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то их свободная поверхностная энергия за счет полярной составляющей будет увеличиваться, свойства смачиваемости улучшатся. Если же текстура поверхностей меди и стали после абразивной обработки характеризуется величинами, значения которых превышают $Sa \approx 0,14$ мкм, $Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то их свободная поверхностная энергия за счет полярной составляющей будет уменьшаться, свойства смачиваемости ухудшаться.

8. Молекулярно-кинетическая модель Т.Д. Блейка (в рамках которой предполагается, что перемещение контактной линии обусловлено адсорбцией и десорбцией молекул жидкости на твердой поверхности) хорошо описывает основные характеристики процессов растекания капель жидкости по шероховатым поверхностям металлов и сплавов.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей. Случайные ошибки рассчитывались по результатам проведенных несколько раз в идентичных условиях экспериментов. Для этого выполнялось от четырех до шести опытов при фиксированных значениях варьируемых факторов. Также в ряде случаев проводилось сравнение полученных результатов с теоретическими следствиями и экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад автора состоит в планировании и проведении экспериментальных исследований процессов смачивания, растекания и испарения капель жидкостей на поверхностях лесных горючих материалов, металлов и сплавов; проведении опытов; обработке полученных результатов; оценке систематических и случайных погрешностей; анализе и обобщении результатов исследований; формулировке основных защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Международной молодежной научной школе - семинаре «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2016 г.), Всероссийской научной конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2016), IV Международном молодежном форуме интеллектуальные энергосистемы (Томск, 2016), Научно-практической конференции с международным участием XLV «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2016), XXIV Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Томск, 2018), Международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск,

2018, 2019), Седьмой российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018), XV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2018), XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках» (Москва, 2019), 14th International Forum on Strategic Technology (Томск, 2019), XXXV/XXXVI Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2019, 2020), Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2019, 2020).

Публикации. По теме диссертации А.Г. Исламовой опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 4 статьи в зарубежных научных журналах, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) и «Скопус» (Scopus), входящих в первый квартиль (Q1) по SJR; 1 статья в российском научном журнале), 9 статей в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных и научных изданиях, индексируемых Web of Science и/или Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 157 страницах, состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 185 наименований, содержит 13 таблиц и 48 рисунков.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СМАЧИВАНИЯ, РАСТЕКАНИЯ И ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ГЛАДКИХ И ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

1.1 Проблемы тушения лесных пожаров

Проблема лесных пожаров по оценкам специалистов (например, [1,2,16,17]) остается чрезвычайно актуальной многие последние десятилетия, несмотря на достаточно большое внимание к созданию систем и средств пожаротушения во многих развитых государствах [3,4,18]. Примеры практически ежегодных крупных лесных пожаров на территории штата Калифорния (США), наносящих огромный ущерб экономике штата и часто приводящих к человеческим жертвам, показывают, что даже такое, безусловно, развитое в научно-техническом и технологическом плане государство как США не может эффективно решить проблему лесных пожаров даже на малой части своей территории. Такое состояние дел характерно для всех без исключения государств, имеющих лесопокрытые территории больших площадей. Например, в Европе угрозе лесных пожаров в основном подвержены шесть стран: Испания, Италия, Греция, Кипр, Португалия и Франция.

В Российской Федерации ежегодно регистрируются многие сотни лесных пожаров на площадях тысячи гектаров [2,16,19]. О подавлении последнего очага горения леса становится известным, как правило, в августе-сентябре (в этот период начинаются интенсивные сезонные дожди).

Низкая эффективность борьбы с лесными пожарами на всех населенных континентах Земли обусловлена многими объективными и субъективными причинами, но одной из основных, скорее всего, является недостаточное понимание физики и химии процессов, протекающих при горении лесов и их тушении с использованием воды и специальных составов (растворов, эмульсий, суспензий) на основе воды [4,5]. Эффективность использования последних в большинстве случаев объективно обоснована (например, [3,5]), но пока нет

полной ясности в механизмах процессов подавления горения лесных горючих материалов специальными составами. Так, например, нет определенности в том, влияют ли специальные добавки к воде на химические процессы, протекающие при горении лесного горючего материала (другими словами играют ли специальные добавки роль антипиренов) или основной эффект влияния специальных растворов, эмульсий, суспензий заключается в интенсификации физических процессов, протекающих при взаимодействии таких флегматизаторов горения с одиночными элементами ЛГМ (хвоинками, веточками, листочками) – смачивание и испарение жидкости при взаимодействии с нагретым до высоких (выше температур начала термического разложения) температур лесным горючим материалом.

Технологии тушения крупных пожаров развиваются в направлении обеспечения возможности одновременной интенсификации разных механизмов локализации и подавления процессов горения и термического разложения ЛГМ [20] (снижение температуры в зоне горения и пиролиза; вытеснение окислителя из зоны горения; блокирование смешения продуктов пиролиза и горения с окислителем). Проведенные ранее экспериментальные и теоретические исследования [5,21,22] показали, что наиболее масштабное влияние на характеристики подавления горения оказывает эндотермический фазовый переход – испарение огнетушащих составов вследствие высокой теплоты парообразования (в частности, на основе воды – около 2 МДж/кг). При сопоставлении влияния фактора стока тепла за счет высокой теплоемкости и расходования энергии на парообразование обосновано [5], что целесообразно распылять составы в пламенной зоне горения, т.е. недостаточно вводить в эту зону жидкость в виде больших монолитных объемов. В этом случае фактор варьирования объема жидкости слабо влияет на характеристики горения очага, важно интенсифицировать ее испарение. В последние годы опубликовано достаточно много статей с результатами экспериментов по подавлению пиролиза и горения веществ и материалов различными по дисперсному (например, [23]) и компонентному (в частности, [24]) составу аэрозольными потоками. При

объяснении результатов таких исследований достаточно часто формулируются выводы о том, что достоверно определить значения скоростей испарения капель достаточно сложно, особенно в условиях высоких температур (до 300 °С) нагрева и при существенно неоднородном компонентном составе, т.е. при использовании специальных суспензий, эмульсий и растворов.

Авиационные методы локализации и тушения крупных лесных пожаров активно развиваются [25], так как использующиеся пока наземные технологии тушения и локализации имеют специфические ограничения, связанные с тем, что скорости распространения фронтов пламенного горения и термического разложения достаточно высоки [26], и без применения авиации небезопасно (работа отрядов пожарных в непосредственной близости к зоне горения [27]). При использовании авиации с целью тушения лесных пожаров жидкость поступает в зону горения в виде капельного потока. Опубликованы результаты [23,27–30] исследований трансформации массива жидкости (при его авиационном сбросе) в капельный поток (изучено влияние высоты сброса и объема массива жидкости на размер образующихся фрагментов и площадь покрытия). Однако не показано влияние физических свойств жидкости (поверхностного натяжения, вязкости, плотности) на результаты взаимодействия образующихся капель с лесным горючим материалом. Поэтому важным является изучение процессов (смачивание, растекание и испарение), происходящих при взаимодействии единичной капли специального огнетушащего состава с твердой поверхностью элемента лесного горючего материала (хвоинки, листа, веточки). Но эксперименты с лесными горючими материалами очень сложны. Для их проведения необходимы сложные системы регистрации основных характеристик процесса. Поэтому целесообразна также оценка возможности анализа основных (представляющих на практике большое значение) характеристик процессов смачивания, растекания и испарения специальных составов по результатам экспериментов в существенно менее сложных условиях – на поверхностях металлов или сплавов (гладких или шероховатых).

1.2 Смачивание и растекание капель жидкостей на поверхности элементов лесных горючих материалах

Вода, несмотря на её достоинства, как основное средство тушения лесных пожаров, обладает существенным недостатком – низкой смачивающей способностью по отношению к лесным горючим материалам (определяющейся её высоким поверхностным натяжением [25]). Для снижения поверхностного натяжения и увеличения смачивающей способности воды в неё вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ) [31–35], усиливающие в конечном итоге огнетушащее действие (за счет обволакивания элементов ЛГМ). В результате снижается время тушения лесных (и торфяных) пожаров [32]. К настоящему времени растекание смачивающих растворов ПАВ на неорганических поверхностях достаточно хорошо исследовано [36–39]. Но, установлено, что процессы смачивания поверхностей растений (например, листьев гинкго [40], древесины [41] и пшеницы [37]) намного сложнее чем процессы смачивания неорганических поверхностей (например, металлов).

Ранее [33] изучена возможность установления зависимости времени смачивания лесных горючих материалов от величины поверхностного натяжения растворов, содержащих ПАВ. В ходе лабораторных исследований установлены поверхностные натяжения пенообразователей различных типов в зависимости от их концентрации. Также в [33] приведены результаты измерения времени и массовой скорости смачивания образцов четырёх видов ЛГМ – зелёного мха, лишайника, лесной подстилки и торфа растворами разной концентрации. Показано, что при определённой концентрации ПАВ поверхностное натяжение перестаёт снижаться, в то время как скорость смачивания продолжает увеличиваться. Отмечено [33], что различные виды ЛГМ смачиваются с разной скоростью. Анализ результатов [33] показал, что при одинаковом поверхностном натяжении у растворов различных ПАВ время смачивания ЛГМ одного вида может отличаться в десять раз и более. Также исследовано [34] влияние поверхностно-активных веществ на смачивание путем наложения индукционных

зарядов на капли раствора ПАВ L-77, пестицида ЕС и раствора L-77+ЕС. Проводимость и поляризуемость этих составов увеличивалась с ростом концентраций, тогда как поверхностное натяжение (γ) уменьшалось с их увеличением, что в конечном итоге приводило к снижению статического контактного угла (θ) на гидрофобных поверхностях листьев *Brassica campestris* [34]. Снижение значений γ и θ повысило смачиваемую площадь капель составов L-77, ЕС и L-77 + ЕС, которая при росте концентрации L-77 + ЕС увеличивалась с 9,26 мм² при $\theta = 65,29^\circ$ (при объемной концентрации L-77 – 2,5 мл/л и ЕС – 7,5 мл/л) до 13,29 мм² при значении $\theta = 43,1^\circ$ (L-77 – 10 мл/л и ЕС – 15 мл/л).

Установлена [42] экспоненциальная зависимость θ от размера зерна абразивной бумаги, использованной для обработки дерева, с тремя характерными областями: 1) уменьшение статического контактного угла в связи с увеличением адгезии поверхности; 2) достижение минимальной величины этого угла; 3) незначительное увеличение θ . Изучено влияние кислотности древесины четырех североамериканских пород на работу адгезии и смачиваемость [43]. Установлено, что при смачивании водой контактные углы варьировались от 60° для ели Ситка и до 74° для дугласовой пихты. Также исследовано растекание капель воды по термически модифицированной древесине (тополь Симона и сосна обыкновенная) [44]. Показано, что при термической обработке смачиваемость образцов ухудшается.

Исследовано влияние смачиваемости огнезащитными растворами (Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), DSHP (Na_2HPO_4), ДАНП ($(\text{NH}_2)_4\text{HPO}_4$) и DW) на огнестойкость сосны и тополя [41]. Наилучшая огнестойкость достигнута у тополя. Показано, что высокая концентрация огнезащитных растворов приводит к значительным различиям в углах смачивания (от 50° до 80°). Установлено [41], что после распила и строгания поверхности тополя ее шероховатость при высокой концентрации огнезащитных растворов оказывает сильное влияние на смачиваемость.

Опубликованы результаты лабораторных и полевых испытаний новых смачивающих составов (W-50, W-52, W-56, W-10, W-11 и W-32) для тушения

лесных пожаров [45]. Эти составы представляют собой смеси анионных и неионных поверхностно-активных веществ, органических растворителей и гидротропных агентов. Установлено, что проникновение 1 % раствора W-50 через слой рыхлой гниющей древесины происходило в 68 раз быстрее, чем воды. Капли воды поглощались в 40 раз медленнее по сравнению с растворами смачивающих составов. Выбранные по результатам лабораторных экспериментов составы с лучшими смачивающими свойствами исследованы в полевых условиях с целью анализа их способности создавать противопожарные барьеры и эффективности в борьбе с низовыми пожарами. Установлено, что состав W-52 препятствуют восстановлению пламенного горения ЛГМ в три раза более длительный период времени, чем вода [45].

Проведены исследования сорбционной способности и смачиваемости торфа (рыхлого и прессованного) [32]. Установлено, что неионные и анионные поверхностно-активные вещества проявляют различные свойства пенообразования и увлажнения торфа. Из анализа предварительных результатов выбраны поверхностно-активные компоненты для получения композиции смачивающего агента. Испытаны характеристики смачиваемости и адсорбции, а также проведена оценка пенообразующей способности [32]. Эффективность смачивающего раствора, полученного таким образом, подтверждена в лаборатории и при тушении пожаров [32].

Установлено [46], что наиболее эффективным процессом при тушении лесных пожаров является поступление жидкости в зону интенсивного термического разложения ЛГМ, которая, как правило, расположена на глубине 10–15 мм от поверхности раздела «ЛГМ–горячий воздух». В этом случае подавляется процесс пиролиза горючих материалов и прекращается поступление горючего (газов CH_4 , CO , C_2H_6 и т.д.) в зону интенсивного химического реагирования последнего с воздухом и горение прекращается. Кроме того, образующиеся при испарении движущихся вглубь ЛГМ капель водяные пары охлаждают элементы структуры ЛГМ, прошедшие начальные стадии термического разложения. В результате снижения температуры этих элементов

падает тепловой поток в зону пиролиза, что способствует подавлению последнего.

Исследовано тушение модельного источника огня аэрозольным облаком водного раствора феррицианида калия $K_3[Fe(CN)_6]$ [47]. Установлено, что кратковременное воздействие аэрозольного облака на фронт пламени поверхностного лесного пожара приводит к подавлению газофазного горения, а в случае модельного источника огня класса А (горение древесины) к полному его исчезновению. Показано [47], что при тушении пожара аэрозолем водного раствора объемный расход этого огнегасящего вещества был в 30 раз ниже стандартного расхода чистой воды за счет покрытия поверхности горения выпаренной солью (степень выгорания модельного источника огня при тушении водой не менее 80 %, раствором $K_3[Fe(CN)_6] \approx 50$ %). Предложено [48] использовать в качестве антипирена 40 % водный раствор $CuCl_2$. Установлено, что длительность тушения очага возгорания (пожар класса В1) аэрозолем раствора дигидрата хлорида меди составила 0,6 с, что в 26 раз эффективнее, чем тушение водным аэрозолем.

Но все специальные материалы, использующиеся при подготовке растворов, эмульсий и суспензий (например, бишофит, бентонит и др.) для подавления процессов горения ЛГМ или локализации лесных пожаров, как правило, дорогостоящие. Например, стоимость 1 кг бентонита (порошок) составляет около 1 \$. Поэтому при использовании таких специальных материалов возникает проблема адекватной оценки затрат на реализацию технологий подавления горения ЛГМ с их применением и эффективности этих технологий. Провести такие оценки только по результатам полевых исследований сложно, т.к. условия проведения последних не всегда можно жестко контролировать (могут изменяться скорости направления ветра, влажность ЛГМ зависит от большой группы факторов, и другие причины). Поэтому необходимо понимание механизмов влияния добавок специальных материалов к воде на эффективность подавления горения или локализации пожара. Для полного же описания механизмов подавления процессов горения и термического разложения ЛГМ необходима

информация о процессах взаимодействия капель специальных огнетушащих составов с элементами структуры ЛГМ (хвоинками, листьями, веточками). Пока характеристики процессов смачивания, растекания и испарения воды и специальных огнетушащих составов на поверхностях типичных элементов структуры лесных горючих материалов не опубликованы.

1.3 Испарение капель однокомпонентных жидкостей и солевых растворов

Экспериментальные и численные исследования процесса испарения капель однокомпонентных жидкостей выполнялись, в основном, с целью выделения режимов испарения в зависимости от изменения таких параметров как контактный угол θ , диаметр d , скорость испарения $\frac{dm}{d\tau}$ [49-62].

При испарении капли толуола [49] выделено два режима. Первый характеризуется квазистационарным фазовым переходом и определяется диффузией паров. Его продолжительность составляет 80 % от общей длительности процесса. Оставшихся 20 % приходится на второй режим, который сопровождается депиннингом контактной линии и разделен на два этапа по уменьшению скорости испарения.

Установлено [50], что капли метилового эфира и ацетуксусной кислоты на фторопластовой подложке могут испаряться в одном из трех режимов. Первый характеризуется уменьшением контактного угла при постоянном контактном диаметре. Аналогичные результаты получены при испарении капли воды на медной подложке [51], алюминиевой [52], оргстекле [53], стекле [54], стекле и поликарбонате [55], а также этанола на полиметилметакрилате [53]. Второй режим характеризуется уменьшением d и $\theta = \text{const}$. Подобный режим выделен и при испарении на поверхности политетрафторэтилена капель н-бутанола и толуола [56], н-нонана и н-октана [57], воды [53,56,57]. Третий (“смешанный”) режим [50] характеризуется уменьшением контактного диаметра совместно с увеличением контактного угла или одновременным уменьшением обеих величин.

Выделены два последовательных режима при испарении капли воды на политетрафторэтиленовой подложке [58] и на поверхностях с самоорганизующимися монослоями [59]. В первом $d = \text{const}$, θ уменьшается до некоторого постоянного значения. При этом происходит переход во второй режим в котором $\theta = \text{const}$ и капля уменьшается в размерах.

Капля воды на кремниевой структурированной поверхности с покрытием на основе силана испаряется в четырех последовательных режимах [60]. Первый характеризуется насыщением атмосферы в окрестности микрорегиона капли водными парами, второй постоянным контактным диаметром, третий перемещением линии трехфазного контакта, четвертый уменьшением контактного диаметра совместно с увеличением контактного угла.

Выделены [61] четыре последовательных режима испарения капель воды и н-декана на подложках из полиэтилена, эпоксидной смолы и политетрафторэтилена. В первом контактный радиус (r) постоянен, уменьшаются высота (h) и контактный угол. Во втором увеличивается скорость испарения. Третий обнаружен только на гладких поверхностях и характеризуется постоянным диаметром и изменением контактного угла. В четвертом r , h и θ близки нулю.

В ряде случаев [50,53,56,57] начало испарения сопровождается уменьшением контактного диаметра и высоты капли при постоянном значении контактного угла. Не установлены причины последнего, так как на параметры, характеризующие растекание, влияет большое число факторов (степень шероховатости, форма микроструктуры, температура и материал поверхности, состав жидкости, давление и температура окружающей среды).

Режимы изменения формы капли, не содержащей растворенные частицы в условиях испарения, как правило, выделяют по изменению контактного диаметра, контактного угла, скорости испарения. Показано [62] что для однокомпонентных жидкостей наиболее целесообразно выделить режимы по изменению контактного диаметра и угла.

Результатов экспериментальных и численных исследований процесса испарения капель водных солевых растворов опубликовано мало [63–65].

Последнее обусловлено недостатком данных по физико-химическим свойствам водных солевых растворов. Также сложно учитывать кинетику кристаллизации в условиях ограниченного объёма, неоднородного поля температур и концентраций на поверхности капли, особенно вблизи контактной линии.

Выделены [63] два режима испарения капель, содержащих растворённые вещества. Первый характеризуется испарением только растворителя, уменьшением площади поверхности капли. Во втором по поверхности капли образуется твёрдая фаза растворённого вещества.

Экспериментально исследовалось [65] испарение висящих капель водных растворов солей. Выделено два режима испарения [65] по месту образования солей. В первом на поверхности капли образуются кристаллы либо кристаллогидраты с последующим их ростом. Установлено, что при изменении объёма капель, начальной концентрации раствора, расхода и температуры воздуха, обдувающего каплю, место образования кристаллов (кристаллогидратов) неизменно – нижняя вершина висящей капли [65]. Начало второго режима характеризуется образованием сплошной оболочки. Последующая “эволюция” геометрической формы капли зависит от внешних условий.

Установлено [65], что при испарении капель солей наиболее типично образование полый тонкой оболочки сферической формы. Внешняя поверхность последней обычно гладкая, внутренняя – шероховатая и неровная. Выявлено, что внутреннее ядро может содержать крупные кристаллы (кристаллогидраты).

1.4 Исследование процессов смачивания и растекания жидкостей на твёрдых поверхностях

Основой технологий спрейного охлаждения, пайки струёй припоя, спрейного нанесения покрытий, синтеза ДНК, тушения лесных пожаров (обработка сельскохозяйственных культур), являются процессы растекания и испарения капель [41,45,66–69]. Известно [68–71], что технологии капельного охлаждения эффективнее пленочного или ручейкового (ривулетного). Последнее обусловлено

большей площадью поверхности испарения капли по сравнению с пленкой той же массы и поверхности смачивания, связанной с искривлением межфазной границы. Малое расстояние между каплями обеспечивает интенсивный отвод теплоты, но существует вероятность слияния их в пленку жидкости. Большое расстояние (значительно больше диаметра капель) приводит к перегреву локальных участков охлаждаемой поверхности и возникновению термических напряжений. Контролировать расположение капель можно посредством изменения шероховатости, структуры и химического состава поверхности [72–74].

Количественной характеристикой смачивания молекулярно-гладких поверхностей (определяемой по уравнению Юнга [75]) является равновесный контактный угол. Последний зависит от поверхностных натяжений между твердым телом и газом (γ_{sg}), твердым телом и жидкостью (γ_{sl}), жидкостью и газом (γ_{lg}). Технологические поверхности характеризуются шероховатостью, на них контактный угол отклоняется от равновесного на величину гистерезиса контактного угла (ГКУ) [76]. Последний определяется как разница между динамическими контактными углами натекания и оттекания, измеренными, соответственно, в условиях зацепления (пиннинга) контактной линии (КЛ) при натекании и оттекании фронта жидкости на поверхности:

$$\Delta\theta = \theta_{0A} - \theta_{0R} \quad (1.1)$$

где θ_{0A} и θ_{0R} – динамические углы натекания и оттекания в условиях пиннинга контактной линии, соответственно.

Известно [76], что статический контактный угол (θ_s), образованный каплей и поверхностью, находится в диапазоне между θ_{0A} и θ_{0R} .

В условиях растекания капли по шероховатым поверхностям металлов влияние скорости перемещения контактной линии (u) на динамические контактные углы (ДКУ) и гистерезис не изучено даже на уровне прогностических оценок. Но известно [76], что при скоростях движения КЛ, не превышающих нескольких мкм/с, углы натекания и оттекания будут близки или равны статическому. Установлено [77], что ДКУ натекания на супергидрофобных поверхностях не зависит от скорости перемещения КЛ, а оттекания снижается с

ростом u . В системе «жидкость – гладкая поверхность тефлона» [77] ГКУ не зависит от скорости перемещения контактной линии (до 0,2 мм/с) при растекании маловязких жидкостей (динамическая вязкость меньше 0,01 Па·с).

Известны математические модели [78–81], описывающие связи между динамическими контактными углами и скоростью перемещения контактной линии. Одной из них является молекулярно-кинетическая модель растекания (МКМ) [78,79], основные положения которой базируются на кинетике молекулярных процессов, происходящих на линии трехфазного контакта [78]. Учитывается диссипация энергии вблизи КЛ, движение которой происходит за счет перемещения молекул на среднее расстояние λ от одного участка адсорбции до другого с частотой k^0 :

$$u = 2k^0 \lambda \sinh \left(\frac{\gamma \lambda^2 (\cos \theta - \cos \theta_d)}{2k_B T} \right) \quad (1.2)$$

где k^0 – равновесная частота случайных молекулярных перемещений, происходящих на контактной линии, Гц; λ – среднее расстояние между соседними участками адсорбции молекул жидкости, м; θ_d – динамический контактный угол, °; θ – равновесный контактный угол, °; γ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; k_B – постоянная Больцмана; T – температура (К).

Если динамические контактные углы близки к равновесным θ , уравнение МКМ упрощается до линейного вида [79]:

$$u = \frac{\gamma}{\xi} (\cos \theta - \cos \theta_d), \quad (1.3)$$

В основе гидродинамической модели [80,81] лежит положение о том, что движению контактной линии препятствуют силы вязкостного трения в объеме жидкости. Поток жидкости в окрестности линии трехфазного контакта приводит к искривлению межфазной поверхности «жидкость/пар». Поэтому динамический контактный угол отклоняется от равновесного значения θ_0 и может быть определен как [81]:

$$\theta_D^3 = \theta_0^3 \pm (9\mu u / \gamma) \ln(L / L_m) \quad (1.4)$$

где θ_0 – равновесный или статический контактный угол, L – капиллярная длина, L_m – длина скольжения.

В уравнении (1.4) знак плюс соответствует наступающей КЛ, минус – отступающей. Капиллярная длина определяется из соотношения [82]:

$$L = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho g}}$$

Длина скольжения L_m для однокомпонентных жидкостей определяется аппроксимацией экспериментальных результатов зависимостью (1.4) и имеет порядок длины свободного пробега молекулы [83].

Установлено [84], что уравнение (1.4) применимо в условиях формирования контактного угла не более 150° . При малых же капиллярных числах ($Ca < 10^{-4}$) и больших ($Ca > 0,1$) расхождения в значениях, полученных по уравнению (1.4), с экспериментальными данными достигают 70 %.

Несмотря на принципиальные различия в описании механизма растекания и аппарата прогнозирования, зависимости молекулярно-кинетической (1.3) и гидродинамической теорий (1.4) описывают динамический контактный угол с достаточно малыми отклонениями от экспериментальных данных.

Параметры λ , k^0 , ξ и L_m в уравнениях (1.2), (1.3) и 1.4) определяются путем аппроксимации экспериментальных данных. Установлено [85], что модель (1.2) удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости ДКУ от u в условиях растекания капель воды и водных растворов на поверхностях полимеров. Однако ее применимость для шероховатых поверхностей металлов не установлена.

1.5 Смачивание и растекание капель на шероховатых абразивно-обработанных поверхностях

Известны результаты экспериментальных исследований [86–89] растекания и свойств смачивания поверхностей молекулярно-гладких [86,89] и с упорядоченной текстурой [87,88]. Меньшее количество работ посвящено изучению вышеуказанных процессов на технологических («инженерных») [90,91] поверхностях металлов с хаотично расположенными элементами (впадинами и выступами) [14,90]. Это связано с трудностями математического описания текстуры шероховатых поверхностей с хаотичным расположением элементов, в частности, при выборе характеристик шероховатости из набора известных стандартов (ГОСТ 2.309-73, ISO 468: 1982, ISO 13565-2:1997, ISO 25178-2:2012).

На первых этапах анализа шероховатости, как правило, используется одна характеристика R_a [92,93] (характеризует среднее арифметическое отклонение профиля) или R_z [42] – максимальная высота элемента (неровностей). В [94] шероховатость поверхности полимерных материалов после обработки абразивной бумагой с размером зерна S1000, S180 и S80 аппроксимирована двумерной характеристикой среднего арифметического отклонения профиля (R_a). Установлено [94], что абразивная обработка поверхности слабо влияет на смачиваемость и адгезионные свойства полимеров. Но обработка таким методом материалов с высокой поверхностной энергией (например, металлов) значительно изменяет их свойства смачивания [95].

Известны результаты [91] использования характеристик R_{mr} и R_{lo} (R_{mr} – удельная опорная длина профиля, R_{lo} – длина растянутого профиля) для модификации уравнений Венцеля [96] и Касси [97], а также для определения статического контактного угла на шероховатых алюминиевых поверхностях. По результатам анализа двумерных характеристик R_a и R_{mr} (отношение материалов профиля) в условиях однонаправленной обработки абразивным потоком воды поверхностей стали (SS316L) и титана (Ti-6Al-4V) проведена оценка [98] влияния числа циклов обработки (от трех до девяти) и давления потока (от 40 до 60 бар) на

шероховатость. Показано [98], что свойства смачивания и поверхностная энергия поверхностей стали и титана зависят от шероховатости и её топографии. Например, шероховатость поверхности стали SS316L после девяти циклов абразивной обработки потоком воды при давлении 60 бар уменьшилась с 350 нм до 114 нм, свойства смачиваемости улучшились (контактные углы уменьшились с $103,6^\circ$ до $89,5^\circ$) [98].

По результатам анализа [94,99–101] установлено, что абразивная обработка изменяет текстуру приповерхностного слоя металлов и их сплавов, а также их поверхностную энергию и свойства смачиваемости. Для характеристики текстуры наиболее часто используются профильные двумерные характеристики (R_a [94,98], R_{mr} [98,102], K_r [102]). Такая оценка шероховатости поверхности сопряжена с возможными ошибками, обусловленными тем, что двумерные характеристики шероховатости основаны на вычислении статистик профиля поверхности относительно средней линии, принимаемой в пределах базовой длины [103]. Особо грубые ошибки в определении шероховатости поверхности, например, средним арифметическим отклонением профиля (R_a), возникают при характеристике упорядоченных текстур в виде совокупности элементов текстуры правильной геометрической формы (например, кратеров, параллелепипедов). Характеристика среднего арифметического отклонения профиля чувствительна к появлению пиков и впадин, неустойчива и характеризуется большим разбросом, плохо подходит для оценки шероховатости поверхности [103]. Решением этой проблемы является использование группы трехмерных характеристик шероховатости из набора, предложенных в [102,104]. Однако таких исследований недостаточно для разработки прогностической модели оценки изменения текстуры, поверхностной энергии и свойств смачиваемости поверхностей металлов после абразивной обработки. Известно только [98,102], что трехмерные характеристики шероховатости оценивают «энергетические барьеры» (высота пиков и расстояние между ними), которые преодолевает жидкость при смачивании и растекании.

Анализ результатов [42,92,93,105] дает основания для вывода, что увеличение шероховатости поверхности может как уменьшать статический контактный угол [42,93], так и увеличивать его [92,105]. Зарегистрировано [93] уменьшение θ_s и снижение повторяемости его измерения с увеличением шероховатости, сформированной абразивной бумагой № 600, 1500 и 2000, на гладких поверхностях титана, алюминия и меди. Полученную закономерность авторы [93] объяснили состоянием капли, описываемым уравнением Венцеля [96]. Рост шероховатости стеклоуглерода [105], обработанного абразивной бумагой (номера 1200, 800 и 400), привел к ухудшению смачиваемости (статический угол изменился от $62,11^\circ$ до $92,32^\circ$). Последнее не согласуется с уравнениями Венцеля [96] и Касси-Бакстера [97], из которых следует, что рост шероховатости на гидрофильной поверхности способствует проявлению на ней еще более гидрофильных свойств и наоборот. Такое же расхождение с теоретическими следствиями установлено при обработке поверхностей алюминия и нержавеющей стали [92]. Кроме того, установлено [92], что текстуры, полученные двумя разными способами (абразивной обработкой и травлением) с одинаковым R_a , демонстрируют разные углы смачивания. Сделано предположение о том [92], что помимо изменения химического состава после обработки, образованная травлением иерархическая текстура влияет на изменение угла в большей степени (микро-нано- неровности уменьшают свободную энергию межфазной поверхности из-за снижения площади контакта “жидкость-твердое тело”). Установлено [106], что помимо шероховатости, θ_s существенно зависит от состояния капли на поверхности (заполнение неровностей воздухом – состояние Касси-Бакстера или жидкостью – Венцеля) и способа ее очистки после абразивной обработки.

Выводы по первой главе

1. Для полного описания механизмов подавления процессов горения и термического разложения ЛГМ необходимы экспериментальные данные о

процессах взаимодействия капель специальных огнетушащих составов с элементами структуры ЛГМ (хвоинками, листьями, веточками). Пока характеристики процессов смачивания, растекания и испарения воды и специальных огнетушащих составов на поверхностях типичных элементов структуры лесных горючих материалов не опубликованы.

2. Крайне мало данных по режимам испарения капель и изменению контактного угла водных растворов солей CaCl_2 , LiBr и LiCl . Эти соли широко применяются в различных технологиях, в том числе в химической промышленности, например, при изготовлении целлюлозы, когда реализуется быстрый рост кристаллогидратов в высокотемпературном растворе. Практически отсутствуют данные по кристаллизации капель при высоких температурах и высоких тепловых потоках.

3. По результатам анализа [94,99–101] установлено, что абразивная обработка изменяет текстуру приповерхностного слоя металлов и их сплавов, а также их поверхностную энергию и свойства смачивания. Для характеристики текстур наиболее часто используются профильные двумерные характеристики (R_a [94,98], R_{mr} [98,102]).

4. Опубликованных работ недостаточно для разработки прогностической модели для оценки изменения текстуры, поверхностной энергии и свойств смачиваемости поверхностей металлов после абразивной обработки. Известно только [98,102], что трехмерные характеристики шероховатости оценивают «энергетические барьеры» (высота пиков и расстояние между ними), которые преодолевает жидкость при смачивании и растекании.

5. Не установлена возможность применения молекулярно-кинетической и гидродинамической моделей к описанию зависимостей динамических углов от скорости перемещения контактной линии по поверхностям с хаотично расположенными элементами текстуры.

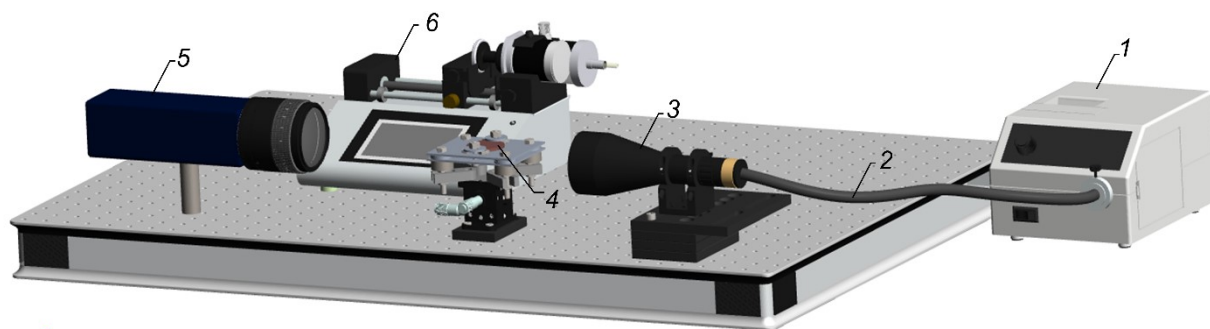
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Планирование экспериментальных исследований смачивания, растекания и испарения капель жидкости по поверхностям с различной шероховатостью (поверхностях лесных горючих материалов и металлов) проводилось после выделения факторов, определяющих процессы, происходящие на линии трехфазного контакта «жидкость-газ-твердое тело». В случае металлов это характеристики микротекстуры твердой поверхности (оценка шероховатости проведена на базе трехмерных характеристик шероховатости). В общем случае – объем капли, скорости натекания и оттекаания жидкости.

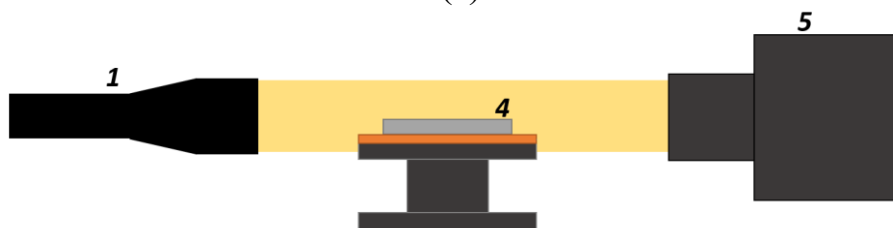
2.1 Определение свойств смачивания и характеристик процесса растекания малых объемов жидкости

Определение свойств смачиваемости и характеристик процесса растекания по поверхностям лесных горючих материалов, металлов и сплава с текстурой, образованной абразивной обработкой, проведены на установке (рис. 2.1) с использованием оборудования оптического теневого метода [104]. Суть последнего заключается в определении геометрических характеристик (контактного угла (θ), контактного диаметра (d), высоты (h), объема (V)) по ее теневым изображениям, обработанных методами гониометрии.

В оптической теневой системе свет от источника 1 (MI-150 Edmund Optics, США) проходил через стекловолоконный оптический кабель 2 (Dolan-Jenner, США), попадал в телецентрическую трубу 3 (Edmund Optics, США), где преобразовывался из рассеянного в плоскопараллельный свет. Последний освещал каплю, расположенную на исследуемом образце 4 (элемент ЛГМ, металлическая подложка). Теневое фотоизображение капли получено с помощью высокоскоростной видеокамеры 5 FastVideo 500M (FastVideo, Россия) и макрообъектива Sigma 105 mm f/2.8G IF-ED AF-S 9.



(a)



(б)

Рисунок 2.1 – Установка для определения свойств смачиваемости и характеристик процесса растекания малых объемов жидкости. 1 – источник света; 2 – стекловолоконный кабель; 3 – телецентрическая труба; 4 – образец; 5 – высокоскоростная камера; 6 – электронный шприцевой насос.

Смачиваемость поверхностей характеризовалась статическим контактным углом, который измерялся в условиях дозирования капли жидкости на образец 4 в произвольно выбранную точку электронным одноканальным дозатором Ленпипет Степпер (Thermo Scientific). Последний поверен на фирме-изготовителе. Установлено, что систематическая составляющая относительной погрешности дозатора и среднеквадратичное отклонение случайной составляющей погрешности не превышают 3 %. Установка изолировалась от возможного влияния внешних неконтролируемых факторов (колебания температуры и скорости движения воздуха в помещении лаборатории) прозрачным боксом, изготовленным из полимерного стекла толщиной 3 мм. Последнее обеспечивало постоянство условий теплообмена с внешней средой. Статические контактные углы в равновесном состоянии измерялись через 20 с после дозирования, согласно рекомендациям [102]. Исследование растекания капли проводилось при реализации вынужденного нагнетания и откачки жидкости на подложку системой, состоящей из высокоточного электронного шприцевого насоса Cole Parmer EW-

74905-04 6 (Cole Parmer, USA) и силиконовой трубки диаметром 2 мм, соединяющей насос с отверстием диаметром 0,3 мм в центре подложки 4 (Рис. 2.1). Теневые изображения капель обрабатывались методами гониометрии «Тангенциальный 1» [107,108] при определении динамических и «Юнга-Лапласа» [109–111] статических контактных углов.

В методах гониометрии измерение контактного угла основано на обработке двумерного изображения капель. Методы гониометрии условно делятся на две группы: 1) аналитической обработки изображений; 2) непосредственной обработки изображений. Методы аналитической обработки изображений имеют ограничения по форме капли: не позволяют достоверно измерить угол смачивания ассиметричной капли, требуют для своего применения знание физических свойств жидкости (например, поверхностное натяжение). В методах непосредственной обработки изображений такие недостатки отсутствуют.

К аналитическим методам обработки изображению относится метод ADSA (также известный как метод Юнга-Лапласа), разработанный Ротенбергом [109], а затем усовершенствованный Спелледом [110] и Ченгом [111]. Суть метода заключается в определении профиля капли по уравнению Лапласа. Метод позволяет определить угол смачивания, контактный диаметр, высоту и объем капли, площадь поверхности раздела фаз “жидкость-окружающая среда”.

К методам непосредственной обработки изображений относится метод Тангенциальный 1, который базируется на анализе функции, описывающей окружность [107,108]. Недостатком метода является большая погрешность при определении геометрических размеров относительно больших капель (объемом более 100 мкл).

2.2 Методика исследования процессов испарения капель жидкости

Исследования испарения капель жидкости, также как и при определении свойств смачивания и характеристик процесса растекания (п. 2.1), проводились на экспериментальной установке (рис. 2.2) с использованием теневого метода [112].

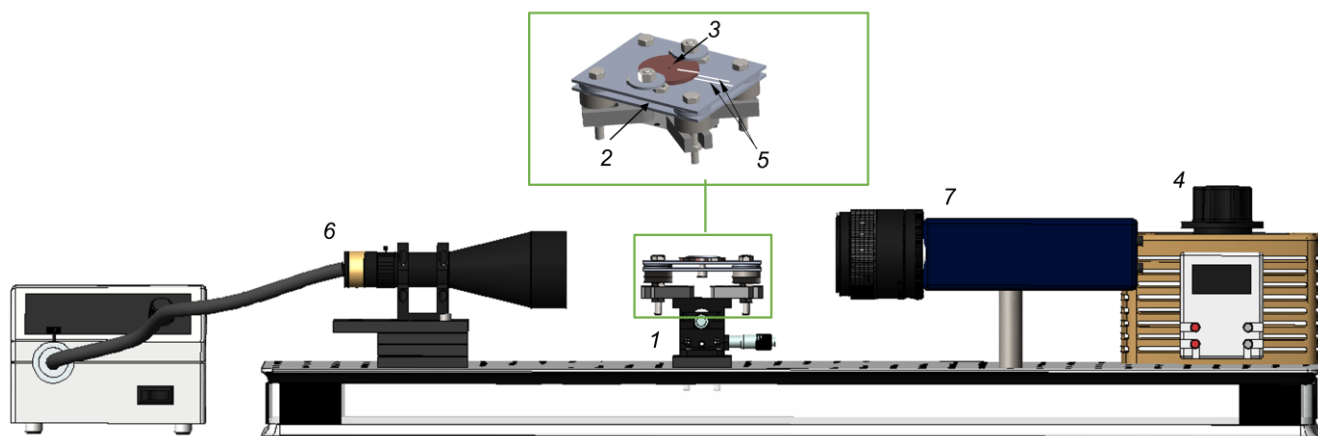


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка: 1 – гониометр; 2 – силиконовый нагреватель; 3 – подложка; 4 – лабораторный автотрансформатор; 5 – термопары; 6 – источник света.

Отличия от установки (рис. 2.1) состояли в следующем: рабочий участок состоял из гониометра GNL18/M (THORLABS) 1, силиконового нагревателя 2, расположенной на нем подложки 3 диаметром 50 мм и толщиной 3 мм. Силиконовый нагреватель соединен с источником питания 4 (лабораторным автотрансформатором SUNTEK). Температура поверхности подложки (t_n) регистрировалась термопарами типа К (Omega 5TC-TT-K-40-72) 5 установленными под подложкой и на ее поверхности (с погрешностью измерений $\pm 0,1$ °C). Перепад (t_n) не превышал 0,1 °C по продольному координатному направлению. Гониометр 1 предназначен для выравнивания поверхности в двух плоскостях.

Капля «сажалась» на заранее разогретую поверхность подложки в произвольно выбранную точку электронным одноканальным дозатором Ленпипет Степпер Thermo Scientific.

2.3. Исследование испарение капель солевых растворов на поверхности сплава Амгб

При исследовании процесса испарения капель водных растворов солей в качестве исследуемых жидкостей выбраны растворы LiBr, CaCl₂ и NaCl.

Материал поверхности (сплав АМгб) выбран в связи с высокой коррозионной активностью солевых растворов. Последние широко используются в химической промышленности (получении пищевой соды, хлора, удобрений, различных кислот) и энергетической отрасли (адсорбционные тепловые насосы, холодильная техника и т.д.). Как правило, в основе таких технологий лежат процессы испарения и конденсации как большой массы сырья, так тонких пленок и капель. Проведен полный факторный эксперимент, факторы приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Факторы

Материал	–	Алюминиево-магниевый сплав АМгб ГОСТ 21488-97
Температура поверхности	°С	80
Объем	мкл	10, 20, 30, 40, 50, 60
Жидкость	–	Дистиллированная вода, водные растворы солей LiBr (10, 30 %), CaCl ₂ (10 %), LiCl (10 %), NaCl (10 %)

2.4. Методика изучения смачивания и испарения специальных огнетушащих составов

Эксперименты по изучению смачивания и испарения лежащих капель огнетушащих составов с поверхностей лесного горючего материала и металлов, проведены с использованием оборудования теневого метода (п. 2.1-2.2). При исследовании процессов испарения в экспериментах применялась три схемы нагрева капли огнетушащей жидкости: конвективный, кондуктивный, радиационный.

2.4.1 Материалы ЛГМ и растворы огнетушащего состава, используемые при изучении смачивания ЛГМ

При постановке, планировании и проведении экспериментальных исследований учитывались установленные ранее закономерности движения капель воды в воздухе, их дробления и коагуляция [113], а также закономерности процессов движения капель жидкости через высокопористую структуру типичных

лесных горючих материалов на основе хвои, листьев, а также смесей последних [5]. Ранее установлено [46], что через слой хвои на глубину 10–12 мм и более проходят только крупные капли воды с характерным диаметром от 6,00 мм. Капли диаметром менее 1,50 мм только смачивают поверхность хвоинок, растекаясь по ним, в достаточно тонком приповерхностном слое. При выпадении на слой листьев капель воды последние растекаются по поверхности и проникают в глубь слоя ЛГМ. Но наиболее распространенным в природе является ЛГМ, который представляет собой смесь листьев, хвои и веточек (высокопористая структура). Такие смеси типичны для смешанных лесов, которые широко распространены во всех регионах Земли. Для таких материалов характерны и растекание капель любых жидкостей по поверхностям отдельных листьев, и проникновение капель внутрь слоя ЛГМ со смачиванием поверхностей хвоинок и веточек [9, 26].

В связи с вышеизложенным в качестве исследуемого материала выбраны хвоя сосны, листья березы и сосновые ветки. Толщина листьев была около 0,10 мм, диаметры веток и хвоинок – 6,00 мм и 0,65 мм, соответственно.

При проведении экспериментов по смачиванию в качестве основного варьируемого фактора принят начальный объем капель воды и четырех специальных составов. Этот объем варьировался в диапазоне от 5 мкл до 25 мкл. В качестве жидкостей использовались дистиллированная вода и 10 % растворы огнетушащего состава ОС-5 и бишофита, 10 % суспензия бентонита, 10 % эмульсия пенообразователя.

2.4.2 Методика исследования испарения капель специальных огнетушащих составов, лежащих на поверхности ЛГМ и абразивно-обработанных металлов

Установлено, что в условиях нагрева верхней поверхности ЛГМ (листьев, веток и хвоинок) до температуры 50 °С нижняя часть образцов из веток и хвоинок деформируется вследствие начала процесса термического разложения. Известно [114], что коэффициент теплопроводности листьев значительно больше

коэффициента теплопроводности сосновых веток и хвои. Толщина типичных листьев значительно меньше толщины веток и хвои. В условиях достижения температуры поверхности листа $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ термического разложения не зарегистрировано. Кроме того, площадь поверхности листа значительно больше площади поверхности веток и хвоинок. В условиях прогрева поверхности листа до температуры $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ термическое разложение происходит локально, остаются участки не подверженные деформации. Кроме того, площадь поверхности листа значительно больше площади поверхности веток и хвоинок. Поэтому изучение процесса испарения капель воды и огнетушащих растворов проведено только на поверхностях листьев.

При исследовании процессов испарения (п. 2.2) капель воды, растворов бишофита и ОС-5, суспензии бентонита и эмульсии пенообразователя основным варьируемым фактором являлась температура поверхности элементов ЛГМ (листья) и металлов (медь М1 и сталь 12Х18Н10Т), которая варьировалась в диапазоне от 50 до 110°C с шагом 20°C . Начальный объем капли составлял 10 мкл. Лист 1 крепился к поверхности подложки из меди 2 (рис. 2.3) на термопасту для лучшего контакта с нагреваемой поверхностью и предотвращения его деформации (коробления при нагреве).

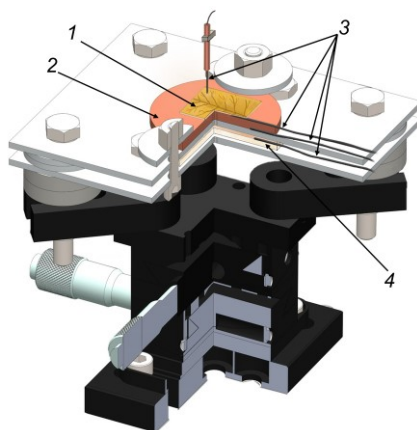


Рисунок 2.3 – Рабочий участок: 1 – элемент ЛГМ (лист березы); 2 – металлическая подложка; 3 – термопары; 4 – силиконовый нагреватель.

Методика исследования испарения капель огнетушащих составов на поверхностях металлов аналогична п. 2.2. В качестве исследуемых поверхностей выбраны следующие образцы: М₁, М₄₆, М₂₆₉, Ст₁, Ст₄₆ и Ст₂₆₉.

Принято допущение о том, что при испарении капли плотность жидкостей постоянна. Физические свойства воды и специальных огнетушащих составов [115] приведено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Физические свойства воды и специальных огнетушащих составов.

	Вода	Суспензия бентонита (10 %)	Раствор бишофита (10 %)	Раствор ОС-5 (10 %)	Эмульсия пенообразователя (10 %)
c_p , кДж/(кг·К)	4,183	3,830	3,603	3,853	3,995
α , м ² /с	$14,3 \cdot 10^{-8}$	$16,7 \cdot 10^{-8}$	$14,9 \cdot 10^{-8}$	$14,7 \cdot 10^{-8}$	$12,5 \cdot 10^{-8}$
ρ , кг/м ³	998,2	1100,0	1081,5	1099,1	1187,0
γ , мН/м	72,7	68,5	75,8	45,0	17,3
λ_m , Вт/(м·К)	0,599	0,704	0,580	0,624	0,595
μ , Па·с	$1,004 \cdot 10^{-3}$	$24,3 \cdot 10^{-3}$	$1,015 \cdot 10^{-3}$	0,12	$1,112 \cdot 10^{-3}$

В качестве функции цели экспериментальных исследований приняты геометрические характеристики капель (высота и площадь поверхности капли, контактный угол (одна из основных характеристик процесса смачивания)) и время полного испарения капель.

Погрешность определения геометрических характеристик капель складывалась из инструментальной погрешности, обусловленной возможностями методов обработки фотоизображений, полученных при использовании теневой методики, и систематической погрешности. Измерения проводились не менее трех раз. Установлено, что относительная случайная погрешность измерения контактных углов на поверхностях лесного горючего материала достаточно высока (достигала 20 % при смачивании эмульсией пенообразователя поверхности листьев). Высокие значения погрешности могут быть связаны с абсорбцией трихом (структура, расположение и плотность трихом на поверхности

листьев влияют на их смачиваемость [116]), хаотичной шероховатостью и химической неоднородностью листьев (разные времена и условия их роста).

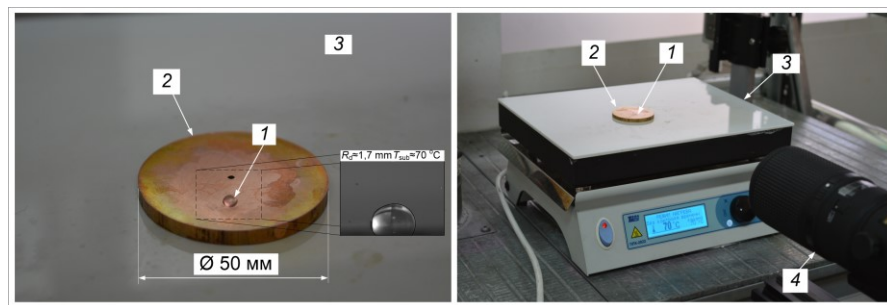
2.4.3 Методика исследования испарения капель специальных огнетушащих составов при кондуктивном, конвективном и радиационном подводе тепла

В экспериментах применялись три схемы нагрева капли огнетушащей жидкости: на разогретой поверхности (кондуктивный), в газовом потоке (конвективный), в муфельной печи (радиационный) (рис. 2.4). Каждая из них соответствует условиям реальных пожаров, в частности, при нагреве: на поверхности горящего материала или ограждающих конструкций; в процессе движения в газовом или парогазовом потоке (смесь дымовых газов, воздуха и паров); при достижении фронта пламенного горения.

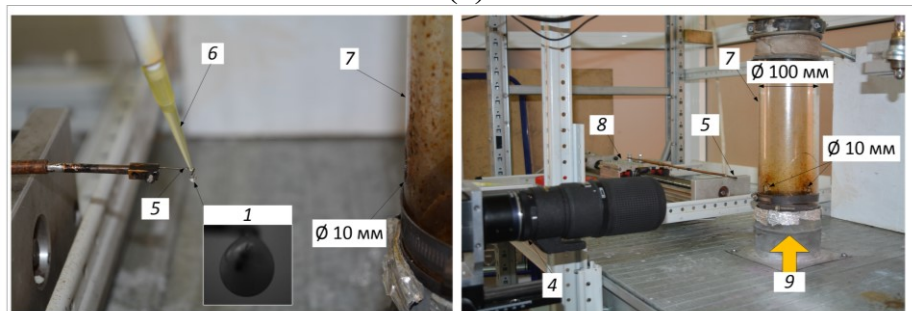
При расчете значений тепловых потоков (q_{cond} , q_{conv} , q_{rad}) применялись следующие выражения [117]: $q_{\text{conv}} = \alpha \cdot (T_a - T_s)$, Вт/м²; $q_{\text{cond}} = \lambda_d \cdot (T_a - T_s) / r$, Вт/м²; $q_{\text{rad}} = \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot (T_a^4 - T_s^4) + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4$, Вт/м², $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda_d / (2 \cdot r)$, Вт/(м²·К), $\text{Nu} = 2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3}$ (вынужденная конвекция), $\text{Nu} = 0,675 \cdot \text{Ra}^{0,058}$ (свободная конвекция), $\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}$, $\text{Gr} = (g \cdot \beta_a \cdot d^3 \cdot (T_a - T_s)) / (\nu_a \cdot T_a)^2$, $\text{Pr} = \nu_a \cdot \rho_a \cdot C_a / \lambda_a$, $\varepsilon_d = 0,9$, $\varepsilon_a = 0,1$, $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴). При расчете вынужденной конвекции предполагалось, что: отсутствует пространственный градиент на поверхности капли, не учитывается рециркуляция внутри капли [118]. Значения теплофизических параметров воздуха λ_a , ν_a , ρ_a , C_a выбирались согласно справочным данным [119] с учетом их зависимости от температуры. При расчете значений q_{cond} в качестве r принимался зарегистрированный радиус контактного пятна, т.е. учитывался фактор довольно существенно отличающихся условий растекания капель исследованных составов по подложке. Соответственно, значения q_{cond} для исследованных составов (особенно при сравнении эмульсии пенообразователя и раствора ОС-5 с другими жидкостями) отличались существенно при идентичных температурах нагрева.

В работе [120] лучистая поток теплоты рассчитывался $Q_{\text{rad}} = \pi \cdot d^2 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_d \cdot (T_a^4 - T_s^4)$, принято, что $\varepsilon_d = 0,95$ и равна поглощающей способности [120]. Выражение Nu

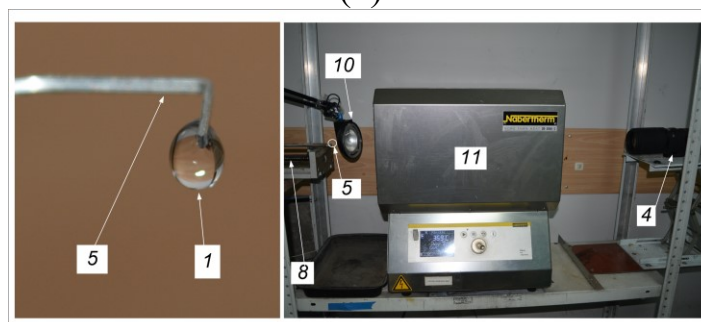
для вынужденной конвекции, учитывающее эффекты испарения однокомпонентных капель, имеет вид $Nu = (2 + 0,57 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}) / (1 + B_f)^{0,7}$ [118], где $B_f = [C_a \cdot (T_a - T_s) / q_{yd}] \cdot (1 - |q_d| / |q_c| + |q_R| / |q_c|)$ – число массообмена ($|q_d|$ – удельный тепловой поток расходуемый на повышение температуры капли жидкости, $|q_c|$ и $|q_R|$ удельные тепловые потоки, подводимые к капле жидкости за счет конвекции и излучения, соответственно; q_{yd} – удельная теплота парообразования). При учете параметра B_f тепловой поток q_{conv} уменьшился приблизительно от 2 до 15 % при росте температуры от 100 до 600 °C соответственно.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 2.4 – Схемы экспериментальных стендов с нагревом капли на подложке (а), в потоке воздуха (б) и в муфельной печи (в): 1 – капля; 2 – подложка; 3 – поверхность нагрева; 4 – высокоскоростная камера; 5 – держатель; 6 – дозатор; 7 – цилиндр из кварцевого стекла; 8 – координатник; 9 – тепловой поток; 10 – источник света; 11 – муфельная печь.

При вычислении значений тепловых потоков принималось, что в случае нагрева в потоке воздуха (рис. 2.4(б)) реализуется принудительная конвекция, в случае же нагрева в муфельной печи (рис. 2.4(в)) испарение капли проходит за счет лучистого нагрева и свободной конвекции. Выбор выражений для вычисления чисел Nu сделан при анализе основных заключений [120–123]. Так, выражения вида $Nu=0,37 \cdot Re^{0,6}$, приведенные в [123–125], хорошо описывают исследуемый процесс при свободной конвекции, что соответствует схеме с нагревом в муфельной печи (без направленного потока воздуха). В условиях вынужденной конвекции (при использовании схемы с натекающим потоком воздуха), исследователями [120–123] рекомендовано применение выражения вида $Nu=2+0,6 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$.

Следует отметить, что как и при обобщении результатов экспериментов в [117], не учитывались возможные тепловые потери при вычислении значений удельных тепловых потоков. Анализ и уточнение таких тепловых потерь при трех использованных схемах нагрева представляет самостоятельное и достаточно масштабное исследование, которое может быть выполнено с применением специализированно оборудования [126] или математического моделирования [127–129]. Установлено, что отличия скоростей прогрева и испарения капель типичных огнетушащих составов достаточно существенны. Так как теплотери имели место во всех экспериментах, а для разных составов условия нагрева были идентичны, то в первом приближении тепловые потери не учитывались.

2.5 Методика исследования смачивания и растекания капель жидкости на поверхностях металлов

Эксперименты по изучению смачивания и растеканию капель дистиллированной воды по поверхности металлов (медь М1 и хромоникелетитановая аустенитная сталь 12Х18Н10Т) и сплава (алюминиево-магнийсый сплав АМг6), проведены с использованием оборудования теневого

метода (п. 2.1). При определении свойств смачиваемости поверхностей металлов и сплава объем капли был постоянен и равен 10 мкл. Контактный радиус (r) капли объемом 10 мкл не превышал 2,2 мм, что меньше капиллярной постоянной дистиллированной воды $L = 3,8$ мм. В таких условиях ($r \geq L = \gamma/(\rho \cdot g)$) размер капли, от которого зависит действующая на нее сила тяжести, не оказывал влияния на статический контактный угол. Исследования процесса растекания капли по поверхности сплава АМгб проводилось при постоянном объеме жидкости (30 мкл). Эксперименты проведены при расходах (G) 10, 50, 100 и 600 мкл/мин, которые выбраны в соответствии с техническими возможностями системы дозирования жидкости.

2.5.1 Материалы

Для экспериментов выбраны два типичных и широко используемых в разных отраслях промышленности металла – сталь и медь и один сплав – алюминиево-магниевый. На поверхностях образцов из стали и меди сформировано по одиннадцать текстур абразивной обработкой с использованием шлифовально-полировального станка FORCIPOL 1V с автоматическим головным устройством FORCIMAT. На поверхностях образцов из сплава АМгб сформировано пять текстур с помощью шлифовальной машины Makita.

Хромоникелетитановая аустенитная сталь 12X18Н10Т (Cr 17,0–19,0 %, Ni 9,0–11,0 %, Ti до 0,8 %, Si до 0,8 %, S до 0,02 %, Mn до 2,0 %, Cu до 0,3 %, P до 0,035 %, C до 0,12 %, остальное Fe) характеризуется высокой коррозионной стойкостью в жидких агрессивных средах, устойчива к межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур. Медь марки М1 (Cu 99,9, остальное Fe, Ni, S, As, Pb, Zn, O, Sb, Bi, Sn) широко используется в качестве конструкционного материала систем охлаждения теплонагруженного оборудования (например, используемых передовых цифровых и интеллектуальных технологиях) в микроэлектронике и авиастроении. В целом медь характеризуется высокой теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью и антибактериальными

свойствами. Алюминиевый сплав (АМг6: Al 91,2 %, Mg 6,8 %, Mn 0,8 %, Fe 0,4 %, Si 0,4 %, Zn 0,2 %, Ti 0,1 %, Cu 0,1 %) выбран в связи с его широким применением в авиации, судостроении, автомобилестроении, космической технике [130].

Перед обработкой все образцы полировались алмазными пастами в последовательности АСМ 40/28 НОМ – АСМ 14/10 НОМ – АСМ 5/3 НВОМ – АСМ 1/0 НВОМ и абразивным войлочным кругом. В таблице 2.3 приведены значения среднего размера зерна (η) абразивных дисков используемые при обработке меди и стали, в таблице 2.4 – сплава АМг6. С помощью станка FORCIPOL 1V во время абразивной обработки контролировалось сила давления на образец 10 Н, скорость вращения 100 об/мин, время обработки 2 мин. При использовании шлифовальной машины Makita контролировалось только время обработки (2 мин).

Таблица 2.3 – Средний размер зерна абразивных дисков.

Маркировка материала	Паста АСМ 1/0 НВОМ	Диск Р2500	Диск Р2000	Диск Р1500	Диск Р1200	Диск Р800	Диск Р600	Диск Р320	Диск Р150	Диск Р100	Диск Р60
η , мкм	меньше 1	8,5	9,5	13	15	22	25,8	46	100	160	269

Таблица 2.4 – Зернистость материалов (алмазная паста и абразивные диски).

Маркировка материала	Паста АСМ 1/0 НВОМ	Диск Р2500	Диск Р1000	Диск Р600	Диск Р400
η , мкм	меньше 1	8,5	18,3	25,8	35,0

Полученные образцы условно обозначены как М_{1...269}, Ст_{1...269}, Ал_{1...35}, где М – медь, Ст – сталь, Ал – алюминивно-магниевый сплав, индекс 1...269 указывает на средний размер зерна абразивных дисков, использовавшихся при обработке поверхностей.

Текстура создавалась на подложках, изготовленных в форме прямоугольного параллелепипеда высотой 28 мм, шириной 28 мм и толщиной 3 мм.

2.5.2 Анализ микротекстуры поверхности и элементного состава приповерхностного слоя

Микрорельеф образцов регистрировался методом оптической профилометрии с помощью комплекса «Micro Measure 3D station». Сканирование поверхностей проводилось на трех различных участках одинаковой площади 450х300 мкм. Чувствительность датчика составляла 1 нм. Погрешность измерений не превышала 3 %. Трехмерные изображения профилей поверхностей получены с применением фильтра Гаусса 0,008 мкм. Количественная оценка геометрических свойств приповерхностных слоев выполнена на базе трехмерных характеристик шероховатости: высоты (S_a , S_q , S_z , S_{ku} , S_{sk}), гибридных характеристик (S_{dq} , S_{dr}), дискретизации (S_{tr} , S_{al}) и элемента (S_{pd} , S_{pc}).

Элементный состав приповерхностного слоя определен с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N (Hitachi, Япония), оснащенного блоком химического анализа EDS Bruker XFlash 40 (Bruker, США). Последнее выполнено в условиях высокого вакуума в режиме обратно-рассеянных электронов с определением состава отдельных фаз ЭДС, что позволило определить состав приповерхностного слоя абразивно-обработанных поверхностей. Спектры EDS получены при ускоряющем напряжении 5 кВ.

2.5.3 Определение свободной поверхностной энергии

Одной из основных характеристик поверхностных свойств материала является свободная поверхностная энергия (СПЭ) [131]. Последняя определяется с использованием косвенных методов, основанных на измерении контактных углов тестовых жидкостей [132–136]: Фоукса; Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле (ОВРК или метод гармонического среднего); Оуса и Гуда (кисотно-основной); Ньюмана (уравнения состояния).

Известные [132,133] методы определения СПЭ подразделяются на две группы: «прямые методы» и «методы поверхностных компонентов».

Метод Ньюмана [136] относится к прямым методам, основывается на том, что межфазное натяжение “твердое тело–жидкость” зависит только от

поверхностного натяжения твердого тела и жидкости. В методе не учитывается влияние силовых составляющих (полярной, дисперсной, основной, кислотной), водородных связей [134]. Несмотря на эти его недостатки, метод широко используется для оценки СПЭ.

К «методам поверхностных компонентов» относятся: методы Фоукса [132], ОВРК [135], Оуса и Гуда [132]. В методе Фоукса [132] поверхностное натяжение определяется как сумма его дисперсной и полярной компонент. Несмотря на высокую точность метода, он имеет ограничения по применению, так как не учитывает полярное взаимодействие жидкости и твердого тела. Метод ОВРК [135] базируется на методе Фоукса [132], но учитывает эффекты полярных связей в выражении межфазного натяжения с применением правила среднего геометрического для всех членов (уравнение 1). Метод позволяет проводить анализ свойств смачиваемости твердого тела в условиях растекания жидкости с неизвестным поверхностным натяжением по значению статического контактного угла.

Метод Оуса и Гуда [132] широко используется для определения СЭП полимеров. Поверхностное натяжение определяется как сумма дисперсной части (сил Ван-дер-Ваальса) и асимметричного кислотно-основного члена, который учитывает водородные связи и кислоты Льюиса (акцептор электронов)/основание Льюиса (донор электронов).

Свободная поверхностная энергия для меди и стали определялась методом гармонического среднего (Оунса-Вендта-Рабея-Кьельбле (ОВРК) [135]).

Межфазное натяжение “твердое тело – жидкость” определяется как [137]:

$$\gamma_{SL} = \gamma_L + \gamma_S - 2 \cdot \left(\sqrt{\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p} + \sqrt{\gamma_S^d \cdot \gamma_L^d} \right), \quad (2.1)$$

где γ_L, γ_S – поверхностное натяжение жидкости и поверхностная энергия твердого тела; γ_S^p, γ_S^d и γ_L^p, γ_L^d – полярные и дисперсные составляющие поверхностной энергии твердого тела и поверхностного натяжения жидкости, соответственно.

Используя уравнение Юнга для поверхностной энергии тела $\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cdot \cos \theta$, уравнение (2.1) преобразуется к виду:

$$(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_L = 2 \cdot \left(\sqrt{\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p} + \sqrt{\gamma_S^d \cdot \gamma_L^d} \right), \quad (2.2)$$

Уравнение (2.2) преобразовано к виду:

$$\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_L}{2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d}} = \frac{\sqrt{\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p}}{\sqrt{\gamma_L^d}} + \sqrt{\gamma_S^d}. \quad (2.3)$$

В уравнении (2.3) две неизвестные (γ_S^p , γ_S^d). Статические контактные углы θ полярной (воды) и дисперсной (дийодметана) жидкостей определялись экспериментально (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – Статические контактные углы дийодметана и дистиллированной воды на абразивно-обработанных поверхностях меди и стали.

Поверхность меди	M ₁	M _{8,5}	M _{9,5}	M ₁₃	M ₁₅	M ₂₂	M _{25,8}	M ₄₆	M ₁₀₀	M ₁₆₀	M ₂₆₉
Дийодметан $\theta_d, ^\circ$	61,6	59,1	59,8	57,4	60,8	62,5	59,9	61,6	55,0	61,2	56,1
Дистиллированная вода $\theta_e, ^\circ$	66,5	57,8	54	76,0	82,7	81,8	88,4	92,8	98,1	104,2	108,2
Поверхность стали	Ст ₁	Ст _{8,5}	Ст _{9,5}	Ст ₁₃	Ст ₁₅	Ст ₂₂	Ст _{25,8}	Ст ₄₆	Ст ₁₀₀	Ст ₁₆₀	Ст ₂₆₉
Дийодметан $\theta_d, ^\circ$	59,6	60,2	60,5	60,3	59,9	58,9	59,7	57,9	59,7	59,2	58,3
Дистиллированная вода $\theta_e, ^\circ$	89,1	85,1	82,0	78,5	77,9	73,1	73,5	71,6	82,8	85,1	89,5

Используя жидкости дийодметан и дистиллированную воду с известными полярными и дисперсными компонентами поверхностного натяжения в [137] определяются значения $\sqrt{\gamma_L^p} / \sqrt{\gamma_L^d}$ и $(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_L / 2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d}$. После этого строится

зависимость $\left(\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_L}{2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d}} \right) = f \left(\frac{\sqrt{\gamma_L^p}}{\sqrt{\gamma_L^d}} \right)$ (рис. 2.5).

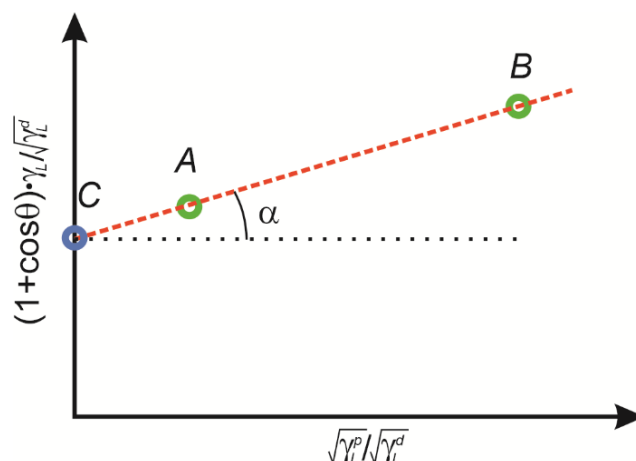


Рисунок 2.5 – Графическое определение полярной и дисперсной составляющих поверхностной энергии твердого тела [137].

На зависимости рис. 2.5 точка *A* соответствует значениям для дийодметана, точка *B* дистиллированной воды. Через точки *A* и *B* проводится прямая до пересечения с осью ординат. Дисперсная компонента СПЭ определяется как квадрат значения величины $\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \gamma_L}{2 \cdot \sqrt{\gamma_L^d}}$ в точке пресечения оси ординат с прямой *AB* (точка *C*, рис. 2.5). Полярная составляющая определяются как квадрат тангенса угла α (рис. 2.5) наклона прямой *AB*.

Погрешность определения поверхностной энергии по методике [137] не превышала 7 %.

ГЛАВА 3. ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ СОСТАВОВ (РАСТВОРОВ, ЭМУЛЬСИЙ И СУСПЕНЗИЙ) НА НАГРЕТЫХ И ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Проведено изучение процессов смачивания и испарения капель огнетушащих составов на поверхностях элементов лесных горючих материалов (хвоя сосны, листья березы и сосновые ветки) и солевых растворов на поверхностях алюминиево-магниевого сплава АМгб.

3.1 Испарение капель растворов на нагретых поверхностях

С целью создания информационной базы для сравнительного анализа проведены эксперименты с каплями воды. По изменениям контактного диаметра (рис. 3.1(а)) выделены три режима испарения капель дистиллированной воды на полированной алюминиевой поверхности алюминиево-магниевого сплава [112]:

- 1 – увеличение площади контакта;
- 2 – “пиннинг” капли (площадь контакта постоянна);
- 3 – “депиннинг” капли (уменьшение контактного диаметра).

Физический механизм режимов испарения капли дистиллированной воды на поверхностях меди различной шероховатости ($Ra=0,59$; $5,19$; $6,21$ мкм) подробно описан в [138]. В проведенных экспериментах капля воды испарялась на поверхности сплава АМгб с относительно малой шероховатостью ($Ra=0,0559$ мкм). Установлено, что при этом реализовывались все три выделенных в [139] режима испарения (рис. 3.1(а)). Характер зависимостей контактного угла и высоты капли от времени аналогичен установленным в [138]. Можно сделать вывод о том, что вид металла не влияет на режимы испарения капли дистиллированной воды.

По результатам проведенных экспериментов при испарении 10 % водных растворов солей $CaCl_2$, $LiCl$, $NaCl$, а также 30 % $LiBr$ и соответствующем изменении контактного диаметра по аналогии с [138] условно выделены три режима испарения:

- 1 – увеличение площади контакта;
- 2 – “пиннинг” капли (площадь контакта постоянна);
- 3 – “образование кристаллов соли или кристаллогидратов”.

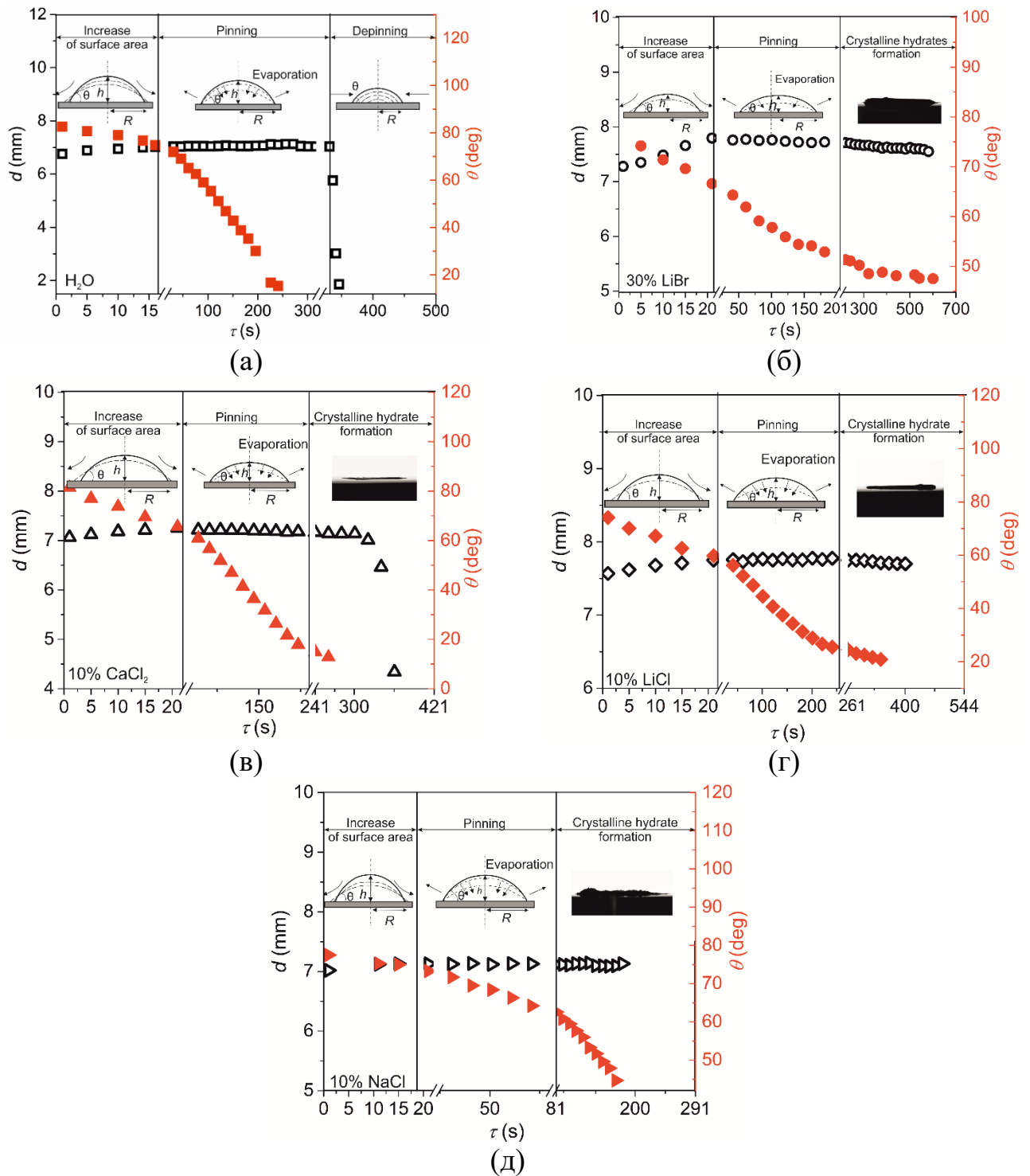


Рисунок 3.1 – Выделенные в экспериментах режимы испарения капель: (а) вода; (б) 30 % LiBr; (в) 10 % $CaCl_2$; (г) 10 % LiCl; (д) 10 % NaCl. Объем 60 мкл, температура поверхности 80 °С.

Установлено, что в соответствии с фазовыми кривыми равновесия [140,141] в условиях проведения экспериментов при испарении водных растворов CaCl_2 , LiCl , LiBr образуются кристаллогидраты, водного раствора NaCl – кристаллы соли, которые изотропно растут по трём координатным направлениям.

Механизм испарения водных растворов солей в режимах “увеличения площади контакта” и “пиннинга” аналогичен режимам испарения дистиллированной воды [138]. На рис. 3.1 приведены типичные результаты экспериментов с каплями начальным объемом $V_0 = 60$ мкл.

На рис. 3.1 (б–д) указано время $\tau = 201$ с (30 % LiBr), $\tau = 241$ с (10 % CaCl_2), $\tau = 261$ с (10 % LiCl), $\tau = 81$ с (10 % NaCl) начала кристаллизации – третьего условно выделенного режима испарения (“образование кристаллов соли или кристаллогидратов”). При $\tau = 700$ с (рис. 3.1(б)), $\tau = 421$ с (рис. 3.1(в)), $\tau = 544$ с (рис. 3.1(г)), $\tau = 291$ с (рис. 3.1(д)) на поверхности капли образуется сплошная твердая оболочка. Капля дистиллированной воды (рис. 3.1(а)) в каждом режиме испарения имеет осесимметричный вид. Установлено (рис. 3.1(б–д)), что у растворов солей при кристаллизации форма капли искажена кристаллогидратами (либо кристаллами), несимметрична и изменяется во времени. Рост и деформация кристаллогидратов (либо кристаллов) приводит к “ступенчатой” форме контактной линии (рис. 3.2). Последнее не позволяет измерить контактный угол традиционными методами.



Рисунок 3.2 – Теневое фотоизображение капель водных растворов солей: а) 30 % LiBr и б) 10 % NaCl . 1 – Образование кристаллогидратов (кристаллов) в прекурсионной плёнке.

Известно [142], что при полном испарении дистиллированной воды образуется “сухое” пятно. В проведенных экспериментах установлено, что после

испарения воды из растворов солей LiBr , LiCl , CaCl_2 (при $t_n = 80^\circ\text{C}$) на поверхности капли образуется тонкая твердая оболочка (кристаллогидратов либо кристаллов). Для растворов LiBr , LiCl на одну молекулу воды приходится одна молекула соли, а одной молекуле соли CaCl_2 соответствуют две молекулы воды. В случае соли NaCl образуются объёмные кристаллы соли (без кристаллогидратов). Установлено, что при покрытии поверхности капли кристаллической оболочкой перед контактной линией зарегистрирована область кристаллизации (рис. 3.2(а, б)). Первоначально образуются кристаллогидраты (кристаллы) в прекурсионной плёнке. При этом осуществляется движение молекул воды в направлении образовавшихся кристаллов, что повышает толщину прекурсионной плёнки, и она становится визуально видимой (показано на рис. 3.2 (а, б)). Диаметр образованного “пятна” кристаллогидратной плёнки больше начального диаметра капли. Известно [141], что со временем диаметр кристаллогидратного пятна на нагретой поверхности увеличивается в несколько раз. Последнее обусловлено потоком молекул воды к краям капли, где ниже концентрация воды. Данные особенности процесса важны для ряда технологических задач химической промышленности, связанных с выпариванием солей из капель растворов.

В проведенных экспериментах также установлено, что для капли дистиллированной воды скорость изменения её объёма (рис. 3.3) и контактного угла (рис. 3.1(а)) во времени имеет квазилинейный характер. Контактная линия в режиме “пиннинга” не движется (диаметр постоянен) пока контактный угол не уменьшится до $4\text{--}10^\circ$ и не нарушится баланс сил, действующих на каплю (инерции, вязкости, трения, тяжести, поверхностного натяжения) [143]. После этого капля переходит в режим депиннинга. При испарении капель водных растворов солей кристаллизация в прекурсионной плёнке и вблизи контактной линии повышает устойчивость контактной линии в режиме пиннинга и исключает депиннинг капли.

Из рис. 3.3 видно, что в широком диапазоне начальных объёмов от 10 мкл до 60 мкл зависимости $V(\tau)$ для большей части времени испарения имеют линейный характер (испаряется более 70 % жидкости от начальной массы капли).

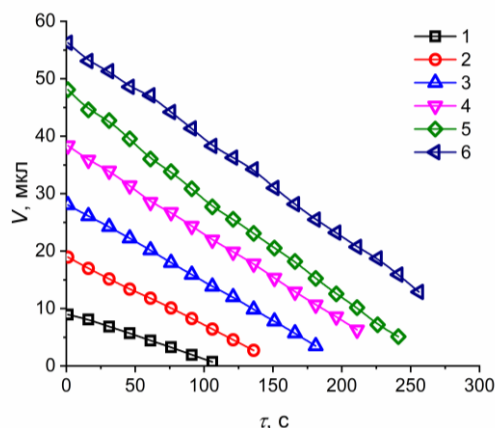


Рисунок 3.3 – Зависимость объема капель дистиллированной воды от времени ($t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – $V_0 = 10$ мкл; 2 – 20 мкл; 3 – 30 мкл; 4 – 40 мкл; 5 – 50 мкл, 6 – 60 мкл.

В химических технологиях, связанных с высокими температурами и высококонцентрированными растворами, необходимо контролировать время образования кристаллов соли или кристаллогидратов. При значительном росте последних поверхность капли покрывается кристаллогидратной плёнкой и скорость испарения уменьшается на несколько порядков. При этом высота капли в момент начала кристаллизации изменяется незначительно, снижается интенсивность отвода теплового потока от поверхности. На рис. 3.4 приведены установленные в экспериментах зависимости высоты капли $h_{0кр}$ в процессе начала кристаллизации от объема водных растворов солей. Установлено, что $h_{0кр}$ зависит от растворимости соли. Чем меньше предел растворимости, тем раньше начинается образование кристаллов соли или кристаллогидратов на поверхности капли. Так при $t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{нк} = 70\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$) образование кристаллогидратов для водных растворов LiCl, CaCl₂, LiBr и кристаллов NaCl начинается при концентрациях, близких к значениям, соответственно, 52 %; 60 %; 67 % и 26 %.

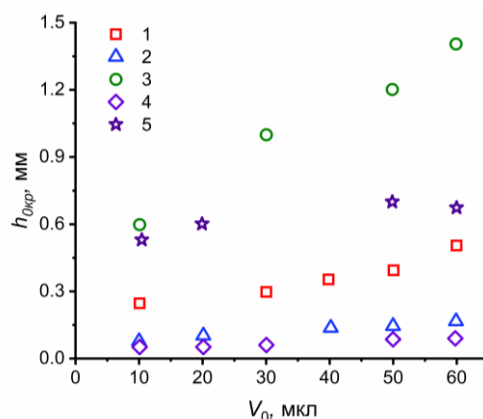


Рисунок 3.4 – Влияние начального объема капли V_0 , состава водно-солевого раствора и начальной концентрации соли на высоту капли $h_{0кр}$ в момент начала кристаллизации. Зависимости 1–4: $C_0 = 10\%$; 5 – $C_0 = 30\%$. Водные растворы соли: 1 – LiCl; 2 – CaCl_2 ; 3 – NaCl; 4, 5 – LiBr.

Установлено, что скорость испарения водных растворов LiCl, CaCl_2 и LiBr уменьшается во времени для любого начального объема капли V_0 . На рис. 3.5 приведены экспериментальные данные для соли LiCl с начальной концентрацией $C_0 = 10\%$. Последние точки кривых (рис. 3.5) находятся вблизи предела кристаллизации. Уменьшение со временем скорости испарения обусловлено несколькими причинами. Для воды парциальное давление и концентрация пара C_n вблизи межфазной поверхности зависит от $t_{нк}$. Для водных растворов солей $C_n = f(t_{нк}, C_c)$, где C_c – концентрация соли вблизи межфазной поверхности (жидкость–газ).

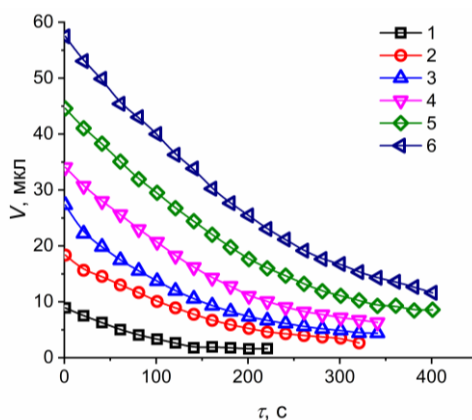


Рисунок 3.5 – Зависимости объемов водного раствора LiCl от времени ($C_0 = 10\%$, $t_n = 80\text{ }^\circ\text{C}$): 1 – $V_0 = 10\text{ мкл}$; 2 – 20 мкл ; 3 – 30 мкл ; 4 – 40 мкл ; 5 – 50 мкл ; 6 – 60 мкл .

При приближении к точке кристаллизации парциальное давление водяного пара падает. В результате поток пара, который пропорционален разнице ($C_{нк}-C_{\infty}$), также уменьшается. При $t_n = 75-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 10^5 Па точка кристаллизации для солей: LiCl $C_{кр} = 52\%$, CaCl_2 $C_{кр} = 59\%$, LiBr $C_{кр} = 66\%$. Указанные концентрации соли достигаются при условии испарения более 70% воды, содержащейся в капле. Поэтому кривые на рисунке 3.5 в начале испарения имеют квазилинейный вид, существенно изменяющийся при испарении воды.

Процесс испарения водного раствора соли NaCl (рис. 3.6) отличается от аналогичного процесса для солей LiCl , CaCl_2 , LiBr . Кривые испарения для всех V_0 квазилинейны. Это связано с тем, что точка кристаллизации для NaCl при $t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует $C_{кр} = 26\%$. Состояние кристаллизации для раствора NaCl достигается, если испаряется только $40-50\%$ воды. Кроме того, теплота испарения q_c для данного раствора незначительно превышает теплоту испарения воды q , в отличие от соли LiBr , когда q_c существенно выше q .

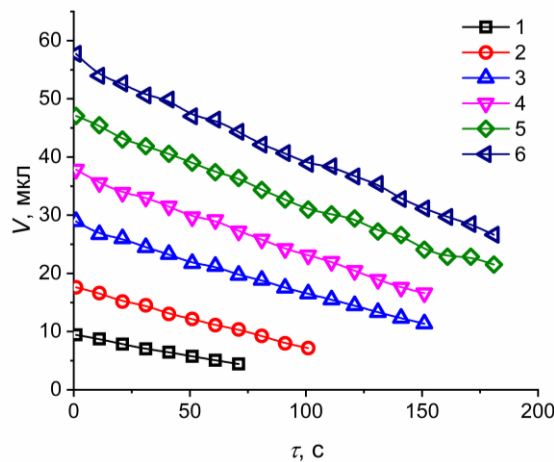


Рисунок 3.6 – Зависимости объемов водного раствора NaCl от времени ($C_0 = 10\%$, $t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – $V_0 = 10\text{ мкл}$; 2 – 20 мкл ; 3 – 30 мкл ; 4 – 40 мкл ; 5 – 50 мкл ; 6 – 60 мкл .

Сравнение изменений объёмов капель дистиллированной воды и водных растворов солей LiCl , NaCl и CaCl_2 в условиях испарения приведено на рис. 3.7. Видно, что на начальной стадии испарения (в условиях, когда концентрация соли не достигла точки кристаллизации) кривые имеют линейный характер. Перед

началом кристаллизации наибольшее отклонение от дистиллированной воды зарегистрировано у водного раствора LiCl. Кристаллизация этой соли начинается раньше по сравнению с NaCl и CaCl₂.

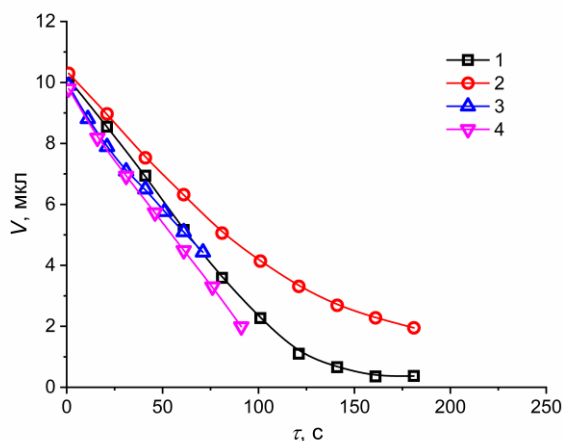


Рисунок 3.7 – Зависимость объема капли от времени ($t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – CaCl₂, $C_0 = 10\text{ }%$; 2 – LiCl, $C_0 = 10\text{ }%$; 3 – NaCl, $C_0 = 10\text{ }%$; 4 – дистиллированная вода.

Скорости испарения W_c для различных растворов солей сложно сравнивать между собой, так как они имеют сильно нелинейный характер (W_c с ростом τ в два раза может уменьшаться в десятки раз) и при этом проявляется различная растворимость соли. Чтобы провести качественное сравнение был введен условный параметр: средняя скорость десорбции соли $W_c = (V_{кр} - V_0) / \tau_{кр}$ (мкл/с), где $V_{кр}$ – объем капли перед началом кристаллизации, которому соответствует время $\tau_{кр}$.

На рис. 3.8 приведено отношение скорости испарения капли дистиллированной воды W_e к средней скорости испарения капли водного раствора соли W_c (мкл/с) при $t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C_0 = 10\text{ }%$, $V_0 = 10$ мкл. Часто [140] особенности растворов связывают со степенью растворимости. Например, логичен вопрос: “Какая масса соли может растворяться в единице массы воды без образования кристаллогидратов/кристаллов соли?”. По оси абсцисс на рис. 3.8 отложены значения концентраций соли $C_{кр}$, при которых начинается фазовый переход из жидкого в кристаллическое состояние в соответствии с кривой фазового равновесия.

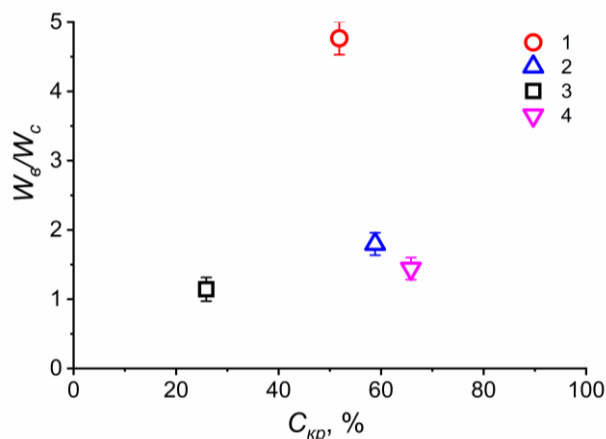


Рисунок 3.8 – Зависимость относительной скорости испарения W_e/W_c от $C_{кр}$ ($V_0 = 10$ мкл, $t_n = 80$ °С, W_e – скорость испарения воды (мкл/с), W_c – скорость испарения соли (мкл/с), $C_{кр}$ – концентрация соли при начале кристаллизации): 1 – LiCl; 2 – CaCl₂; 3 – NaCl; 4 – LiBr

Из рис. 3.8 видно, что скорость испарения и степень растворимости не связаны простым и явным образом (линейной или степенной зависимостью). Можно сделать вывод, что для моделирования процессов испарения капель растворов солей необходимо определять не только температуру $t_{нк}$ и парциальное давление пара $p_n = f(t_{нк})$. Для солей p_n является функцией двух параметров $t_{нк}$, C_c . В этом случае определение p_n связано с большими трудностями, так как концентрация пара вблизи межфазной поверхности зависит от концентрации соли. Учитывая, что диффузия в жидкости крайне инерционный процесс по сравнению с переносом тепла, то для значительного промежутка времени поперечный профиль концентрации соли в капле будет иметь нелинейный вид. Кроме того, коэффициент диффузии в растворе будет изменяться во времени по поперечной координате.

3.2 Смачивание и испарение капель специальных составов (растворов, суспензий и эмульсий) на поверхностях элементов лесного горючего материала

3.2.1 Смачивание поверхностей лесного горючего материала каплями огнетушащих составов

На рис. 3.9 представлены типичные теневые изображения капель на поверхностях лесного горючего материала.

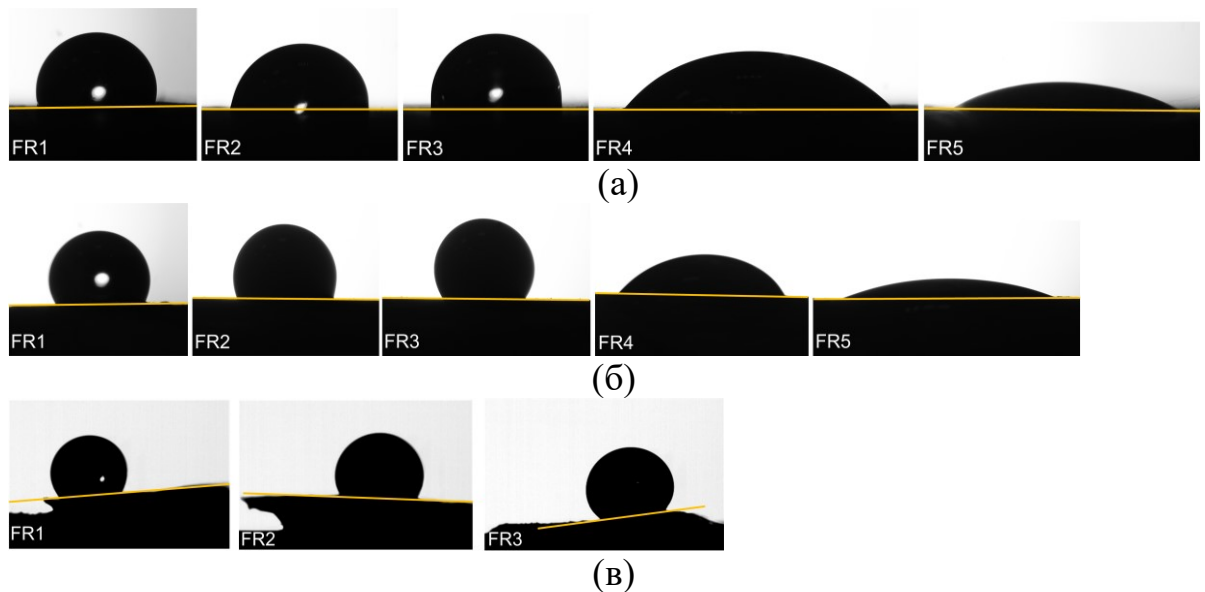


Рисунок 3.9 – Теневые изображения капель дистиллированной воды и растворов огнетушащих составов ($V = 10$ мкл) на поверхностях: (а) – лист березы; (б) – сосновая ветка; (в) – сосновая хвоинка. Жидкости: FR1 – вода; FR2 – суспензия бентонита; FR3 – раствор бишофита; FR4 – раствор OC-5; FR5 – эмульсия пенообразователя.

На рисунках 3.10 (а–г) представлены зависимости контактного угла, диаметра, высоты и площади поверхности контакта капли на границе раздела “жидкость–газ” на поверхности листа при различных объемах капель жидкости. Следует отметить, что в экспериментах воспроизводились условия взаимодействия капель воды и специальных составов при их движении через высокопористую структуру ЛГМ в условиях орошения последних. Капля при падении на поверхность лесного горючего материала попадает или на

поверхность лесного горючего материала (одиночного малоразмерного элемента (хвоинка, лист, ветка)) или между этими элементами (в открытые поры). Во втором случае капля при дальнейшем движении под действием силы тяжести попадает, пройдя некоторое расстояние в открытой поре, на расположенный ниже малоразмерный элемент, т.е. условия проведенных экспериментов практически идентичны последствиям движения капель любых жидкостей через пористую структуру типичного ЛГМ – смесь хвоинок, листьев, веточек.

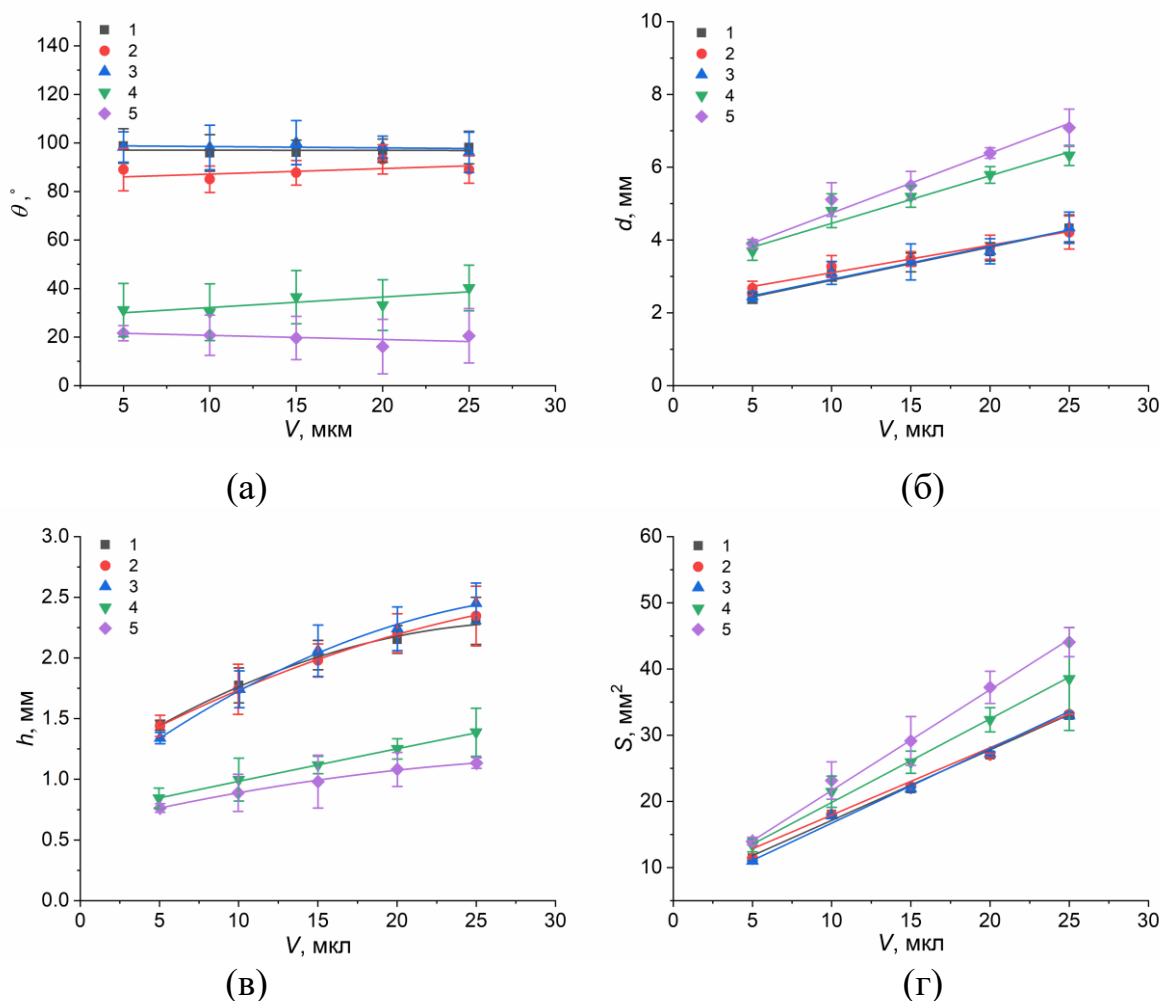


Рисунок 3.10 – Зависимости геометрических характеристик капель огнетушащих составов от объема дозируемой жидкости на поверхности листа: (а) – контактный угол, (б) – диаметр, (в) – высота, (г) – площадь поверхности капли. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

Установлено (рис. 3.10(а)), что вода и раствор бишофита смачивают поверхность листа практически одинаково. Видно, что контактные углы этих жидкостей максимальны в группе пяти исследованных и составляют от 100° до 106° . Минимальные значения θ соответствуют эмульсии пенообразователя и составляют от 40° до 46° (рис. 3.10(а)). Можно сделать вывод, что в диапазоне изменения объема капель от 5 мкл до 25 мкл (характерные размеры капли сферической формы составляют при этом 3,9 мм и 7,0 мм, соответственно (рис. 3.10(б)) эмульсия пенообразователя очень хорошо смачивает поверхность листа, а раствор бишофита и вода не смачивают.

Контактные углы капель суспензии бентонита на поверхности ЛГМ находятся в диапазоне от 90° до 100° (рис. 3.10(а)), что соответствует пороговым значениям между режимами смачивания и несмачивания [100]. Раствор ОС-5 хорошо смачивает лист. При этом необходимо отметить, что значения θ всех жидкостей определены с достаточно высокими доверительными интервалами (до 16 % у эмульсии пенообразователя). Такие большие рассеяния контактных углов, определенных экспериментально, являются, скорее всего, следствием того, что свойства материала листьев не стабильны (изменяются от одного к другому). Это может быть следствием того, что даже листья одного дерева находятся в разном положении относительно солнечного излучения (южная сторона дерева или северная, например). Кроме того, листья могут находиться на разной высоте и, вследствие этого, подвергаются воздействию солнечного излучения разной интенсивности. Например, условия освещения листьев верхних веток на южной стороне дерева существенно отличаются от аналогичных условий для листьев нижних веток северной стороны дерева. В результате поверхности этих листьев будут развиваться с разной интенсивностью и, соответственно, расти с разной скоростью. В конечном итоге поверхности этих листьев могут существенно отличаться по открытой пористости, что должно повлиять на смачиваемость.

Но погрешности определения других геометрических характеристик капель (высоты (h) и диаметра (d)) существенно меньше, потому что h и d (соответственно, и площади поверхности контакта капли с листом) являются по

существованию интегральными характеристиками процесса. Состояние (шероховатость, в первую очередь) поверхности листа на эти характеристики процесса влияет, но в меньшей степени по сравнению с контактным углом.

Известно [144], что длинная углеводородная цепь обеспечивает высокую поверхностную активность пенообразователей по отношению к воде на ее границе с неполярными фазами. Вместе с тем наличие в молекуле пенообразователя полярной группы с высокой гидрофильностью обеспечивает высокую растворимость пенообразователя в воде. Сочетание этих двух факторов – высокой поверхностной активности и высокой растворимости – приводит к снижению поверхностного натяжения воды на границе с воздухом – до 17,3 мН/м. Молекулы поверхностно-активных веществ пенообразователя в адсорбционном слое на гидрофобной твердой поверхности ЛГМ ориентированы углеводородными цепями в сторону подложки, а полярными группами в сторону воды. По мере увеличения концентрации ПАВ в водном растворе растет удельная адсорбция на границе “твердое тело – вода”, и поверхность ЛГМ становится менее гидрофобной [145]. Снижение поверхностного натяжения воды и гидрофилизация ЛГМ приводит к инверсии смачивания – переход от несмачивания поверхности ЛГМ к смачиванию. Несмотря на то, что в состав раствора ОС-5 входит сульфенол (смачиватель), он не оказывает такого сильного влияния на смачивание, как пенообразователь.

На рисунке 3.11 (а–г) представлены зависимости контактного угла, диаметра, высоты и площади капли на границе раздела “жидкость – газ” на поверхности ветки сосны диаметром 6 мм при различных объемах дозирования.

По результатам анализа (рис. 3.11(а)) можно сделать вывод о том, что в диапазоне изменения объема капель от 5 мкл до 25 мкл контактные углы капель воды, раствора бишофита и суспензии бентонита почти не изменяются. Видно, что эти три жидкости почти не смачивают поверхность ветки. Максимальное значение контактных углов (соответствует воде и раствору бишофита) составляет 120°. Минимальное значение θ , также, как и у листьев (рис. 3.10(а)), соответствует эмульсии пенообразователя и составляет 10° (рис. 3.11(а)).

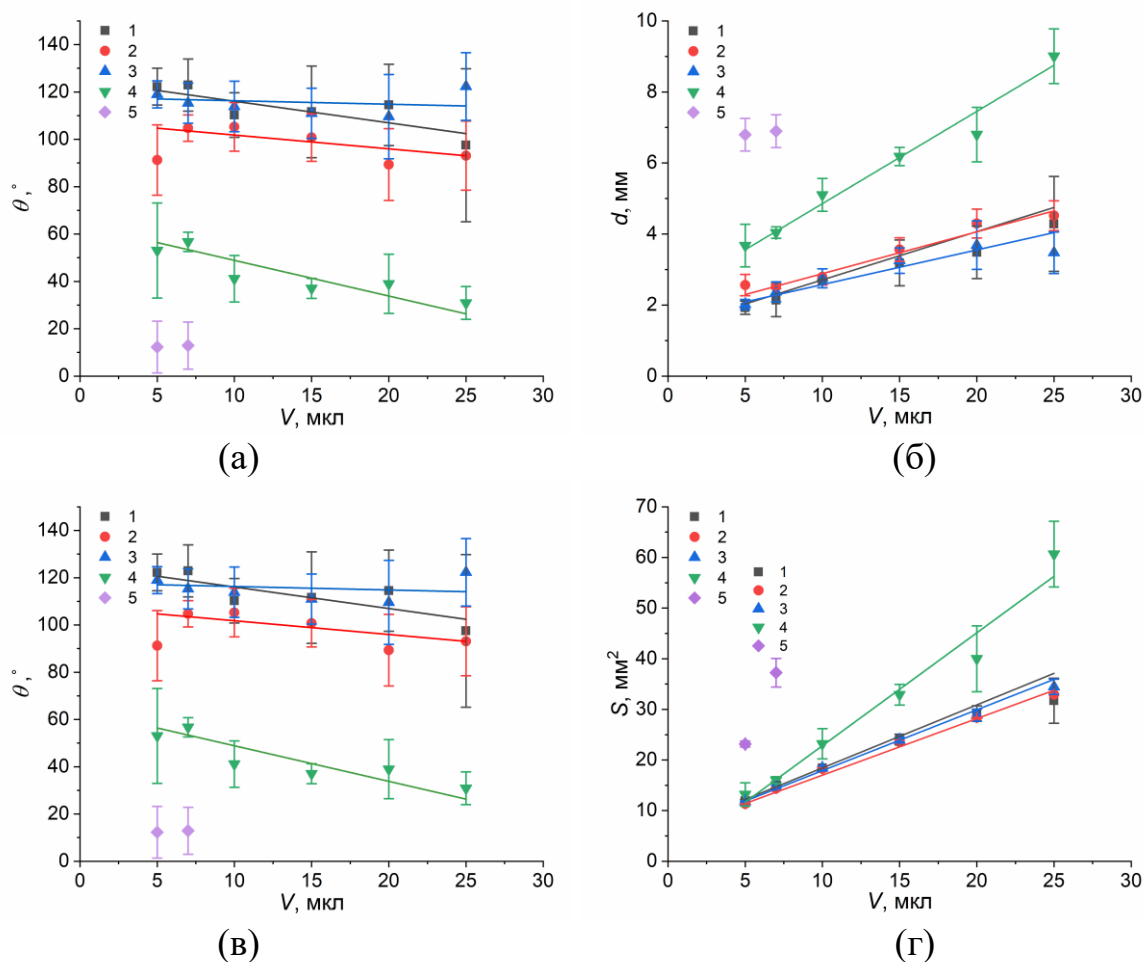


Рисунок 3.11 – Зависимости геометрических характеристик капель огнетушащих составов от объема дозируемой жидкости на поверхности ветки: (а) – контактный угол, (б) – диаметр, (в) – высота, (г) – площадь поверхности капли. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

Контактные углы раствора ОС-5 с увеличением объема от 5 до с 25 мкл уменьшаются от 53° до 31° (рис. 3.11(а)). Можно сделать вывод, что поверхность ветки сосны гидрофильна относительно этих двух жидкостей. Эмульсия и раствор ОС-5 растекаются по поверхности веток, тем самым проникая в более глубокие слои ЛГМ и достигая зоны пиролиза. Контактный диаметр с увеличением объема капли растет линейно (рис. 3.11(б)): от 2,0 до 4,0 мм у воды, раствора бишофита и суспензии бентонита; от 3,5 до 9,0 мм для раствора ОС-5.

Высота капли изменяется нелинейно у воды и суспензии бентонита (рис. 3.11(в)). Сначала она растет с увеличением объема, затем достигает максимума и

остается постоянной. Это связано с тем, что с увеличением массы капли гравитационная сила начинает преобладать над силой поверхностного натяжения. Капля растекается под собственным весом, диаметр и площадь поверхности увеличивается, а высота не изменяется. У раствора бишофита высота капли увеличивается линейно (рис. 3.11(в)), но с учетом доверительного интервала и аналогичного поведения кривых на рис. 3.10(в) можно предположить, что зависимость высоты от объема капель имеет схожий вид с кривыми воды и суспензии бентонита. Как и угол, высота капли раствора ОС-5 уменьшается линейно с увеличением объема (рис. 3.11(в)).

Эксперименты показали, что невозможно измерить контактный угол на поверхности ветки при увеличении объема капли более, чем 7 мкл (для эмульсии пенообразователя) и 25 мкл (вода, суспензии бентонита, раствор бишофита и ОС-5). Так как площадь контакта жидкости с ЛГМ небольшая, а поверхность «цилиндрическая», капля растекалась (эмульсия пенообразователя, раствор ОС-5) или скатывалась с исследуемой поверхности под действием силы тяжести (вода, суспензия бентонита, раствор бишофита).

Также можно отметить, что контактные углы воды, суспензии бентонита и раствора бишофита на поверхности ветки (рис. 3.11(а)) выше, чем на поверхности листа (рис. 3.10(а)), и наоборот, для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя меньшие значения углов установлены при растекании по поверхности ветки. Это может быть связано с большей шероховатостью веток по сравнению с листьями. Достаточно очевидно, что шероховатость оказывает сильное влияние на смачивание [41], причем чем больше шероховатость, тем сильнее проявляются свойства поверхности, обуславливающие «притяжение» или «отталкивание» жидкости. Если жидкость смачивает материал, то при увеличении шероховатости контактный угол уменьшается. И наоборот, если жидкость не смачивает материал, то увеличение шероховатости приводит к росту контактного угла. Огнетушащий состав ОС-5 и пенообразователь обладают низким поверхностным натяжением (табл. 2.2) по сравнению с другими жидкостями. При смачивании поверхности ветки они проникают в углубления коры веток подобно тому, как

жидкость заполняет смачиваемые ею капилляры. Вода, раствор бишофита и суспензия бентонита ($\theta > 90^\circ$) не проникают в углубления коры, что ухудшает смачивание. При дозировании этих трех жидкостей гребни и углубления коры ветки выступают в виде дополнительного энергетического барьера.

На рис. 3.12 представлены значения контактного угла, диаметра, высоты и площади капли на границе раздела “жидкость – газ” на поверхности хвоинки сосны при изменении объемов дозирования от 5 до 10 мкл.

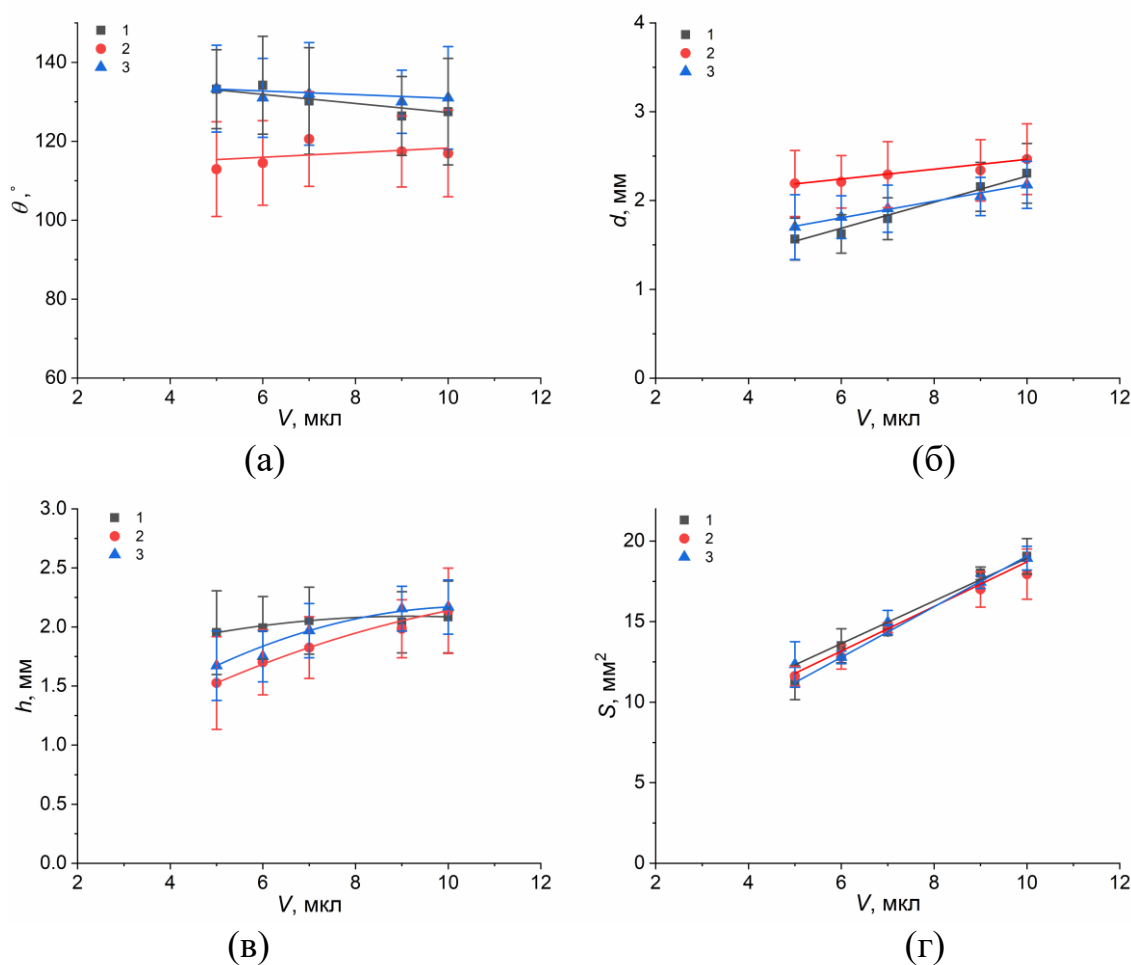


Рисунок 3.12 – Зависимости геометрических характеристик капель огнетушащих составов от объема дозируемой жидкости на поверхности хвоинки: (а) – контактный угол, (б) – диаметр, (в) – высота, (г) – площадь поверхности капли. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита.

В экспериментах установлено, что невозможно измерить контактный угол для капель растворов ОС-5 и пенообразователя на поверхности хвоинки, т.к. капли растекались по её поверхности. Как и в случаях смачивания листьев (рис.

3.10) и веток (рис. 3.11), зависимости геометрических характеристик капель от изменения объема на поверхностях хвоинок (рис. 3.12) имеют схожий характер. На рис. 3.10–3.12 хорошо видно, что объем капель незначительно влияет на значения контактных углов специальных огнетушащих составов (раствор бишофита, суспензия бентонита) и воды при смачивании листьев (5–25 мкл), веток (5–25 мкл) и хвоинок (5–10 мкл).

Известно [146], что энергетический баланс в условиях свободного падения капли жидкости на поверхность имеет вид:

$$E_{kin} + E_{surf} = E_{sprd} + E_{vis} + E_{def}$$

где E_{kin} – кинетическая энергия капли, E_{surf} – начальная энергия капли, E_{sprd} – энергия адгезии, E_{vis} – вязкая диссипация, E_{def} – энергия деформации после удара капли.

В проведенных сериях экспериментов капля огнетушащего состава дозировалась на поверхность ЛГМ (скорость падения капли очень мала – менее 0,5 м/с). В таких условиях можно пренебречь E_{kin} и E_{def} .

Тогда энергетический баланс капли в соответствии с теорией [146] будет иметь вид:

$$E_{surf} = E_{sprd} + E_{vis} \quad (3.1)$$

Подставим выражения для составляющих энергии из [146]:

$$\gamma \pi d_0^2 = \gamma \pi r_m^2 (1 - \cos \theta) - \gamma \pi r_m h_m \sin \theta + \frac{3u}{2h_m} \pi \mu r_m^3 \quad (3.2)$$

где r_m – максимальный радиус растекания капли, h_m – высота капли при ее радиусе r_m ; γ – поверхностное натяжение жидкости; θ – контактный угол; μ – динамическая вязкость жидкости; d_0 – начальный диаметр капли; u – радиальная скорость растекания жидкости по поверхности после осаждения.

Физические свойства жидкости приведены в таблице 2.2. Примем допущение, что капля до контакта с подложкой имеет сферическую форму, тогда $d_0 = (3V_0/4\pi)^{1/3}$. Начальный объем капли V_0 известен и варьировался в диапазоне 5 – 25 мкл. Радиальную скорость жидкости найдем как $u = (2r_m - d_0)/t_m$. Время растекания t_m принимаем равным 20 с (установлено в экспериментах).

Выразим высоту лежащей капли, если она смачивает материал, через ее радиус [147]: $h_m = r_m(1 - \cos \theta) / \sin \theta$. Тогда в уравнении (3.2) всего две неизвестные θ и r_m . Варьируя объемом капли решим уравнение (3.2) методом итераций с использованием среды Mathcad. Сравнение экспериментально полученных контактных углов и диаметров капель специальных огнетушащих составов от объема с вычисленными значениями представлено на рис. 3.13.

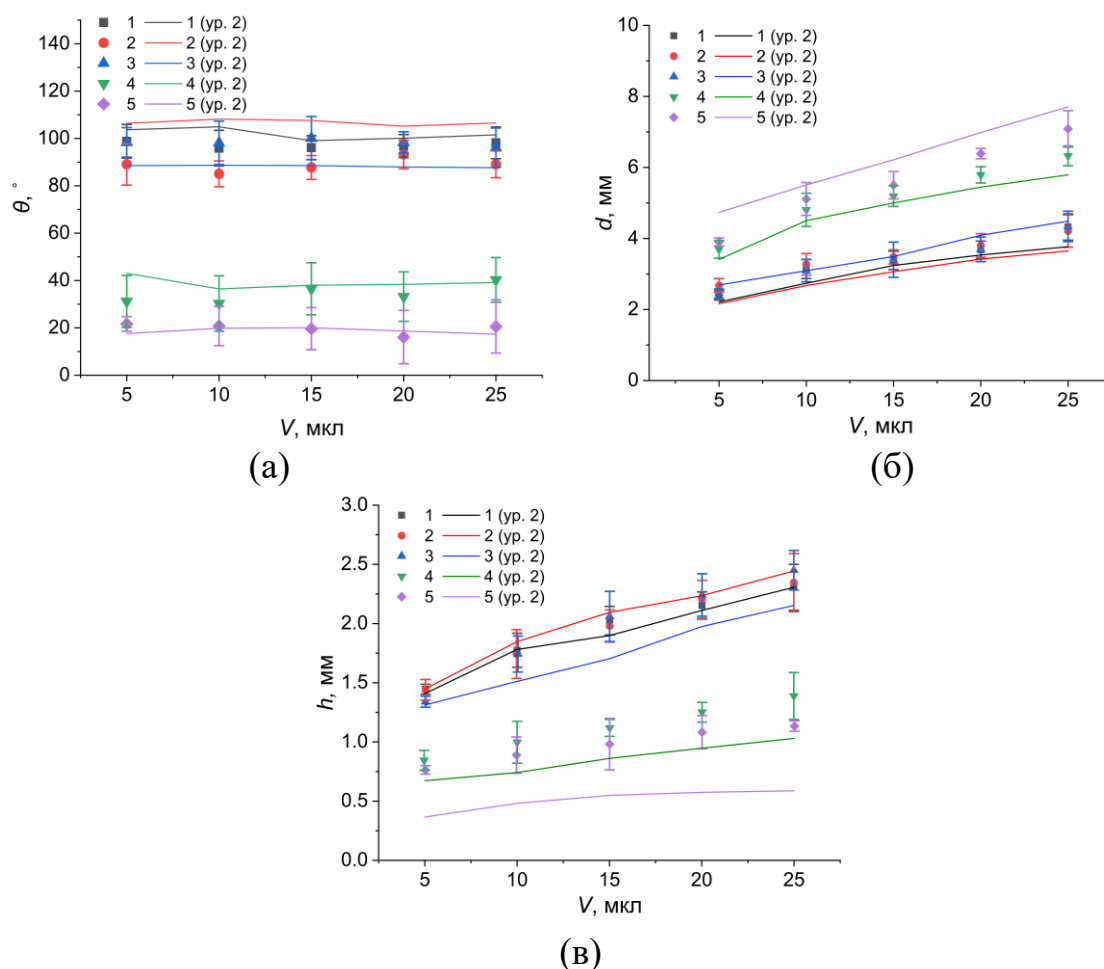


Рисунок 3.13 – Зависимости геометрических характеристик капель огнетушащих составов от объема дозируемой жидкости на поверхности листа: (а) – контактный угол, (б) – диаметр, (в) – высота. Точки – экспериментально установленные значения, линии – вычисленные значения. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

Из рисунка 3.13 видно, что уравнение (3.2) удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости контактного угла. Однако, расчетные зависимости диаметра и высоты от объема для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя лежат вне диапазона доверительного интервала экспериментальных данных. Такие расхождения могут быть связаны с тем, что уравнение (3.2) не учитывает физические и химические свойства поверхности. Известно [148], что однозначную связь объема капли с ее геометрией можно установить на поверхностях с текстурой близкой к молекулярно-гладкой. Реальные поверхности ЛГМ характеризуются разноуровневой многомодальной шероховатостью и химической неоднородностью. Поэтому точно предсказать геометрические характеристики капель на поверхности ЛГМ очень сложно.

Зависимости контактного угла, диаметра и высоты капли от объема дозируемой жидкости на поверхности листа, ветки и хвоинки (рис. 3.10–3.12) аппроксимированы выражениями типа $x = a + b \cdot V$, где x принимает значение θ , d , h ; a , b – эмпирические коэффициенты (табл. 3.1–3.3).

Таблица 3.1 – Значения эмпирических коэффициентов в аппроксимационных выражениях типа $\theta = a + b \cdot V$

	Дистиллированная вода		Суспензия бентонита		Раствор бишофита		Раствор ОС-5		Эмульсия	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
лист	102,40	-0,02	96,11	0,00	102,20	0,00	54,53	0,04	46,28	-0,05
ветка	125,19	-0,91	107,62	-0,58	117,77	-0,15	63,94	-1,51		
иголка	135,54	-0,47	138,76	-1,14	112,42	0,59				

Таблица 3.2 – Значения эмпирических коэффициентов в аппроксимационных выражениях типа $d = a + b \cdot V$

	Дистиллированная вода		Суспензия бентонита		Раствор бишофита		Раствор ОС-5		Эмульсия	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
лист	1,98	0,09	2,35	0,08	2,02	0,09	3,15	0,13	3,09	0,16
ветка	1,35	0,14	1,71	0,11	1,60	0,10	2,26	0,26		
иголка	1,24	0,09	0,81	0,15	1,91	0,06				

Таблица 3.3 – Значения эмпирических коэффициентов в аппроксимационных выражениях типа $h = a + b \cdot V$

	Дистиллированная вода		Суспензия бентонита		Раствор бишофита		Раствор ОС-5		Эмульсия	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
лист	1,21	0,05	1,2	0,05	1,05	0,06	0,71	0,03	0,67	0,02
ветка	1,52	0,05	1,62	0,03	1,39	0,05	1,07	0,01		
иголка	1,86	0,02	0,96	0,11	1,26	0,09				

Ветки и иглы характеризуются неправильной геометрической формой. Капля растекается вдоль их поверхности, образуя форму вытянутого эллипса. На рис. 3.10 и рис. 3.11 приведены результаты измерения большего диаметра такого эллипса. Типичные теневые фотоизображения капли по направлению растекания вдоль поверхности ветки и иглы приведены на рис. 3.9.

Известно [149], что суспензии бентонита и раствор бишофита обладают хорошими огнезащитными свойствами. Анализ зависимостей рис. 3.10–3.12 дает основания для вывода, что суспензия бентонита и раствор бишофита не смачивают ЛГМ. Можно сделать вывод о том, что смачивание не является фактором, влияющим на процесс подавления горения ЛГМ этими жидкостями. Доминирующими механизмами огнетушащего действия суспензии бентонита является экранирующее и изолирующее действие оседающих частиц (на поверхности создается защитный теплоизолирующий слой), препятствующих поступлению теплоты в зону пиролиза горючих материалов и способствующих подавлению процессов их термического разложения (п. 3.2.2). При нанесении раствора бишофита на поверхность древесины ускоряется процесс образования коксового слоя [47]. Эмульсия пенообразователя хорошо смачивает поверхность листьев (рис. 3.10), растекается по веткам (рис. 3.11) и хвоинкам (рис. 3.12), проникая на большие глубины элемента ЛГМ – до зоны пиролиза горючих материалов и охлаждая нагретую до высоких температур поверхность материала, тем самым подавляя процесс генерации горючего – газообразных продуктов термического разложения образца ЛГМ. Ранее установлено [33], что

использование пенообразователей или других добавок (смачивателей, полимеров) увеличивает эффективность тушения и значительно экономит воду (в 2–4 раза). Раствор ОС-5 так же, как и эмульсия пенообразователя, смачивает материал, обеспечивая наилучшую проникаемость в пористую структуру элемента ЛГМ. Кроме того, этот огнетушащий состав обладает свойствами антипирена [115].

Принято считать [5,32,150], что все огнетушащие жидкости по механизму прекращения горения относятся к огнетушащим веществам охлаждения. Однако, на основании результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод о разных механизмах подавления горения ЛГМ четырьмя достаточно типичными специальными составами и условно разделить исследуемые жидкости на две группы. По свойствам плохой смачиваемости к первой группе составов можно отнести воду, суспензию бентонита и раствор бишофита. Но несмотря на высокие и почти идентичные значения θ , эффективности использования этих трех жидкостей существенно отличаются. У воды она существенно ниже (в 2 раза) чем у составов на основе бишофита и бентонита [5,150].

Анализ результатов проведенных экспериментов дает основания для ряда выводов о механизме влияния специальных составов на процесс пиролиза лесных горючих материалов. Первый – и гидрофильные и гидрофобные по отношению к типичным ЛГМ жидкости обеспечивают кратные (в 2–3 раза) повышения эффективности подавления процесса пиролиза ЛГМ по сравнению с водой. Скорее всего, здесь проявляются разные механизмы влияния специальных составов на процессы тепломассопереноса и физико-химические превращения в пористой структуре нагретого до высоких температур лесного горючего материала. Второй – раствор бишофита и суспензия бентонита доходят до зоны пиролиза ЛГМ и в этой зоне происходит их интенсивное испарение с образованием твердых продуктов, которые образуют слой, препятствующий движению газообразных продуктов пиролиза (горючих газов) в окислительную внешнюю среду. Третий – вода же без добавок, скорее всего, просто испаряется с поглощением теплоты, но не препятствует выходу горючих газов из зоны термического разложения. Если принять во внимание, что, как правило, вода

поступает при тушении лесных пожаров в зону термически разлагающегося ЛГМ дискретно во времени и в пространстве (в виде капельного потока), то можно обоснованно предположить, что после испарения одной капли воды температура в слое ЛГМ понижается, но это снижение является, если вода не движется сплошным потоком (что почти всегда нецелесообразно при подавлении горения ЛГМ), кратковременным и локальным. Образовавшийся же после испарения воды из капель раствора бишофита твердый негорючий осадок остается надолго и препятствует развитию процесса пиролиза лесных горючих материалов до полного подавления газофазного горения продуктов этого пиролиза. Ко второй группе можно отнести эмульсию пенообразователя и раствор ОС-5. За счет низкого поверхностного натяжения, эти жидкости смачивают ЛГМ и тормозят процесс его термического разложения.

3.2.2 Испарение капель огнетушащих составов с поверхности ЛГМ

Известно, что для подавления горения лесных горючих материалов недостаточно на какой-то короткий период времени ликвидировать пламенное газофазное горение (например, в результате снижения температуры газов при интенсивном испарении воды) или блокировать поступление в зону газофазного горения окислителя воздуха (например, за счет интенсивного процесса парообразования при испарении больших масс распыленной воды и вытеснении воздуха парами воды из зоны горения). Необходимым условием ликвидации лесного пожара является прекращение процесса поступления в зону горения горючего – газообразных продуктов термического разложения лесных горючих материалов (хвои, листьев, веточек, мха и др.). Для этого необходимо подавить процессы пиролиза ЛГМ, который происходит в условиях лесного пожара в глубине слоя ЛГМ на некотором расстоянии (5–20 мм) от поверхности раздела «ЛГМ–внешняя среда». Поэтому для того, чтобы горение ЛГМ прекратилось, вода (капли) должна пройти через слои ЛГМ, в котором пиролиз завершается до зоны, в которой интенсивно происходит. В этой зоне нет прямого воздействия пламени на материал.

Скорость процесса испарения любой жидкости зависит от температуры поверхности испарения и градиента концентрации паров этой жидкости в тонком слое вблизи поверхности испарения (закон Герца–Кнудсена–Ленгмюра). Условия нагрева (конвекция, излучение, кондукция) не оказывают влияние на скорость испарения, если при смене механизма нагрева остаются постоянными температура поверхности испарения и градиент концентрации паров жидкости. Эксперименты, результаты которых анализируются, выполнялись с целью установления основных закономерностей испарения капель воды и специальных жидких антипиренов при растекании капель этих жидкостей по элементам структуры лесных горючих материалов, расположенным в части слоя ЛГМ, удаленном от поверхности раздела «ЛГМ–внешняя среда» при температурах, близких к температурам начала термического разложения лесного горючего материала. Охлаждение этих элементов или их пропитка, приводящая к полному торможению процесса пиролиза ЛГМ при относительно невысоких температурах, и являются основным средством подавления в конечном итоге горения ЛГМ.

Экспериментально определены времена испарения капель воды и растворов огнетушащих составов при разных температурах поверхности элементов ЛГМ (рис. 3.14).

Для того, чтобы снизить погрешность измерения времен испарения капель огнетушащих составов использовалась термопаста. Без ее использования происходила деформация нагретого листа даже при относительно низких температурах (при взаимодействии с холодной жидкостью в условиях её испарения). К тому же поверхность листа не является идеально ровной, возможны локальные воздушные зазоры между листом и поверхностью нагретой подложки. Поэтому времена испарения одного состава могли отличаться существенно (в два раза) – такие экспериментальные данные выбраковывались. Также большая погрешность могла быть следствием различной смачиваемости разных листьев, т.к. физически невозможно провести все эксперименты по испарению на одной поверхности (образование твердого осадка от капли специальных составов, деформация листа).

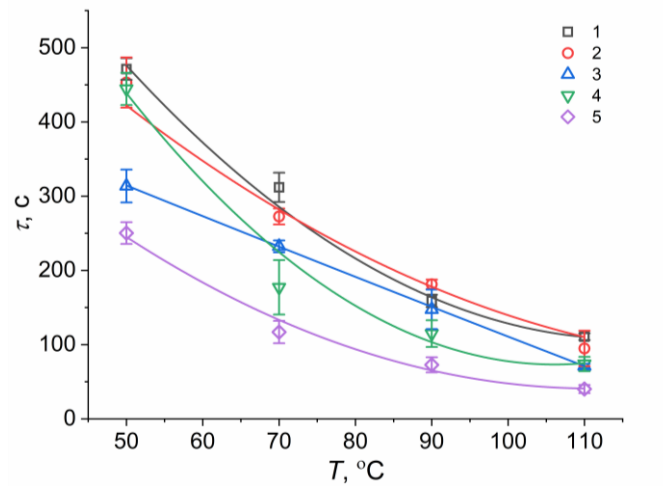


Рисунок 3.14 – Времена испарения капель объемом 10 мкл растворов огнетушащих составов и воды при варьировании температуры поверхности листа. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

Установлено, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) отличаются существенно (например, при $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ вода и эмульсия пенообразователя (рис. 3.14)). С ростом температуры нагрева времена полного испарения капель исследованных составов становились сопоставимыми (рис. 3.14). Это связано с тем, что при повышении температуры нагрева подложки до значений, близких к температуре кипения воды (основного компонента исследованных специальных составов) формировалась буферная паровая зона между каплей и подложкой. Она снижала тепловой поток вследствие существенно меньшей теплопроводности и температуропроводности паров по сравнению с жидкостью и твердой стенкой. Соответственно, отличия времен существования исследованных капель снижались.

На рис. 3.15 приведены типичные зависимости контактного угла (а) и диаметра (б) во времени при испарении капли при температуре поверхности листа $50\text{ }^\circ\text{C}$.

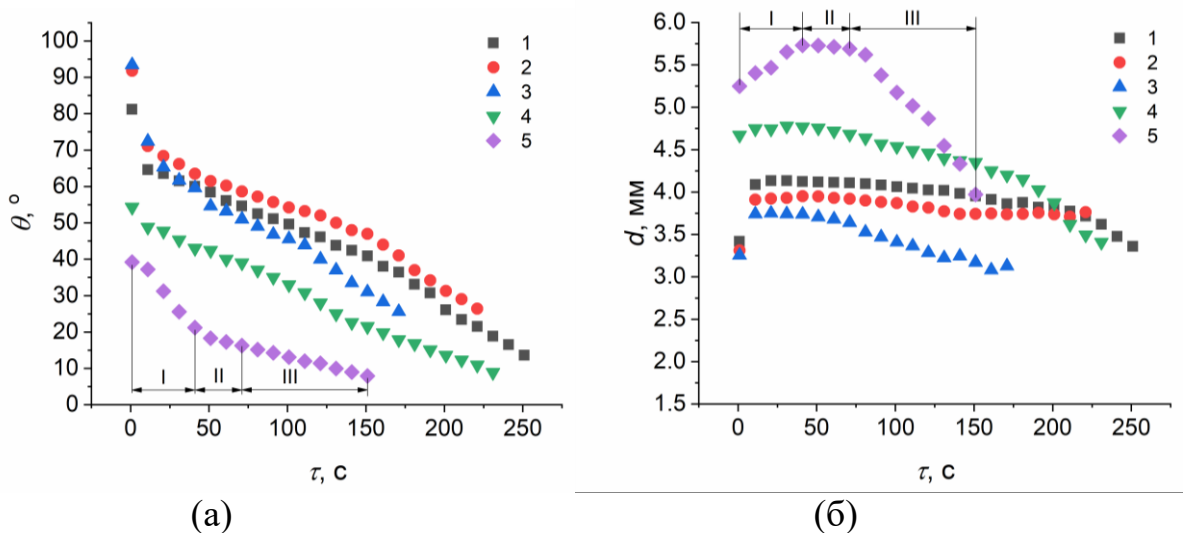


Рисунок 3.15 – Типичные зависимости контактного угла (а) и диаметра (б) во времени при испарении капли при температуре поверхности листа 50 °С. Жидкости: FR1 – вода; FR2 – суспензия бентонита; FR3 – раствор бишофита; FR4 – раствор ОС-5; FR5 – эмульсия пенообразователя. Режимы испарения: I – увеличение площади капли; II – режим пиннинга; III – режим прилипания-проскальзывания.

Из рис. 3.15 видно, что с увеличением температуры характер зависимостей постоянен, изменяется только время испарения. Условно можно выделить три режима испарения капель воды, растворов бишофита и ОС-5, эмульсии пенообразователя. Первый режим испарения характеризуется увеличением площади капли. При помещении капли всех исследуемых составов в начальный момент времени жидкость прогревалась, поверхностное натяжение жидкости уменьшалось, тем самым происходило растекание капли (уменьшение контактного угла и увеличение контактного диаметра). Затем капля занимала наиболее устойчивое положение и диаметр оставался постоянным – режим пиннинга. Третий режим – режим прилипания-проскальзывания – быстрая смена пиннинга и депиннинга контактной линии. При испарении воды (растворителя) более чем на 50 % для эмульсии пенообразователя и 70 % для воды, растворов бишофита и ОС-5 под действием поверхностного натяжения диаметр капли уменьшается. В случае испарении капли бентонита наблюдается только два режима испарения – увеличение площади капли и пиннинг. Это связано с тем,

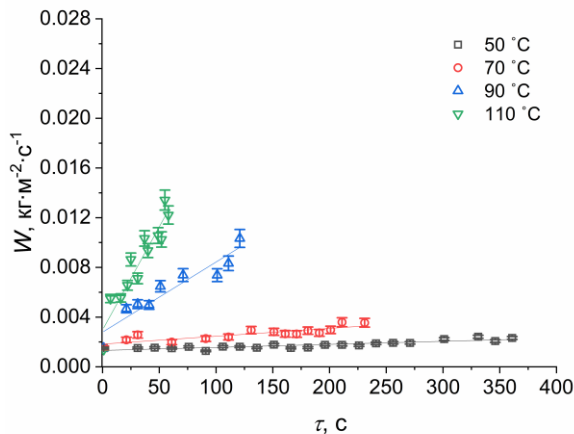
что при выпаривании растворителя вязкость суспензии значительно увеличивается по сравнению с другими составами. Известно, что увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению интенсивности внутренней конвекции и усиливает пиннинг контактной линии.

Удельная массовая скорость испарения капель воды и специальных составов рассчитывалась по формуле:

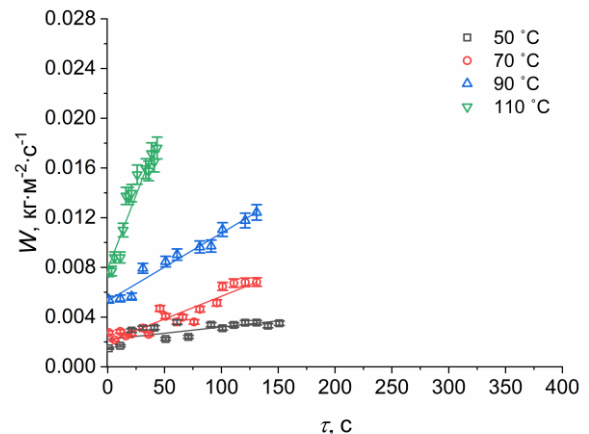
$$W_{ES} = \frac{\rho \cdot (V_i - V_{i+1})}{\Delta\tau \cdot (S_i + S_{i+1}) / 2}, \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

где ρ – плотность жидкости, V_i , V_{i+1} , S_i , S_{i+1} – объем (м^3) и площадь поверхности капли (м^2) в момент времени τ_i и τ_{i+1} (с), соответственно.

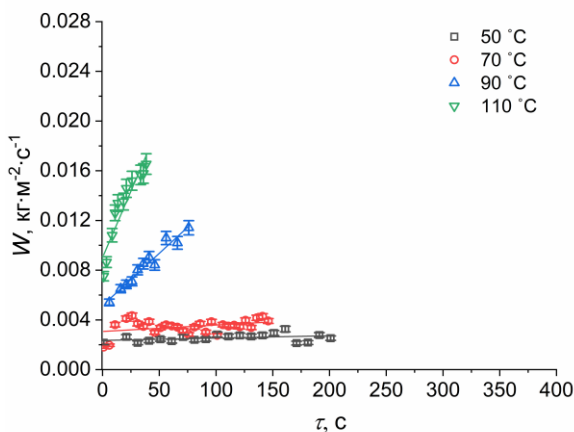
На рис. 3.16 представлены зависимости удельных скоростей испарения капель воды и огнетушащих составов объемом 10 мкл на поверхностях лесного горючего материала.



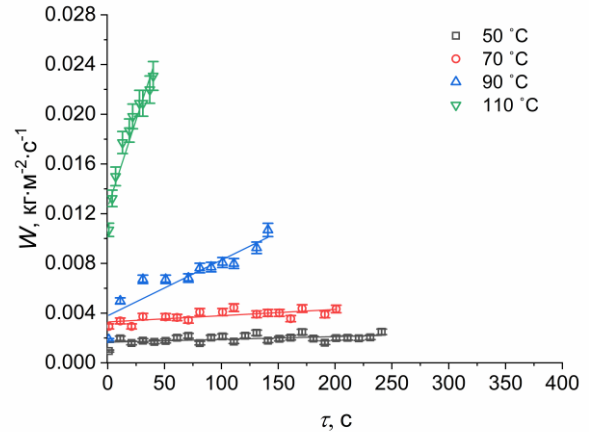
(a)



(б)



(в)



(г)

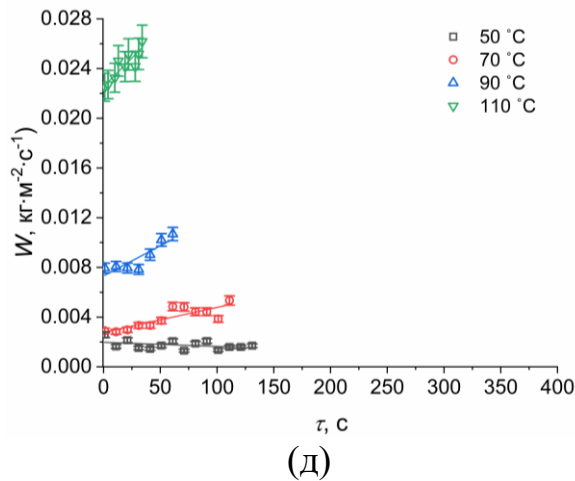


Рисунок 3.16 – Зависимости удельных скоростей испарения капель от времени при разных температурах поверхности листа. Жидкости: дистиллированная вода (а), суспензия бентонита (б), растворы бишофита (в) и ОС-5 (г) и эмульсия пенообразователя (д).

Из рис. 3.16 видно, что в условно выделенной первой группе жидкостей (вода, суспензия бентонита, раствор бишофита) максимальные значения скорости испарения соответствуют суспензии бентонита (рис. 3.16(б)). Это можно объяснить тем, что значения теплопроводности у суспензии выше, чем других исследованных жидкостей [115]. Частицы бентонита аккумулируют «тепло» и передают воде, тем самым испарение происходит интенсивнее. При температуре поверхности 50–90 °C кривые удельных скоростей испарения имеют схожий вид, но скорость испарения у раствора бишофита незначительно выше ($\approx 10\%$). С ростом температуры до 110 °C разница в скоростях испарения воды и бишофита достигает 25 %. Это может быть связано с тем, что солевой раствор обладает наименьшей теплоемкостью по сравнению с водой. Несмотря на то, что теплоемкость раствора ОС-5 ниже, а теплопроводность выше теплопроводности эмульсии пенообразователя при температуре поверхности от 50 до 90 °C, значения скоростей испарения практически идентичны. Это может быть связано со свойствами смачиваемости этих жидкостей. У пенообразователя зарегистрирован значительно меньший угол по сравнению с раствором ОС-5 при испарении (эмульсия – 38°, ОС-5 – 55°), а значит и большие поверхности

испарения и взаимодействия с нагретой поверхностью. К тому же, как известно, с увеличением температуры поверхностное натяжение жидкости уменьшается, тем самым способствуя еще большему растеканию капли и росту скорости испарения. Но в случае воды, суспензии бентонита и раствора бишофита ($\theta > 90^\circ$), температура не оказывает такое сильное влияние на поверхностное натяжение. Капли не смачивают материал и прогреваются медленно. Этим объясняется меньшие значения удельной скорости испарения.

Практически линейная зависимость удельных скоростей испарения капель воды от времени (рис. 3.16(а)) обусловлена тем, что с течением времени повышается температура капли. Соответственно, увеличивается скорость фазового перехода – испарения воды. Подъему температуры способствуют процессы термогравитационной конвекции в капле, скорость которой в рассматриваемых условиях больше скорости кондуктивных процессов. Нагретые в прилегающем к границе раздела «капля – твердое тело» слое молекулы воды поднимаются вверх к поверхности испарения, а относительно «холодные», расположенные вблизи этой поверхности, опускаются вниз. Таким образом, происходит перемешивание «теплых» и «холодных» слоев воды в капле, приводящее к росту ее средней температуры, а также температуры поверхности испарения. Т.к. капля испаряется в режиме пиннинга (площадь контакта почти постоянна), то контактный угол уменьшается.

При нагреве капель водных растворов огнетушащих составов (в идентичных условиях подвода теплоты) происходят существенно более сложные процессы. Капли суспензии бентонита (рис. 3.16(б)), растворов ОС-5 (рис. 3.16(г)) и бишофита (рис. 3.16(в)) испаряются аналогично капле воды (рис. 3.16(а)) в режиме прогрева, т.е. линейно, но при этом после выхода паров воды остается твердый осадок (бентонит, диамонийфосфат + карбамид, кристаллы соли $MgCl_2$), концентрация которого с ростом времени увеличивается. При испарении капель растворов бишофита (рис. 3.16(в)) и ОС-5 (рис. 3.16(г)) капля постепенно покрывается кристаллической пленкой соли, которая препятствует испарению воды. Можно предположить, что при дальнейшем испарении общая скорость

фазовых превращений, несмотря на рост температуры, перестает увеличиваться вследствие снижения площади поверхности испарения. При больших перегревах вокруг капли образуется оболочка из кристаллов солей $MgCl_2$ и диамонийфосфата + карбамида. В результате процесс испарения почти прекращается, формируется в конечном итоге двухслойная структура каплеобразной формы (внутренняя часть – неиспарившийся раствор огнетушащего состава, внешняя часть – своеобразная оболочка, сформировавшаяся из кристаллов).

Для каждой из пяти жидкостей можно построить свое уравнение типа $\tau_{исп} = a + b \cdot T + c \cdot T^2$ (рис. 3.14), и $W_{ES} = a + b \cdot \tau$ (рис. 3.16). Эмпирические коэффициенты для этих уравнений приведены в таблицах 3.4–3.5.

Таблица 3.4 – Значения эмпирических коэффициентов в аппроксимационном выражении $\tau_{исп} = a + b \cdot T + c \cdot T^2$

Жидкость	a	b	c
Дистиллированная вода	1252,1	-19,8	0,090
Суспензия бентонита	526	-4,3	0,002
Раствор бишофита	931,7	-12,5	0,045
Раствор ОС-5	1381,49	-24,7	0,116
Эмульсия	716,12	-12,2	0,055

Таблица 3.5 – Значения эмпирических коэффициентов в аппроксимационном выражении $W_{ES} = a + b \cdot \tau$

$t, ^\circ C$	Дистиллированная вода		Суспензия бентонита		Раствор бишофита		Раствор ОС-5		Эмульсия	
	$a \cdot 10^{-3}$	b	$a \cdot 10^{-3}$	b	$a \cdot 10^{-3}$	b	$a \cdot 10^{-3}$	b	$a \cdot 10^{-3}$	b
50	1,32	$2,45 \cdot 10^{-6}$	2,20	$9,99 \cdot 10^{-6}$	2,35	$1,89 \cdot 10^{-6}$	1,66	$2,26 \cdot 10^{-6}$	1,97	$3,34 \cdot 10^{-7}$
70	1,83	$6,32 \cdot 10^{-6}$	2,02	$3,65 \cdot 10^{-6}$	3,07	$2,41 \cdot 10^{-6}$	3,29	$5,02 \cdot 10^{-6}$	2,77	$2,01 \cdot 10^{-5}$
90	2,79	$5,64 \cdot 10^{-5}$	5,31	$3,62 \cdot 10^{-6}$	5,16	$6,35 \cdot 10^{-6}$	3,79	$4,48 \cdot 10^{-5}$	7,32	$4,84 \cdot 10^{-5}$

Установленные закономерности процессов испарения капель воды и специальных составов с поверхности лесного горючего материала подтверждают сформулированные выше гипотезы о механизмах подавления горения ЛГМ водой и растворами, эмульсиями и суспензиями на основе воды. Присутствие в растворе, эмульсии или суспензии – компоненты, переходящей после испарения

воды в твердое состояние (например, соль после выпаривания и кристаллизации) обеспечивает, или «запирание» газообразных продуктов термического разложения в зоне пиролиза в результате образования слоя конденсированного вещества на верхней границе этой зоны, или смачивание приповерхностного слоя элемента ЛГМ (например, хвоинки) и торможение процесса термического разложения последнего в результате изменения компонентного состава этого слоя.

3.3 Испарение капель огнетушащих составов на поверхностях меди и стали

Эксперименты по определению характеристик процессов смачивания и испарения капель специальных составов на поверхностях элементов лесных горючих материалов очень сложны и трудоемки. Поэтому целесообразна проверка возможности прогноза характеристик испарения по результатам экспериментов с каплями специальных составов на поверхностях металлов в идентичных условиях нагрева. Проведены эксперименты по исследованию испарения капель огнетушащих составов на поверхностях металлов (M_1 , M_{46} , M_{269} , $Ст_1$, $Ст_{46}$ и $Ст_{269}$). Экспериментально определены времена испарения капель специальных огнетушащих составов при разных температурах поверхности металлов (рис. 3.17).

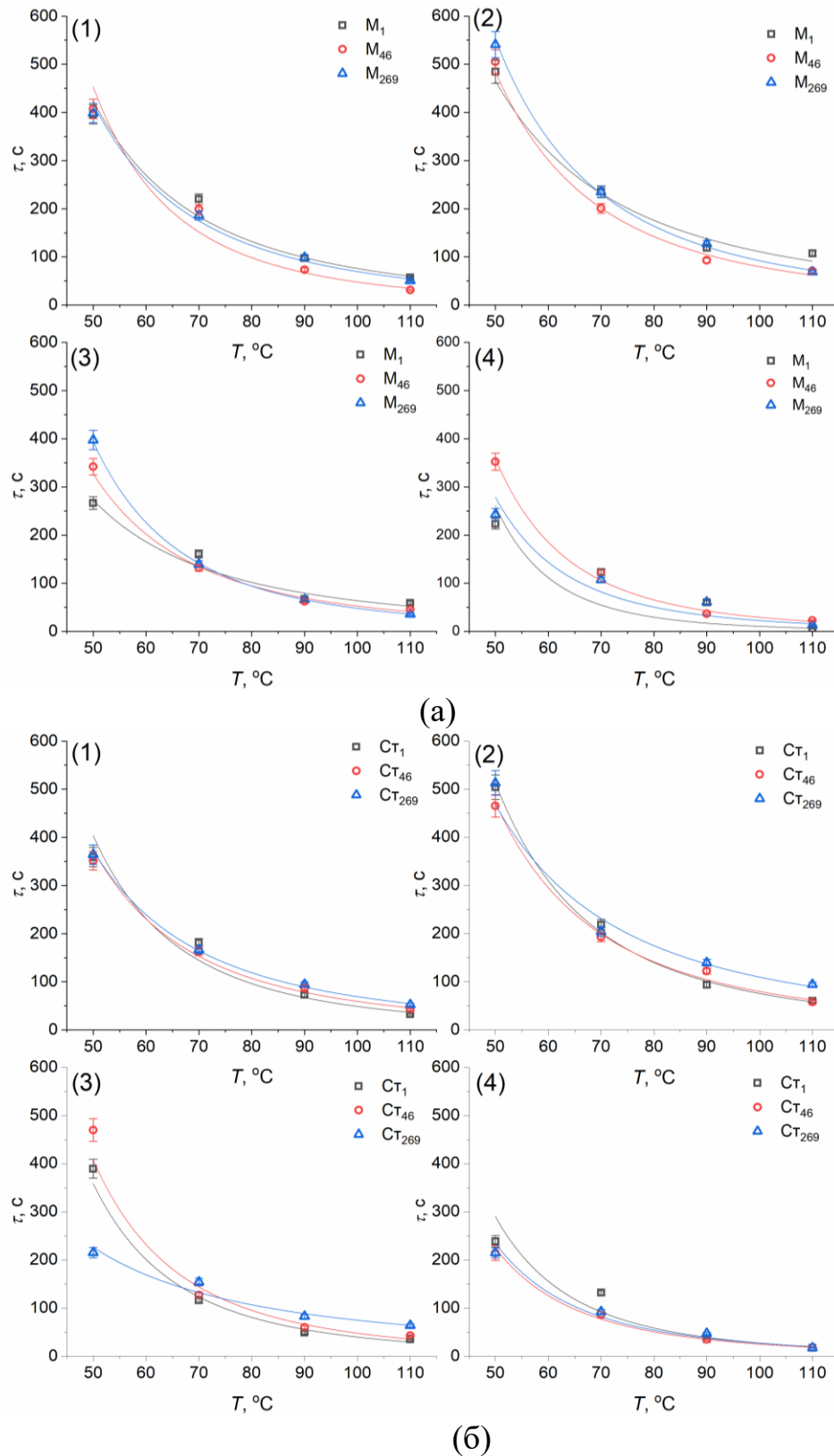


Рисунок 3.17 – Времена испарения капле объемом 10 мкл огнетушащих составов при варьировании температуры поверхности меди (а) и стали (б). Жидкости: 1 – суспензия бентонита; 2 – раствор бишофита; 3 – раствор ОС-5; 4 – эмульсия пенообразователя.

Зависимости времен испарения капель огнетушащих составов от температуры поверхностей меди (M_1 , M_{46} , M_{269}) и стали ($Ст_1$, $Ст_{46}$ и $Ст_{269}$) (рис. 3.17) имеют схожий вид с зависимостями на рис. 3.14. При сравнении времен полного испарения капель огнетушащих составов на поверхности элементов ЛГМ и металлов (рис. 3.14 и 3.17) при малой температуре ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) видно, что на поверхности $Ст_{269}$ значения времен испарения принимают схожие значения. Расхождения не превышают 14,4 %. Зависимости геометрических характеристик капель (контактный угол и диаметр капли) от времени их испарения (рис. 3.18) при температуре поверхности $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ образца $Ст_{269}$ также имеют схожий вид с зависимостями на рис. 3.15.

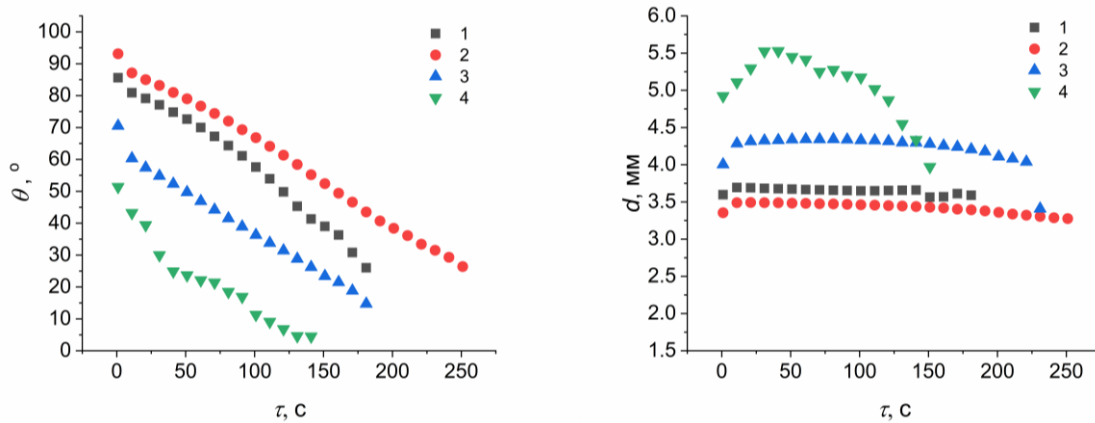
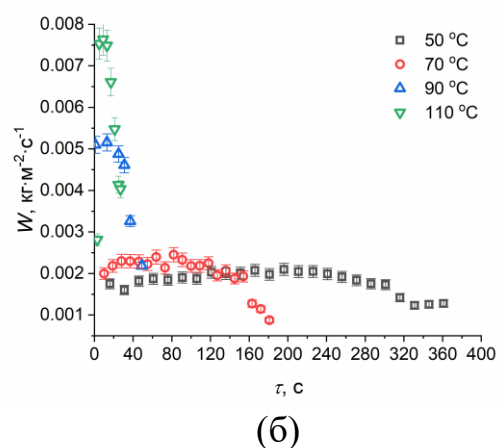
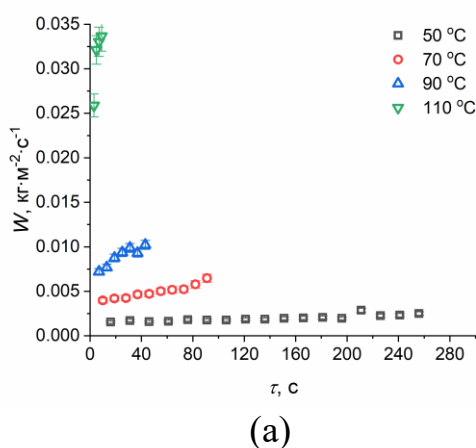


Рисунок 3.18 – Типичные зависимости контактного угла (а) и диаметра (б) от времени при испарении капли при температуре поверхности образца $Ст_{269}$ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Жидкости: 1 – суспензия бентонита; 2 – раствор бишофита; 3 – раствор ОС-5; 4 – эмульсия пенообразователя.

Как видно из рис. 3.18 контактные углы и диаметры на образце $Ст_{269}$ незначительно превышают значения этих же величин по сравнению с рис. 3.15. При испарении капель огнетушащих составов на поверхности стали (рис. 3.18), также, как и на поверхности элементов ЛГМ (рис. 3.15), можно выделить аналогичные режимы испарения. С ростом температуры, расхождения между значениями времен испарения на поверхностях элемента ЛГМ и образца $Ст_{269}$ в идентичных условиях увеличиваются (при температуре поверхности $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения времен испарения капель огнетушащих составов на поверхности ЛГМ

превышают почти в 2 раза). Это может быть вызвано несколькими причинами. Теплопроводность листа березы не превышает 1 Вт/(м·К) [114], тогда как теплопроводность стали равна 16 Вт/(м·К). Поскольку отвод тепла от капли вглубь подложки зависит от теплофизических свойств подложки, он может оказывать сильное влияние на скорость испарения капли. Подложка с более высокой теплопроводностью, отводит больше теплоты от капли и, следовательно, снижает ее температуру и скорость испарения. При испарении капли температура поверхности, на которой она испаряется, уменьшается. Когда скорости испарения капель малы, подложка (теплофизические свойства, толщина) слабо влияет на испарение. По мере увеличения перепада температур (разница между температурами окружающей среды и поверхностью капли) влияние подложки на испарение капель становится все более значимым.

На рисунке 3.19 представлены зависимости удельных скоростей испарения капель огнетушащих составов объемом 10 мкл на поверхности Ст₂₆₉. Сравнивая значения удельных скоростей испарения всех жидкостей (рис. 3.16 и 3.19) контактных углов (рис. 3.15 и 3.18) и времен испарения (рис. 3.14 и 3.17) можно сделать вывод, что при испарении капель огнетушащих составов (суспензии бентонита, эмульсии пенообразователя, растворов бишофита и ОС-5) на поверхностях элементов ЛГМ и стали Ст₂₆₉ в условиях умеренного нагрева (50 °С), при прочих равных условиях (свойства смачиваемости, температура и влажность окружающей среды), характеристики испарения специальных огнетушащих составов почти идентичны.



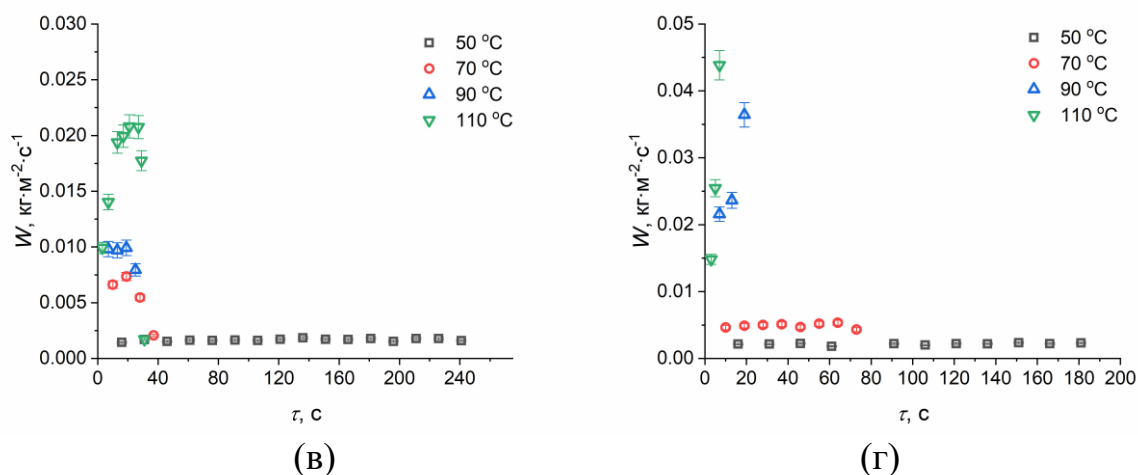


Рисунок 3.19 – Зависимости удельных скоростей испарения капель от времени при разных температурах поверхности Ст₂₆₉. Жидкости: суспензия бентонита (а), растворы бишофита (б) и ОС-5 (в) и эмульсия пенообразователя (г).

Можно сделать вывод о том, что характеристики испарения капель огнетушащих составов на поверхностях элементов лесных горючих материалов могут быть адекватно (с отклонениями до $\pm 15\%$) оценены по результатам экспериментов по испарению этих составов на поверхности стали Ст₂₆₉ при умеренных температурах. При высоких температурах скорости испарения исследовавшихся специальных составов с поверхностей элементов ЛГМ и металлов отличаются значительно.

3.4 Испарение капель огнетушащих составов при кондуктивном, конвективном и радиационном подводе тепла

На рисунках 3.20–3.22 приведены результаты регистрации времен полного испарения капель исследованных составов в условиях варьирования температуры нагрева при трех схемах подвода энергии к ним [115]. Также представлены значения установленных в экспериментах скоростей испарения W_{cp} с использованием зарегистрированных времен τ . Для всех составов установлены нелинейные (описываются степенными полиномами и экспоненциальными выражениями) зависимости τ и W_{cp} от T , что хорошо соответствует результатам экспериментов для воды, приведенным в [117]. При нагреве на подложке и в

муфельной печи отличия экспериментальных значений W_{cp} для воды от данных [117] в целом соответствуют доверительным интервалам проведенных экспериментов. Наибольшее рассеяние значений скоростей испарения капель воды зарегистрировано при нагреве в потоке воздуха (рис. 3.21). Это обусловлено тем, что при размещении капель исследованных составов на держателе площадь контакта с ним была больше, чем в экспериментах [117] примерно на 15–17 % (оценки выполнены по методике [151]). Соответственно, времена полного испарения капель в [117] были выше, а скорости испарения ниже, что и видно на рис. 3.21. Увеличение данной площади контакта было выполнено за счет небольшого закругления конечного участка держателя. Необходимость модификации наконечника была вызвана тем, что в отличие от [117] использовались капли с разными реологическими характеристиками. При использовании наконечника, аналогичного [117], капли эмульсии пенообразователя и раствора ОС-5 срывались с его поверхности в процессе перемещения координатным механизмом или растекались практически полностью, т.е. сложно было регистрировать значения скоростей уменьшения радиусов капли и, соответственно, скоростей испарения. Отличие площади контакта капли с держателем от [117] приводило к отличию формы и, соответственно, средних размеров в условиях натекания потока воздуха. Это связано с тем, что натекающий поток воздуха прижимал каплю к держателю. Поэтому особенности взаимодействия капель с внешней средой целесообразно учитывать при сравнении ранее полученных значений τ и W_{cp} [117] для воды и в настоящей работе в схеме с нагревом в потоке воздуха (рис. 3.21). В экспериментах с муфельной печью этот фактор проявлялся слабо. Поэтому отличия полученных результатов от характеристик приведенных в [117] незначительны (рис. 3.22) – в пределах случайных погрешностей выполненной регистрации варьируемых и контролируемых параметров.

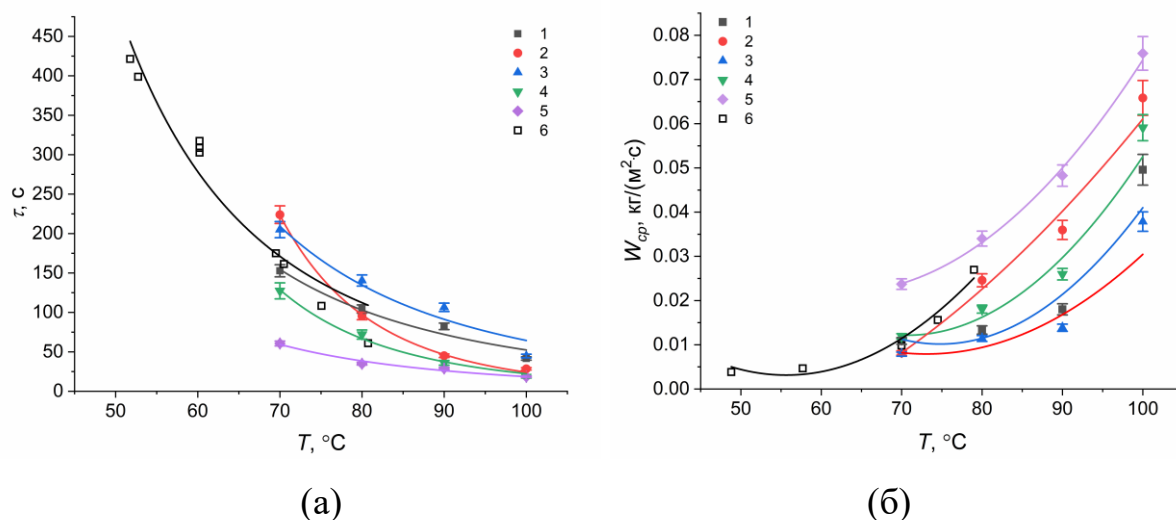


Рисунок 3.20 – Зависимости времени существования капле (а) и скоростей парообразования (б) от температуры подложки. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя; 6 – вода [117].

По результатам выполненных экспериментов для трех схем нагрева и исследованных составов зарегистрирован общий вид зависимостей $\tau(T)$ и $W_{cp}(T)$ (рис. 3.20–3.22). В частности, максимальные значения времен полного испарения (соответственно, минимальные значения скоростей испарения) соответствовали воде и солевому раствору. Максимальные же значения скоростей испарения зарегистрированы в экспериментах с эмульсией пенообразователя и раствором ОС-5. Для суспензии бентонита были характерны средние значения скоростей парообразования относительно эмульсии, растворов и воды без примесей. Установленные закономерности можно объяснить влиянием группы свойств и эффектов, проявляемых в проведенных экспериментах. Так как в зависимости от исследованной схемы нагрева регистрировались разные синергетические эффекты, то целесообразно отличия кривых на рис. 3.20–3.22 проанализировать отдельно для каждой из этих схем.

На рис. 3.20 приведены результаты экспериментов с размещением капель исследованных составов на разогретой подложке. Можно выделить несколько значимых результатов:

1. Скорости испарения солевого раствора ниже, чем у воды и других исследованных огнетушащих составов. Чем выше температура нагрева, тем значительнее разница скоростей испарения. Даже при добавлении 5–10 % бишофита отличия скоростей испарения могут достигать 20–25 %. Это обусловлено влиянием группы факторов. В частности, при испарении капли солевого раствора бишофита ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + добавки) локально на свободной поверхности образовывалась тонкая кристаллическая пленка. Со временем она покрывала практически всю каплю. Соответственно, уменьшалась площадь испарения. Кроме того, известно, что для водных растворов солей с повышением их концентрации теплота парообразования увеличивается. Соответственно, повышается количество подводимой энергии, необходимой для полного испарения. Также целесообразно учитывать, что поверхностное натяжение солевого раствора выше, чем у воды. Это снижает площадь контакта капли с разогретой подложкой при растекании по ней. Поэтому времена испарения солевого раствора бишофита были максимальными (рис. 3.20).

2. Минимальные времена существования и максимальные скорости испарения, соответственно, регистрировались в экспериментах с каплями эмульсий пенообразователя. Это обусловлено, главным образом, значительно (в несколько раз) меньшим поверхностным натяжением эмульсии пенообразователя по сравнению с другими исследованными составами. Поэтому значения контактного угла для капель эмульсии составили 22,6 градуса. Как следствие, достигалась наибольшая площадь взаимодействия с подложкой и, соответственно, максимальные скорости испарения. Для раствора ОС-5 значения поверхностного натяжения выше, чем у эмульсии, но по сравнению с водой, суспензией бентонита и солевым раствором этот параметр существенно (практически в 2 раза) ниже. Как следствие, контактные углы и времена полного испарения были близки к аналогичным характеристикам для эмульсии пенообразователя.

3. При сравнении времен полного испарения воды и суспензии бентонита можно отметить меньшие значения W_{cr} для последней. Это обусловлено влиянием нескольких механизмов. Основной из них связан с большей теплопроводностью и

плотностью, меньшей теплоемкостью и, соответственно, большей температуропроводностью суспензии. Также можно отметить выделенную по результатам видеорегистрации закономерность агломерирования частиц порошка бентонита в разных частях капли. Это способствовало тому, что возрастала площадь поверхности испарения воды, так как увеличивалась площадь границы контакта с нагретыми частицами, осаждающимися на поверхности подложки. В тоже время для экспериментов с каплями суспензии на подложке зарегистрированы максимальные флуктуации времен полного испарения и скоростей фазовых превращений. Это связано с важной закономерностью, которая установлена при анализе кадров видеограмм. Твердые частицы в капле при ее испарении агломерировались достаточно хаотично, удерживая (закрывая) между собой разный объем воды. Так как за счет данных эффектов нередко нарушалась симметричность капли суспензии на подложке, то при усреднении результатов вычислений радиусов были отмечены несколько большие флуктуации, чем в экспериментах с другими составами. Можно также отметить, что в случае добавления 10 % порошка бентонита в капле воды не проявлялись свойственные увлажненному бентониту эффекты разбухания. Но эта добавка представляет природный минерал глинистого характера с высокой связующей способностью, которая приводит к абсорбции. Этим также можно объяснить достаточно интенсивное удерживание воды между частицами порошка бентонита.

4. Следует отметить, что с ростом температуры нагрева средние времена полного испарения капель исследованных составов становились сопоставимыми. Это связано с тем, что при повышении температуры нагрева подложки до значений, близких к температуре кипения воды – основного компонента исследованных капель, формировалась буферная паровая зона между каплей и подложкой. Она снижала тепловой поток вследствие существенно меньшей теплопроводности и температуропроводности паров по сравнению с жидкостью и твердой стенкой. Соответственно, отличия времен существования исследованных капель снижались.

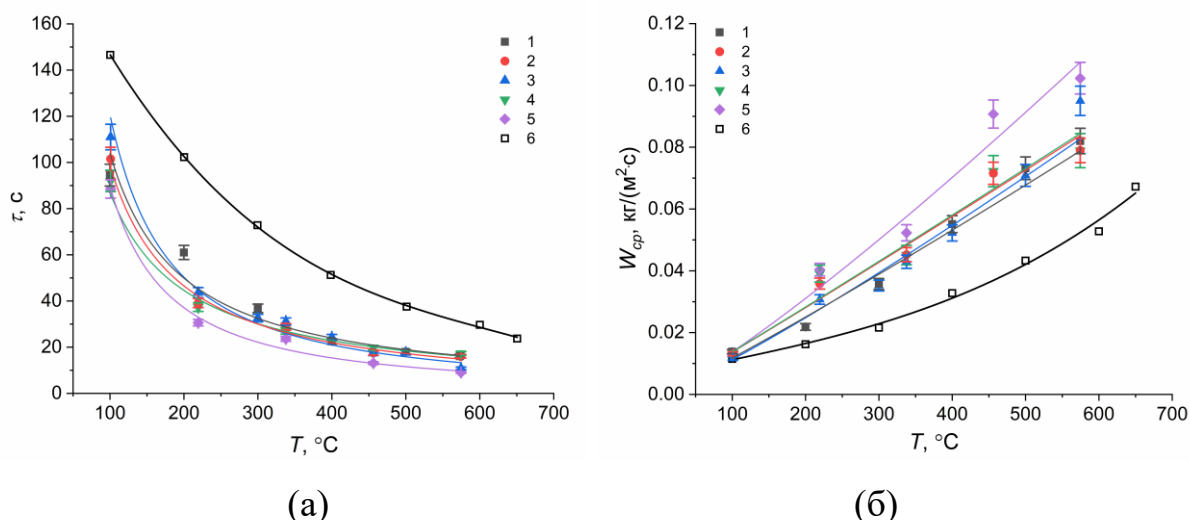


Рисунок 3.21 – Зависимости времен существования каплей (полного испарения) (а) и скоростей парообразования (б) от температуры воздушного потока. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя; 6 – вода [117].

Отмеченные выше флуктуации значений t_d и W_{cp} , как функций от T_a , в экспериментах с доминирующим конвективным теплообменом (рис. 3.21) были еще значительнее. Это обусловлено тем, что натекающий на капли поток воздуха приводил к трансформации их поверхности и более существенным отклонениям от сферической формы (ближе к эллипсоидальной). В целом установленные тенденции расположения кривых относительно друг друга аналогичны рис. 3.20 (максимальные значения скоростей испарения соответствуют эмульсии и раствору с пониженными поверхностными натяжениями, минимальные – раствору соли и воде без примесей), но отклонения значений t_d и W_{cp} существенно меньше. Это связано с тем, что в отличие от подложки при использовании держателей и обдуве потоком воздуха влияние фактора растекания капли несколько ослабевало. Более существенная доля энергии подводилась со стороны свободной поверхности капли. Поэтому важную роль играли теплофизические свойства жидкостных составов. Чем выше теплопроводность, тем быстрее прогревались капли и до более высоких температур. Как следствие, скорость испарения росла.

Следует отметить, что еще одним важным фактором, приводящим к высоким скоростям прогрева и испарения капель эмульсий пенообразователя, является существенное снижение вязкости при нагреве. В случае конвективного нагрева этот фактор проявляется особенно значимо и связан с тем, что скорости внутрикапельной конвекции зависят от геометрического (размер), теплового (температура) и аэродинамического (скорость натекающего потока) факторов [152]. Анализ данных (таблица 2.2) показывает, что фактор снижения вязкости при нагреве наиболее значим для эмульсий пенообразователя. Поэтому в условиях идентичных размеров капель и скоростей натекающего потока воздуха можно сделать вывод о больших скоростях внутрикапельной конвекции для эмульсий. В экспериментах с каплями воды [152] показано, что интенсификация конвекции приводит к росту температуры капли и повышению скоростей испарения. Поэтому данный фактор способствовал дополнительному росту скорости испарения в случае эмульсий пенообразователя.

Основным отличием установленных в экспериментах с нагревом в муфельной печи капель жидкостей от результатов исследований при использовании схемы с потоком воздуха (рис. 3.21) и подложкой (рис. 3.20) можно считать довольно низкие значения скоростей испарения капель раствора ОС-5. В схемах с нагревом в потоке воздуха и на подложке скорости испарения капель данного состава были близки к значениям аналогичного параметра для эмульсии пенообразователя. Ключевое отличие условий испарения при нагреве в муфельной печи состояло в том, что капля раствора густела и покрывалась кристаллической пленкой. При нагреве в потоке воздуха и на подложке формирование такой пленки не регистрировалось. Скорее всего, это связано с существенной трансформацией поверхности капли и слоев (вследствие внутрикапельной конвекции) за счет натекающего потока воздуха в случае конвективного нагрева и при взаимодействии с подложкой. Формирование кристаллической пленки связано со специфическими свойствами раствора ОС-5. Одно из них заключается в создании теплоизоляционного слоя для горящих конструкций. Поэтому такая пленка выступает буферной зоной между внешней

газовой средой и внутренними слоями жидкости и снижает скорость испарения. Чем выше температура нагрева, тем больше отличия W_{cp} . Соответственно, можно сделать вывод о том, что для интенсивного испарения ОС-5 целесообразно повысить динамику трансформации поверхности капель и слоев. В таком случае скорости испарения могут быть даже выше, чем у суспензий, солевых растворов и воды без примесей, как было показано в экспериментах с подложкой и потоком воздуха. Ключевая особенность применения раствора ОС-5 состоит в формировании буферной паровой зоны между ограждаемой конструкцией, материалом или веществом и источником нагрева. Помимо кристаллической пленки на кадрах видеogramм с кондуктивным нагревом наблюдалось формирование парового слоя. Температуропроводность паров на порядок ниже, чем жидкости и твердых материалов. Поэтому тепловой поток через слой паров существенно снижался.

При анализе рис. 3.22 можно сделать вывод о том, что наиболее значительные отличия времен полного испарения и скоростей парообразования характерны для эмульсии пенообразователя по сравнению с другими исследованными специальными составами. Но эти отличия существенны при малых температурах нагрева (до 100 °C). Чем выше температуры нагрева, тем меньше отличия времен полного испарения. Этот результат показывает, что скорости радиационного прогрева большинства огнетушащих составов близки. Но вследствие разных площадей контакта капли с держателем и отличающихся площади ее свободной поверхности (динамика растекания капель отличается, как было сказано выше) значения скоростей испарения также отличались даже при повышении температуры (рис. 3.22). Если принимать во внимание ключевые параметры радиационного теплообмена, то определяющее значение должна играть степень черноты капель огнетушащих составов. Но даже за счет добавок 10 % порошка бентонита существенно изменить степень черноты поверхности капли невозможно. Поэтому значения подведенных тепловых потоков к поверхности исследованных капель были сопоставимы.

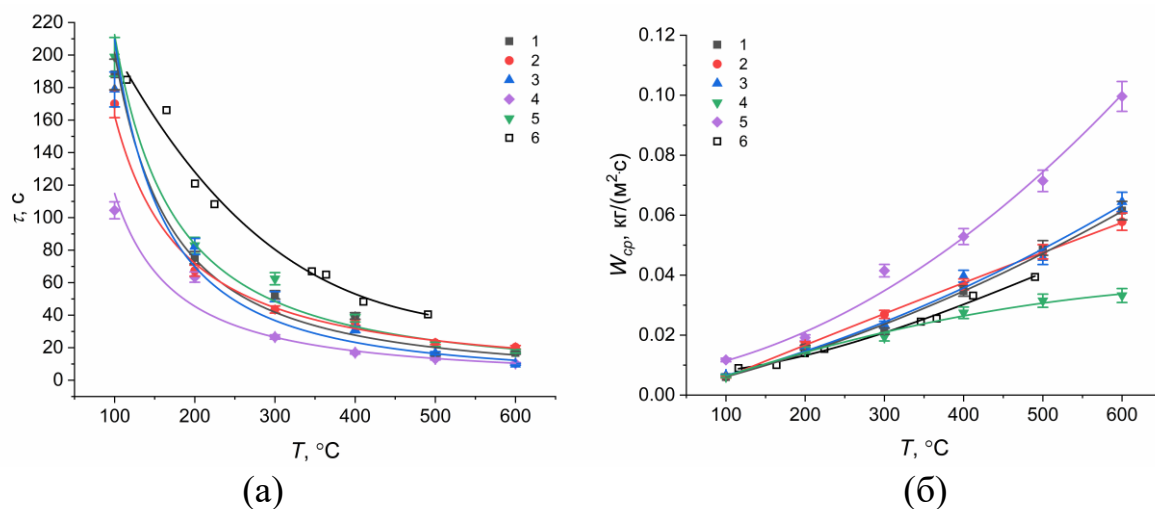


Рисунок 3.22 – Зависимости времен существования капель (полного испарения) (а) и скоростей парообразования (б) от температуры воздуха при нагреве в муфельной печи. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя; 6 – вода [117].

При обобщении полученных экспериментальных данных для каждой из зависимостей на рис. 3.20–3.22 сформулированы аппроксимационные выражения, позволяющие наиболее близко описать экспериментальные данные. Аналогичная работа проведена для определения аппроксимационных выражений для зависимостей скоростей испарения от температуры нагрева. Получен общий вид аппроксимационного выражения для скорости испарения от температуры нагрева с учетом схемы подвода теплоты к капле: $W_e = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$. В таблице 3.6 приведены значения эмпирических констант и величина достоверности аппроксимации (R^2).

Следует отметить, что достаточно хорошо описать зависимости скоростей испарения жидкостей от температуры нагрева во всех случаях удалось с применением полиномов второй степени. Это позволяет сделать вывод о том, что определяющее влияние на скорости испарения оказывает не только температура нагрева или тепловой поток, но и еще несколько факторов (не менее двух). Иначе можно было бы применять экспоненциальные и степенные функции или полиномы первого порядка. Анализ исследованных процессов показал, что

ключевыми факторами являются: площадь контакта с внешней средой, температура среды, тепловой поток, теплофизические и реологические характеристики жидкости.

Таблица 3.6 – Значения эмпирических констант для выражения $W_e = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$.

Жидкость	В муфельной печи				В потоке воздуха				На подложке			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Вода	$3 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$-3,5 \cdot 10^{-3}$	0,8094	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	0,9357	$8 \cdot 10^{-5}$	$-12,8 \cdot 10^{-3}$	0,5032	0,9924
Бентонит (10 %)	$-1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-4,2 \cdot 10^{-3}$	0,9998	$-7 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$-4,8 \cdot 10^{-3}$	0,9772	$3 \cdot 10^{-5}$	$-3,9 \cdot 10^{-3}$	0,1151	0,9875
Бишофит (10 %)	$8 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,9661	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	0,988	$5 \cdot 10^{-5}$	$-7,8 \cdot 10^{-3}$	0,3021	0,9537
ОС-5(10 %)	$-1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-6 \cdot 10^{-3}$	0,9187	$-9 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$-5,1 \cdot 10^{-3}$	0,9772	$1 \cdot 10^{-4}$	$-15,9 \cdot 10^{-3}$	0,6164	0,9177
Эмульсия пенообразователя (10 %)	$4 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	0,8317	$-2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$-7,2 \cdot 10^{-3}$	0,9734	$4 \cdot 10^{-5}$	$-5,7 \cdot 10^{-3}$	0,2083	0,9971

В зависимости от схемы нагрева при высоких температурах значения времен полного испарения и скоростей испарения капель, исследованных жидкостей, могут отличаться как незначительно, так и существенно. Это обусловлено тем, что при высоких температурах внешней среды изменение размеров капель вследствие испарения происходят с большими флуктуациями. Причины таких флуктуаций являются следствием в основном того, что высокотемпературный нагрев приводит к локальному перегреву и вскипанию капель, проявлению эффекта Лейнденфроста, изменению формы капель относительно сферических и др. Чем больше компонентов в капле с существенно

отличающимися теплофизическими и реологическими характеристиками, тем заметнее влияние таких факторов. Поэтому приведенные на рис. 3.20–3.22 экспериментальные данные следует рассматривать, как соответствующие диапазонам изменения времен полного испарения и скоростей парообразования типичных огнетушащих составов. Верхняя и нижняя кривые на каждом из этих рисунков иллюстрируют границы областей зарегистрированных в экспериментах характеристик. Эти области и представляют основной интерес при математическом моделировании и при прогнозировании значений скоростей испарения огнетушащих составов на практике.

На рис. 3.23 приведены значения вычисленных тепловых потоков поверхности капель в условиях трех схем подвода теплоты. По оси абсцисс представлены суммарные значения тепловых потоков для трех использовавшихся схем нагрева капель: на подложке $q_{\text{sum}} = q_{\text{cond}}$ (рис. 3.23(а)); в потоке воздуха $q_{\text{sum}} = q_{\text{conv}}$ (рис. 3.23(б)); в муфельной печи $q_{\text{sum}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$ (рис. 3.23(в)).

Анализ зависимостей рис. 3.23 показывает, что наибольшие значения скоростей испарения, зарегистрированные в экспериментах в условиях конвективного нагрева, обусловлены большими значениями теплового потока к поверхности капли, если сравнивать три разных схемы нагрева при идентичных температурах внешней среды. Также важную роль в регулировании скорости испарения играет фактор диффузии. В частности, в экспериментах с подложкой и муфельной печью вблизи поверхности капли формировался паровой буферный слой, который "тормозил" процесс испарения вследствие высокой концентрации паров и малых градиентов этого параметра в окрестности поверхности капли. В случае же схемы с натекающим на каплю потоком воздуха пары сносятся от поверхности капли (в составе парогазовой смеси) в ее след. Поэтому в малом приповерхностном слое концентрация паров мала, соответственно, скорость испарения может быть высокой. При сравнении значений скоростей испарения, вычисленных для схемы с подложкой, с другими схемами подвода теплоты целесообразно отметить определяющую роль фактора растекания капли, площадь ее контакта для разных условий нагрева существенно отличалась. Это

значительно влияло на интенсивность тепломассопереноса в системе "капля – подложка".

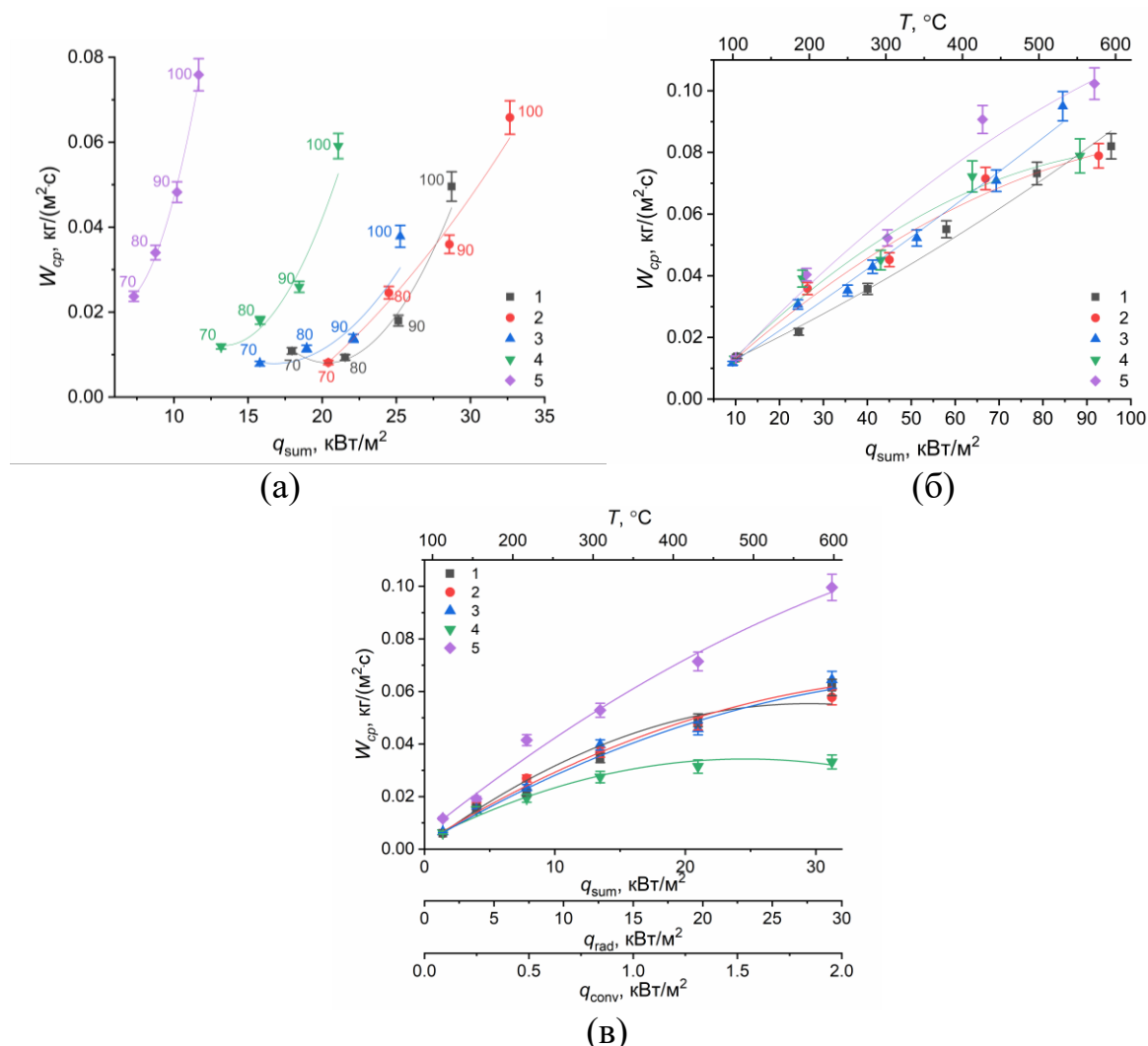


Рисунок 3.23 – Зависимости скорости испарения от теплового потока к поверхности капля при нагреве на подложке (а), в потоке воздуха (б) и муфельной печи (в). Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

Установлено, что при идентичных значениях тепловых потоков к нагреваемой поверхности капля исследованных составов условия нагрева существенно влияют на численные значения скоростей испарения (рис. 3.23). Можно сделать вывод о том, что в условиях подвода теплоты к лежащей на подложке капле скорости испарения существенно меньше (при одинаковых тепловых потоках) по сравнению с нагревом капли в муфельной печи и потоке

воздуха приводит к существенно меньшему (при одинаковых тепловых потоках) скоростям испарения. Последнее является следствием менее интенсивного прогрева капли. Соответственно, можно сделать вывод о том, что применение методики определения скоростей испарения капель любых специальных составов (суспензий, эмульсий, растворов) в условиях кондуктивного нагрева не обеспечивает получение достоверных характеристик процессов испарения капель таких жидкостей. Кроме того, необходимо отметить, что в условиях конвективного нагрева экспериментальные значения скоростей испарения в диапазоне изменения теплового потока от $0,1 \text{ кВт/м}^2$ до 2 кВт/м^2 располагаются достаточно плотно (отклонения не выходят за границы доверительных интервалов). При радиационном же нагреве численные значения W_{cp} для всех исследованных составов существенно отличаются. Можно сделать обоснованный вывод о том, что пенообразователь значительно интенсифицирует прогрев капель эмульсии, а добавка ОС-5 снижает интенсивность прогрева капли водного раствора. Также приведенные на рис. 3.23(в) зависимости дают основания для вывода о более интенсивном прогреве капель в условиях лучистого нагрева. Отличия значений W_{cp} в условиях конвективного и лучистого нагрева при идентичных q иллюстрируют значительное поглощение каплей теплоты излучения. При этом структура капель исследованных составов существенно отличалась, соответственно, характеристики распространения излучения также были разными. Если бы излучение поглощалось бы только в приповерхностных слоях, то скорости испарения бы капель всех пяти составов были бы очень близки.

При проведении экспериментов выполнены измерения температуры поверхности капель T_d . Аналогично экспериментам с каплями воды [117] выделен интервал времени, в течение которого капля интенсивно нагревается, но температура капли практически не повышается. Аналогично [117] можно сделать вывод о наличии асимптотических значений T_d . Для каждой из температур внешней среды T_a максимальные значения T_d , до которых прогревались капли, отличались, как и в экспериментах с водой [117]. Например, в экспериментах с

водой при T_a около 100 °С капля прогревалась до 40 °С. Отличия результатов по регистрации T_d от [117] составили около 2 °С, что обусловлено несколько отличающейся схемой размещения капли на держателе, а также инерционностью системы измерений. В [117] применялась система на базе оптического метода PLIF, а в настоящей работе – малоинерционная термопара. В последнем случае нельзя было применять метод PLIF для всех исследованных составов, так как светимость флуорофоров (красителей) Rhodamine B и Rhodamine 6G существенно зависела от примесей в воде.

При сравнительном анализе времен прогрева капель исследованных составов до некоторых практически постоянных (асимптотических значений) температур можно выделить ключевые особенности влияния теплофизических и реологических характеристик жидкостей. В частности, на рис. 3.24–3.25 приведены результаты регистрации времен прогрева (τ_h) капель до практически постоянных значений T_d и перепад температуры ΔT_d (разница между конечным и начальным значением T_d).

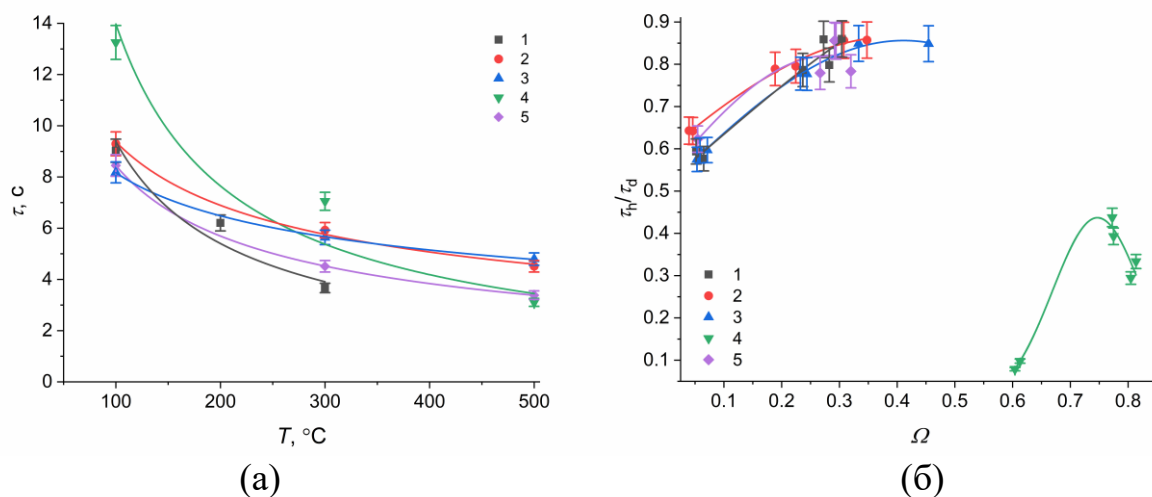


Рисунок 3.24 – Зависимости времен прогрева капли в потоке воздуха от его температуры в размерном (а) и безразмерном (б) виде. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

Хорошо видно, что медленнее всего прогревались капли раствора ОС-5. Это обусловлено выше описанным процессом формирования теплоизоляционной

буферной паровой пленки. Поэтому можно сделать вывод о проявлении тех свойств, которые характерны ОС-5: обладает одновременно огнетушащей и огнезащитной способностью, блокирует как пламенное горение, так и тление лесных горючих материалов. Эксперименты показали, что быстрее прогревались эмульсия пенообразователя и вода без примесей. Суспензия бентонита и солевой раствор бишофита прогревались несколько дольше, но до больших асимптотических значений T_d .

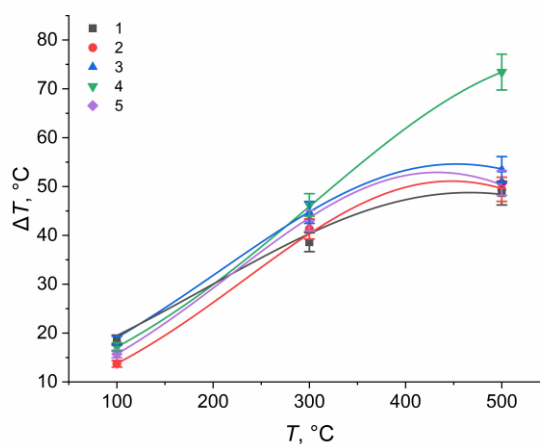


Рисунок 3.25 – Изменение температуры поверхности капли относительно начального значения (20 °C) с ростом температуры потока воздуха. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита; 3 – раствор бишофита; 4 – раствор ОС-5; 5 – эмульсия пенообразователя.

При сравнении зависимостей рис. 3.24–3.25 можно отметить, что практически для всех составов прослеживалась связь максимальных значений T_d и времен прогрева τ_h . Чем большее значение T_d достигалось, тем длительнее был нагрев, но процесс испарения в целом протекал быстрее (времена полного испарения были меньше). Анализ особенностей изменения T_d капель раствора ОС-5 показывает, что достигаются максимальные температуры (по сравнению с каплями других составов) (капли раствора ОС-5 интенсивно аккумулировали подведенное тепло). Для других составов значения T_d в целом были достаточно близкими между собой. Выше приведены пояснения по особенностям формирования двух буферных зон в каплях ОС-5, которые и приводят к тому, что температура поверхности капли остается максимальной, а глубинные слои

прогреваются менее интенсивно. Как следствие, аккумуляция тепла происходила в приповерхностном слое капель ОС-5 (соответственно, значения T_d поверхности капли максимальны) в отличие от других составов.

Результаты выполненных исследований показали, что интегральные характеристики процессов прогрева и испарения капель огнетушащих составов существенно зависят от многих факторов. Помимо теплофизических характеристик важное значение оказывают реологические, так как площадь контакта капли с высокотемпературной средой существенно влияет на значения времен прогрева и, как следствие, скоростей прогрева и испарения жидкостей. Наиболее эффективными составами, по критерию высоких скоростей прогрева и испарения, можно считать раствор ОС-5 и эмульсию пенообразователя. Поэтому для максимального аккумулярования тепла (вследствие высоких теплоемкости и теплоты парообразования жидкости) из зоны горения в случае тушения и локализации пожаров целесообразно применять эти два состава. При идентичных значениях температуры внешней среды и тепловых потоков скорости прогрева и испарения раствор ОС-5 и эмульсии пенообразователя могут быть выше на 15–25 % по сравнению с другими исследовавшимися огнетушащими составами. Так как важное значение имеет время локализации и тушения пожаров, то соответствующие ускорения прогрева и испарения капель специальных составов могут быть важными при развитии перспективных технологий подавления и локализации горения лесных материалов [25,153–156].

Выводы по третьей главе

1. Выделены три режима испарения водных растворов солей: 1 – увеличение площади контакта; 2 – “пиннинг” капли (площадь контакта постоянна); 3 – “образование кристаллов соли или кристаллогидратов”.

2. Установлено, что при испарении воды из водных растворов солей LiBr, LiCl, CaCl₂ (при $t_n = 80$ °C) на поверхности капли образуется тонкая оболочка кристаллогидратов. В случае раствора NaCl образуются объёмные кристаллы

соли (без кристаллогидратов). Зарегистрирована область кристаллизации перед контактной линией при покрытии поверхности капли кристаллической оболочкой.

3. Анализ зависимостей объема капли от времени показал, что скорость испарения воды имеет линейный вид, водных растворов солей LiCl , CaCl_2 , LiBr квазилинейный, трансформирующийся в нелинейный при испарении воды. Кривые десорбции водного раствора соли NaCl квазилинейны. Последнее обусловлено разными условиями кристаллизации (низкой растворимостью NaCl и ранней кристаллизацией).

4. По результатам экспериментальных исследований свойств смачиваемости специальные огнетушащие составы условно разделены на две группы. При тушении пожаров жидкостями первой группы (суспензия бентонита, раствор бишофита) подавление пламени происходит за счет осаждения твердых частиц и образования огнестойкого слоя в зоне пиролиза ЛГМ, благодаря чему происходит подавление процесса выхода газообразного горючего. Вторая группа жидкостей (эмульсия пенообразователя и раствор ОС-5) за счет низкого поверхностного натяжения (хороших свойств смачиваемости) пропитывает элементы ЛГМ на всю глубину слоя (до зоны пиролиза), охлаждая горючий материал и препятствуя его пиролизу.

5. Установлено, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться значительно (например, в 2 раза при $t = 50^\circ\text{C}$ для воды и эмульсии пенообразователя). Показано, что с ростом температуры поверхности нагрева средние времена полного испарения капель исследовавшихся достаточно типичных составов становились сопоставимыми.

6. В подавлении процессов термического разложения лесных горючих материалов важную роль играет не только поглощение теплоты в результате испарения воды, но и воздействие твердых продуктов (остающихся после испарения воды эмульсий, растворов и суспензий) – компонент специальных

составов на элементы ЛГМ и соответствующее изменение их теплофизических и термохимических свойств.

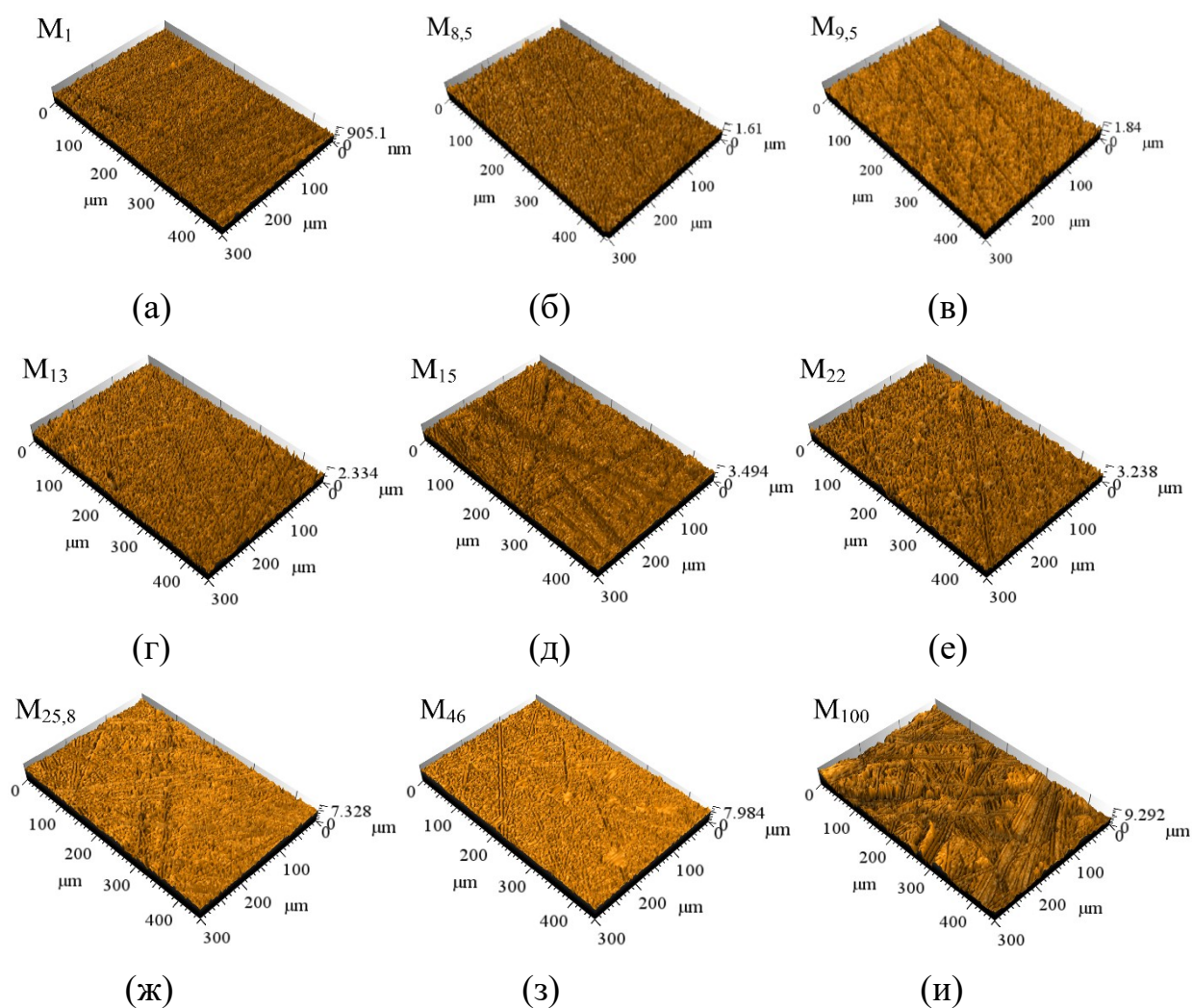
7. Экспериментальные исследования показали, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться при нагреве на подложке в 3,7 раза (например, при $T \approx 70$ °С для суспензии бентонита и эмульсии пенообразователя), в потоке воздуха – в 1,25 раза (при $T \approx 100$ °С для эмульсии пенообразователя и суспензии бентонита), в муфельной печи – в 1,9 раза (при $T \approx 100$ °С для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя) при идентичных схемах и температурах источника нагрева. Эти результаты показывают, что для обеспечения полного испарения капель таких составов в зоне горения лесного массива с различным тепловыделением необходимы разные высоты сброса и, соответственно, отличающиеся длительности прогрева и движения в пламенной зоне горения.

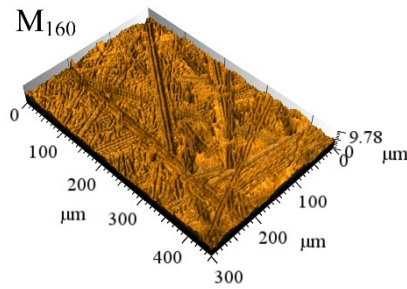
8. Диапазон изменения скоростей испарения огнетушащих составов составил 0,00788–0,07589 кг/(м²с) при температуре нагрева 70–100 °С (схема с нагревом на подложке). При этом максимальные значения скоростей испарения соответствовали эмульсии пенообразователя (концентрация 10 %), а минимальные – раствору бишофита (концентрация 10 %) и воде без примесей. В целом диапазон изменения зарегистрированных значений скоростей испарения огнетушащих составов составил 0,006–0,102 кг/(м²с) при температурах нагрева 70–600 °С.

ГЛАВА 4. СМАЧИВАНИЕ И РАСТЕКАНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА АБРАЗИВНО-ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛОВ

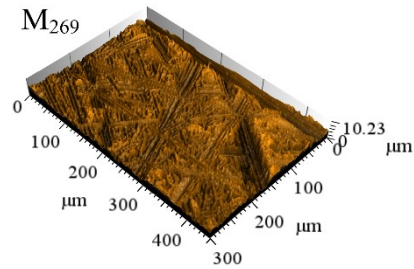
4.1 Текстуры поверхностей меди и стали, сформированные в условиях абразивной обработки

По результатам анализа трехмерных изображений поверхностей меди (рис. 4.1) и стали (рис. 4.2) установлено, что их текстура после абразивной обработки состоит из микро- и наноразмерных неровностей неправильной геометрической формы. Как следствие, имеет место отклонение от бимодальности распределения высот шероховатости. На поверхностях металлов (рис. 4.1–4.2) явно выражены бороздки, их количество увеличивается при обработке абразивными дисками с большим размером зерна.



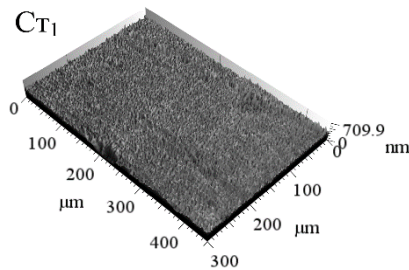


(к)

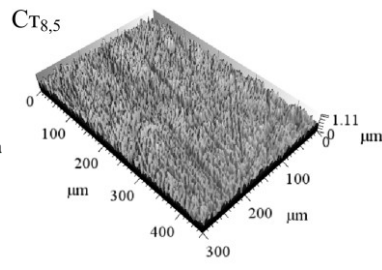


(л)

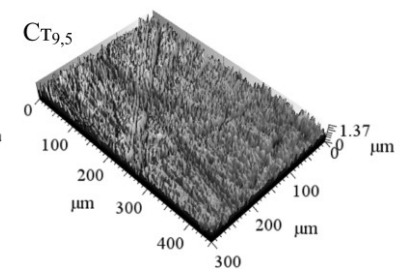
Рисунок 4.1 – Трехмерные изображения текстуры поверхностей образцов меди после обработки абразивными дисками со средним размером зерна, мкм: (а) – 1; (б) – 8,5; (в) – 9,5; (г) – 13; (д) – 15; (е) – 22; (ж) – 25,8; (з) – 46; (и) – 100; (к) – 160; (л) – 269.



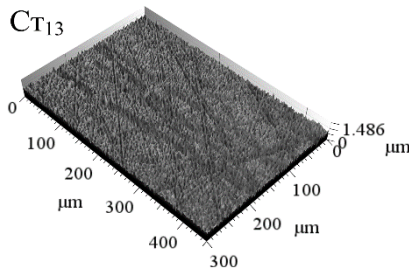
(а)



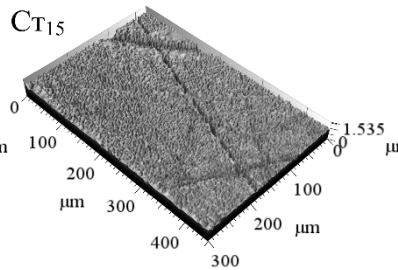
(б)



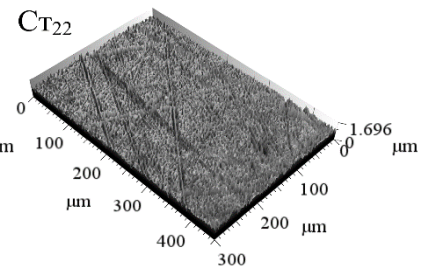
(в)



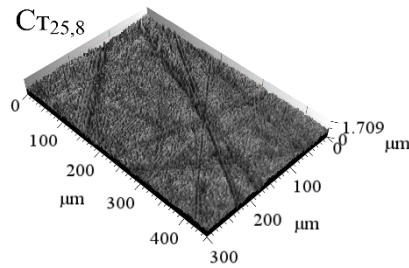
(г)



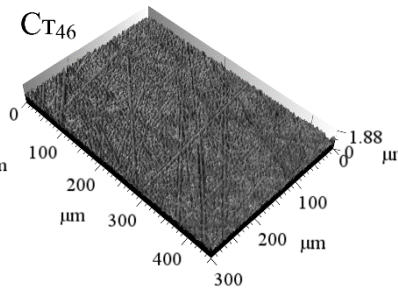
(д)



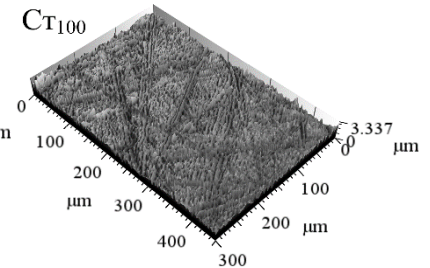
(е)



(ж)



(з)



(и)

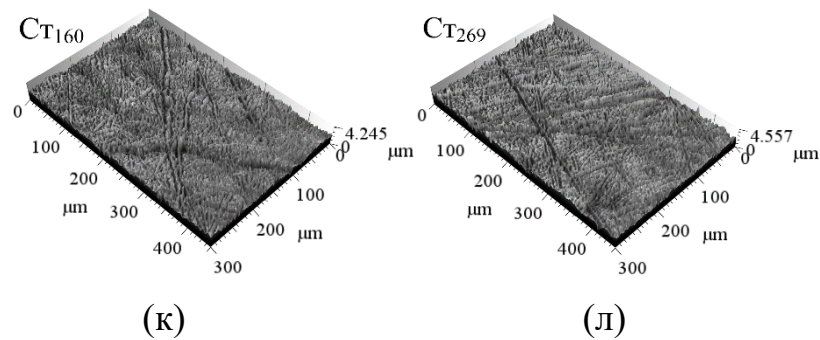


Рисунок 4.2 – Трехмерные изображения текстуры поверхностей образцов стали после обработки абразивными дисками со средним размером зерна, мкм: (а) – 1; (б) – 8,5; (в) – 9,5; (г) – 13; (д) – 15; (е) – 22; (ж) – 25,8; (з) – 46; (и) – 100; (к) – 160; (л) – 269.

Известны методы лазерного текстурирования [9,10], травления [12], литографии [11], термическое тиснения [157], которые позволяют изменять функциональные свойства (смачиваемости [100], стойкости к абразивному износу [158], коррозии [12,159], биообрастанию [160]) приповерхностных слоев металлов и их сплавов. После применения этих методов изменяется текстура приповерхностного слоя металлов и их сплавов. Для описания текстуры наиболее часто используются профильные двумерные характеристики (R_a [94,98], R_s [10,98,102]). Такая оценка шероховатости поверхности сопряжена с возможными ошибками, обусловленными тем, что двумерные характеристики шероховатости основаны на вычислении статистик профиля поверхности относительно средней линии, принимаемой в пределах базовой длины [103]. Особо грубые ошибки в определении шероховатости поверхности, например, средним арифметическим отклонением профиля (R_a), возникают при характеристике упорядоченных текстур в виде совокупности элементов правильной геометрической формы (например, кратеров, пиков в виде параллелепипедов). Характеристика среднего арифметического отклонения профиля чувствительна к появлению пиков и впадин, неустойчива (от опыта к опыту) и характеризуется большим разбросом недостаточно информативных при оценке шероховатости поверхности [103]. Решением проблемы адекватного описания шероховатости поверхности является

использование группы трехмерных характеристик шероховатости из предложенных в [102,104]. Поэтому в работе использовались трехмерные параметры из группы амплитудных (S_a , S_q , S_z , S_{ku} , S_{sk}), гибридных (S_{dq} , S_{dr}) и элемента текстуры (S_{pd} , S_{pc}).

4.1.1. Трехмерные высотные характеристики шероховатости

На рис. 4.3 приведены определенные в экспериментах трехмерные характеристики высоты (S_a , S_q , S_z) элементов шероховатости поверхностей меди и стали от среднего размера зерна типичных абразивных дисков (табл. 2.3) [161].

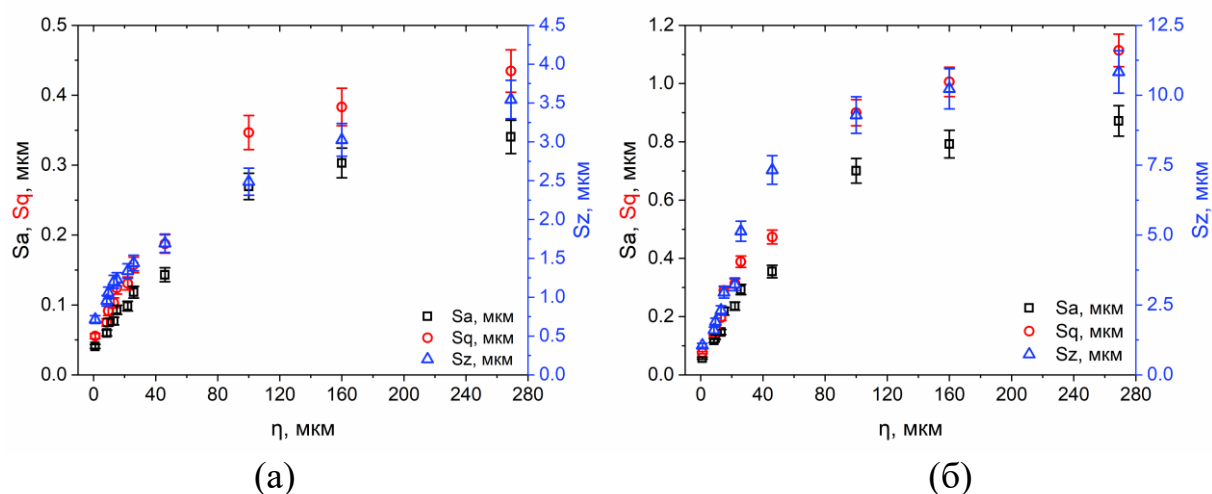


Рисунок 4.3 – Зависимости основных характеристик высоты от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: (а) медь; (б) сталь.

В проведенных экспериментах установлено, что, если металлы с разными физико-механическими свойствами подвергаются абразивной обработке, увеличение зернистости абразивных дисков при постоянном давлении на диск, времени обработки и скорости вращения приводит к разной степени деформации поверхности (сдвигу) металла. В результате на поверхности металлов формируется уникальная текстура, соответствующая условиям абразивной обработки.

Следует отметить, что характеристика S_a описывает только среднюю амплитуду шероховатости и не учитывает разницу конфигураций выступов и впадин, а также их наибольшие значения. Визуализация процесса определения S_a

приведена на рисунке 4.4. Но без учета дополнительных характеристик S_a не может быть использован для анализа функциональных свойств поверхностей, в частности, для оценки влияния шероховатости на свойства смачиваемости, характеристик растекания и испарения малых объемов жидкостей. Характеристика среднего квадратичного отклонения (S_q) является альтернативой S_a , которая описывает среднеквадратичное отклонение распределения высот выступов, но не содержит информации о впадинах и не учитывает пики выступов. Визуальное определение S_q приведено на рисунке 4.4. Дополнительно проанализированы амплитудные характеристики S_z , S_{sk} и S_{ku} .

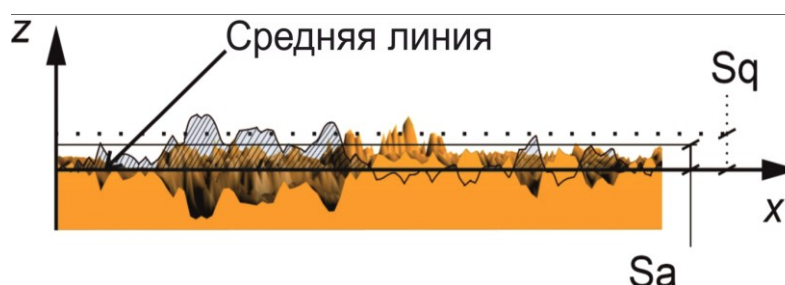


Рисунок 4.4 – Схематичное изображение определения характеристик шероховатости поверхности.

В таблице 4.1 приведены значения отношения S_q/S_a , которое уменьшается при абразивной обработке поверхностей с более крупным средним зерном. Последнее показывает, что при абразивной обработке с более крупным зерном на поверхности меди и стали формируется текстура с более выраженной случайной гауссовой формой. При значениях отношения S_q/S_a менее 1,11 образуется текстура синусоидальной формы.

Таблица 4.1 – Значения отношения S_q/S_a поверхностей меди и стали.

η (мкм)	1	8,5	9,5	13	15	22	25.8	46	100	160	269
S_q/S_a (Медь)	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,28	1,27	1,28
S_q/S_a (Сталь)	1,36	1,35	1,34	1,34	1,33	1,33	1,33	1,31	1,29	1,26	1,28

Характеристика S_z дает возможность оценивать высоту выступов и глубину впадин, образующих шероховатости на поверхности. Из рисунка 4.3 видно, что

при одних и тех же условиях обработки на поверхности меди в сравнении с поверхностью стали образуется шероховатость, соответствующая большим значениям S_a , S_q , S_z . По результатам экспериментального определения твердости по методу Виккерса установлено, что образцы исследовавшейся стали характеризуются числом твердости $174,2 \pm 6,1$ HV, что в 1,7 раза больше твердости меди $105,1 \pm 2,9$ HV. При абразивной обработке меди из-за ее низкой твердости увеличивается глубина внедрения абразивных зерен, а также высота вытесненного металла. По этой причине при обработке поверхностей образцов меди дисками со средним размером зерна до 22 мкм величины S_a , S_q , S_z в 1,5–2,5 раза больше аналогичных характеристик стали. При обработке абразивом со средним размером зерна от 22 мкм до 269 мкм характеристики S_a , S_q меди в 2,5–3 раза больше характеристик стали, а величина S_z в 3–4,7 раза.

Функциональные свойства приповерхностного слоя металлов в частности, смачиваемость поверхности, зависят не только от высоты выступов и глубины впадин, но и от их преобладания на поверхности и формы. Преобладание выступов или впадин на поверхности меди и стали по результатам проведенных экспериментов оценено характеристикой асимметричности (S_{sk}) (рис. 4.5). Методика определения этого параметра представлена на рисунке 4.6. Установлено, что после абразивной обработки меди и стали образуется текстура, характеризующаяся отрицательными значениями S_{sk} (рис. 4.5). Но если значения S_{sk} отрицательны, можно сделать вывод о том, что образуется текстура с небольшим количеством выступов относительно глубоких впадин. Обработка с большим размером зерна абразивных дисков (η) создает текстуру с более симметричной топографией (равному количеству выступов и впадин), что подтверждается увеличением S_{sk} (рис. 4.5) и стремлением его значений к нулю. При обработке поверхности меди абразивными дисками с $\eta=22$ мкм характеристика S_{sk} достигает значений близких к нулю (рис. 4.5(a)). При обработке с большим η (от 22 мкм до 269 мкм) S_{sk} не изменяется у поверхности меди (рис. 4.5(a)). При обработке поверхностей стали дисками с η от 1 мкм до 269 мкм зарегистрирован рост S_{sk} . При обработке с зерном 269 мкм эта

характеристика принимает значения близкие к нулю (рис. 4.5(б)). На основании анализа результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод о том, что симметричная форма распределения высот неровностей образуется при обработке поверхностей меди абразивными дисками с размером зерна от 22 мкм, поверхностей стали от 160 мкм.

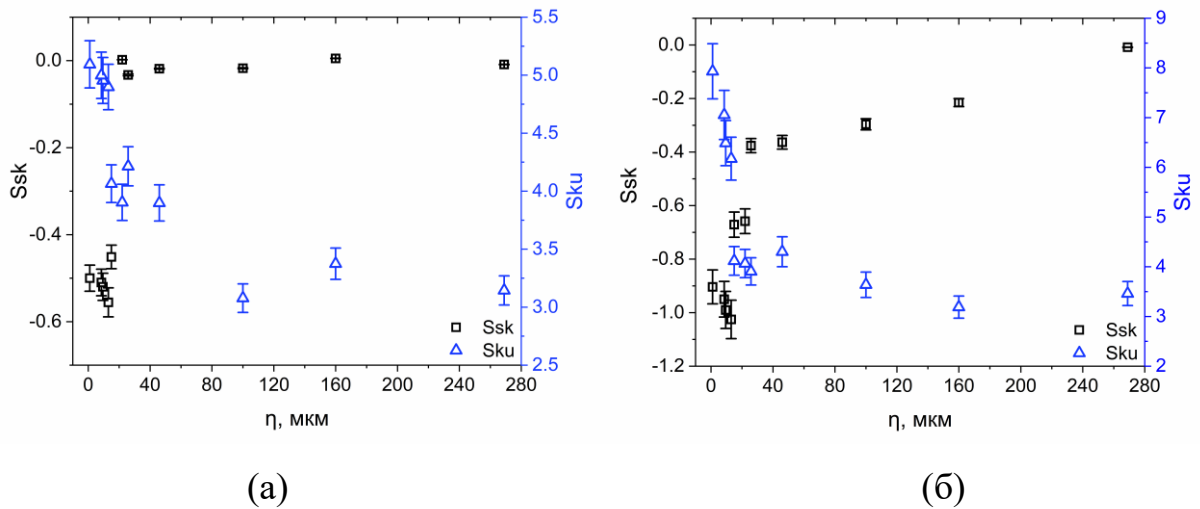


Рисунок 4.5 – Зависимости асимметрии и эксцесса от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: а) медь; б) сталь.

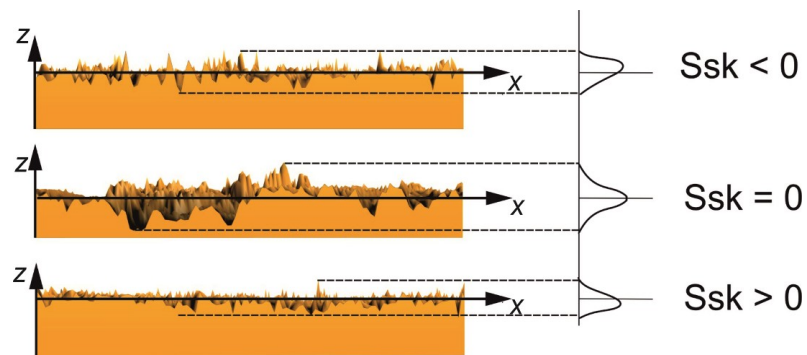


Рисунок 4.6 – Схематичное изображение определения асимметрии поверхности.

Форма выступов на поверхностях меди и стали после экспериментов оценена трехмерной характеристикой эксцесса S_{ku} (Рис. 4.5), который характеризует плосковершинность. Визуальное определение этой характеристики представлено на рисунке 4.7.

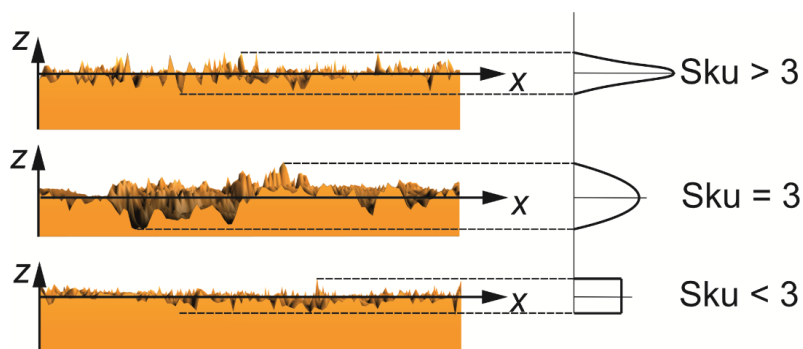


Рисунок 4.7 – Схематичное изображение определения эксцесса поверхности.

Из рисунка 4.5 видно, что при абразивной обработке поверхностей меди и стали с большим средним размером зерна S_{ku} уменьшается и стремится к значению равному трем. При абразивной обработке поверхностей металлов контактные взаимодействия (резание, адгезионный и абразивный износ, пластическая деформация и трещинообразование) накладываются друг на друга. Чем больше средний размер зерна абразивных дисков, тем значительнее проявляются контактные взаимодействия. При значениях $S_{ku} \approx 3$ на поверхностях M_{100} , M_{160} , M_{269} и $Ст_{160}$, $Ст_{269}$ образуются выступы преимущественно с симметричной гауссовой формой с редкими впадинами, оставляемыми единичными не сточенными абразивными зёрнами (рис. 4.1–4.2). Эксперименты показали, что абразивная обработка поверхностей меди и поверхностей стали дисками со средним размером зерна до 100 мкм и 160 мкм, соответственно, образует островершинные выступы. При абразивной обработке поверхностей меди и стали не образуются плосковершинные выступы, а S_{ku} не принимает значений меньше 3 (рис. 4.5).

4.1.2. Трёхмерные гибридные характеристики шероховатости

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что гибридные характеристики шероховатости зависят от шагов и высот неровностей. На рисунке 4.8 приведены значения среднего квадратичного наклона неровностей S_{dq} и приращения относительной площади S_{dr} . Величина S_{dq} для полированной поверхности меди $M1$ не превышает 0,05, для поверхности стали $Ст_1$ – 0,2. Эти поверхности близки к молекулярно-гладким с высокими отражательными

способностями. Из рисунка 4.8 видно, что увеличение среднего размера зерна привело к росту Sdq и Sdr , следовательно, растет пространственная неоднородность текстуры. Рост Sdq (рис. 4.8) характеризует улучшение адгезионных свойств поверхности в условиях растекания по ней малых объемов жидкостей [162].

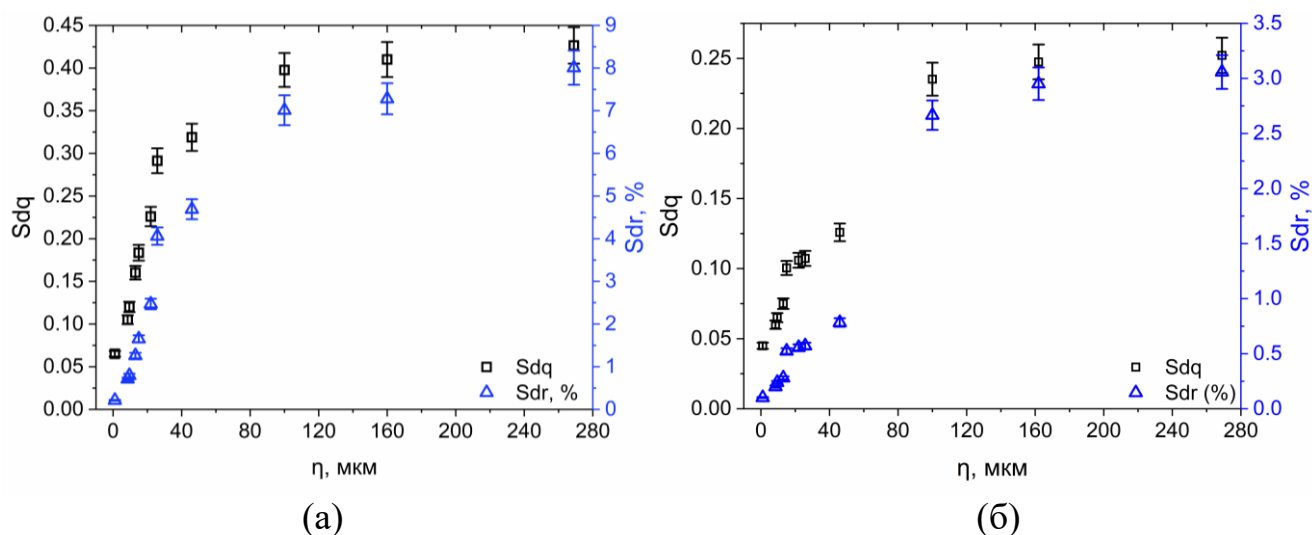


Рисунок 4.8 – Зависимости среднего квадратичного наклона неровностей (Sdq) и приращения относительной площади (Sdr) от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: (а) медь; (б) сталь.

Использование характеристики приращения площади Sdr относительно молекулярно-гладкой поверхности позволяет дополнительно выделять поверхности с одинаковыми значениями Sa , Sq , Sz . Условно можно выделить два интервала роста площади поверхностей меди и стали по среднему размеру зерна при абразивной обработке (рис. 4.8). Первый интервал лежит в пределах η от 1 μm до 100 μm , второй от 100 μm до 269 μm . В первом интервале установлен интенсивный прирост площади поверхности меди (до 7 % на образце M_{100} (рис. 4.8(а))) и поверхности стали (до 2,7 % на образце $Ст_{100}$ (рис. 4.8(б))). Во втором интервале значительно снижается прирост площади. На образце меди M_{269} прирост площади в сравнении с образцом M_{100} составил не более 1 %. На образце стали $Ст_{269}$ прирост площади в сравнении с образцом $Ст_{100}$ составил не более 0,4 %. Можно сделать вывод о том, что при абразивной обработке поверхностей

меди и стали значительный прирост площади поверхности происходит при обработке дисками с η до 100 мкм. Использование дисков с η более 100 мкм не приводит к значительному росту площади относительно поверхностей, обработанных дисками с $\eta=100$ мкм. Изменение площади поверхности после абразивной обработки оказывает влияние на свойства смачивания в состоянии Венцеля [163], а также на интенсивность протекания процессов растекания [164], испарения [165], кипения [166] и конденсации [167].

4.1.3. Трехмерные характеристики дискретизации

На рисунке 4.9 приведены зависимости трехмерных характеристик дискретизации (минимальной длины корреляции (Sal) и текстурного коэффициента (Str)) от среднего размера зерна абразивно-обработанных поверхностей меди и стали.

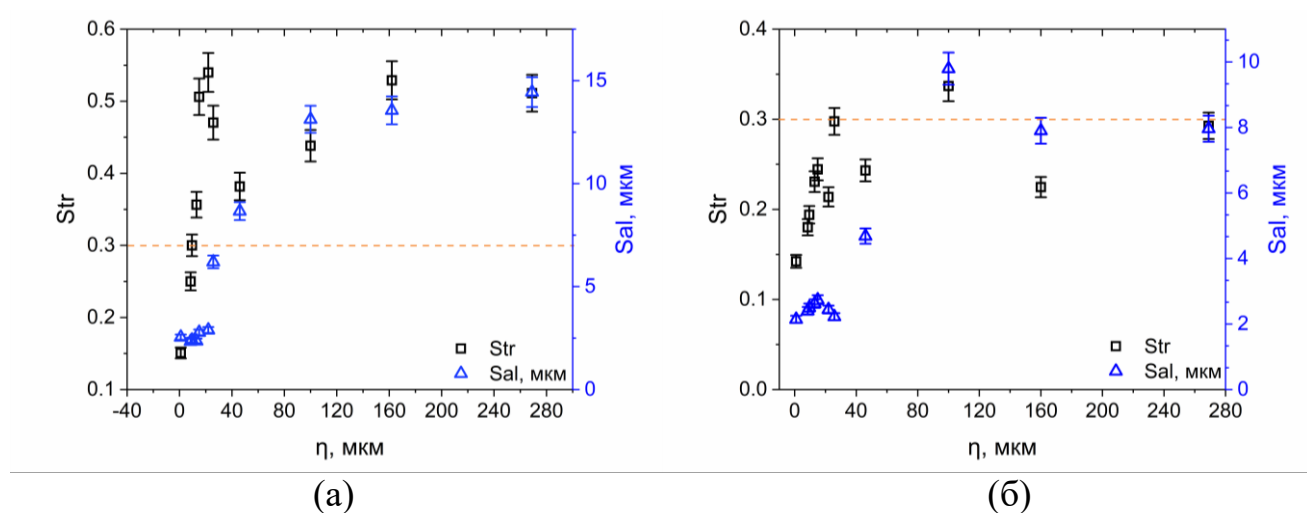


Рисунок 4.9 – Зависимости трехмерных характеристик дискретизации (минимальной длины корреляции и текстурного коэффициента) от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: а) медь; б) сталь.

Характеристика Sal описывает текстуру в направлении максимальной неоднородности. Поверхности меди, обработанные зерном до 22 мкм (рис. 4.9(а)), и поверхности стали, обработанные зерном до 46 мкм (рис. 4.9(б)), характеризуются малыми значениями Sal. Последнее указывает на высокочастотный характер изменения максимальных высот выступов. Рост

значений S_{al} от среднего размера зерна (рис. 4.9(б)) свидетельствует об увеличении расстояния между максимальными высотами выступов.

Характеристика Str указывает на степень анизотропии и изотропии поверхности. Если $Str < 0,3$, то текстура поверхности анизотропна. Если $Str > 0,5$, то текстура поверхности изотропна [168]. Из рис. 4.6 видно, что образцы M_1 и $СТ_{1-269}$ характеризуются значениями $Str < 0,3$, что свидетельствует об их анизотропной текстуре. Стоит отметить, что поверхности M_1 и $СТ_{1-269}$ характеризуются не единственным направлением текстуры. Поверхности M_{13-269} характеризуются значениями $Str > 0,5$, что свидетельствует об их изотропной текстуре.

4.1.4. Характеристики элемента

Плотность выступов Spd (плотность пиков на единицу площади) является еще одной важной характеристикой при изучении смачивания [162]. Пики и впадины образуют капилляр на поверхности, влияя на смачивание, а также на свободную поверхностную энергию. Из рисунка 4.10 видно, что плотность выступов на поверхностях меди и стали экспоненциально уменьшается с увеличением зернистости абразивных дисков (от 1 мкм до 269 мкм).

Характеристика средней арифметической кривизны высших точек S_{pc} – это величина обратно пропорциональная радиусу кривизны вершин. (рис. 4.10). Полированным поверхностям меди и стали соответствуют малые значения S_{pc} 0,062 и 0,042 1/мкм, соответственно. Такие малые значения характеризуют большой радиус кривизны. При абразивной обработке кривизна самых высоких вершин увеличивается с ростом зернистости абразивных дисков. Абразивно-обработанные поверхности характеризуются острыми высокими пиками. Можно сделать вывод о том, что S_{dq} (рис. 4.8) и S_{pc} связаны между собой: чем больше кривизна высших точек, тем выше среднеквадратичный наклон поверхности и наоборот. Из рисунка 4.10 также видно, что плотность неровностей на поверхности (характеристика Spd) и радиус кривизны неровностей (характеристика S_{pc}) значительно изменяются после абразивной обработки

материалом со средним размером зерна до 100 мкм. Эксперименты показали, что увеличение среднего зерна обрабатываемого материала более 100 мкм не приводит к значительным изменениям шероховатости, характеризуемой величинами Spd и Spc.

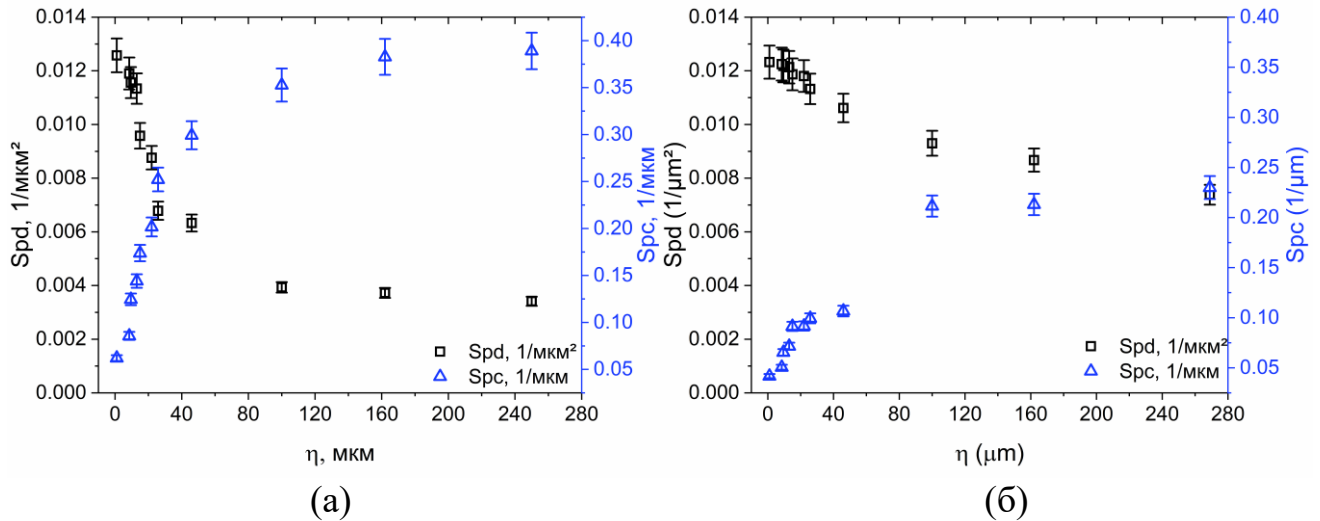


Рисунок 4.10 – Зависимости плотности пиков и среднего арифметического кривизны высших точек от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: (а) медь; (б) сталь.

По результатам анализа группы трехмерных характеристик шероховатости высоты (S_a , S_q , S_z , S_{sk} , S_{ku}), гибридных (S_{dq} , S_{dr}) и элемента (S_{pd} , S_{pc}) можно сделать вывод о том, что при аппаратной абразивной обработке поверхностей меди и стали использование абразивов со средним размером зерна до 100 мкм позволяет значительно изменить текстуру, в частности, высоту неровностей и глубину полостей (характеризующиеся S_z), продольное и поперечное расстояние между неровностями и полостями по поверхности (характеризующиеся S_a или S_q), площади поверхности (характеризующиеся S_{dq} или S_{dr}), плотность расположения неровностей и полостей по поверхности (характеризующиеся S_{pd}), а также радиус кривизны неровностей (характеризующийся S_{pc}). Использование абразивных материалов с η более 100 мкм не приводит к значительным изменениям шероховатости, образованной материалом с $\eta = 100$ мкм.

Известно, что от шероховатости поверхностей металлов зависит интенсивность протекания процессов растекания малых объемов жидкостей [164], испарения [165], кипения [166], конденсации [167], а также зависят функциональные свойства (смачивание [91], износостойкость при абразивном износе [169], химическая стойкость [170]). Можно сделать вывод о том, что для управления интенсивностью процессов, реализуемых на технологических поверхностях меди и стали, а также изменения их функциональных свойств, зависящих от шероховатости, необходимо использовать абразивные материалы со средним размером до 100 мкм при аппаратной абразивной обработке. Использование же материалов со средним размером зерна более 100 мкм при абразивной обработке поверхностей меди и стали незначительно изменяет их шероховатость, образованной абразивной обработкой материалом со средним размером зерна 100 мкм. Следовательно, использование абразивных материалов со средним размером зерна более 100 мкм позволит незначительно изменить функциональные свойства приповерхностного слоя меди и стали текстура, которых образована материалом с $\eta=100$ мкм и не приведет к значительной интенсификации (или замедлению) процессов, реализуемых на них.

4.2 Изменение элементного состава образцов меди и стали после абразивной обработки

Поверхность любого металла окисляется при абразивной обработке и полировке [171]. После модификации приповерхностного слоя неполярные молекулы насыщенных углеводородов адсорбируются на поверхностях металлов [172]. В этом случае адсорбция происходит под действием поляризации неактивных молекул углеводорода электрическим полем поверхности металла [173].

Проведено сравнение химического состава приповерхностных слоев полированной Cu_1 и абразивно-обработанных медных образцов $\text{Cu}_{8,5} - \text{Cu}_{269}$ (рис. 4.11).

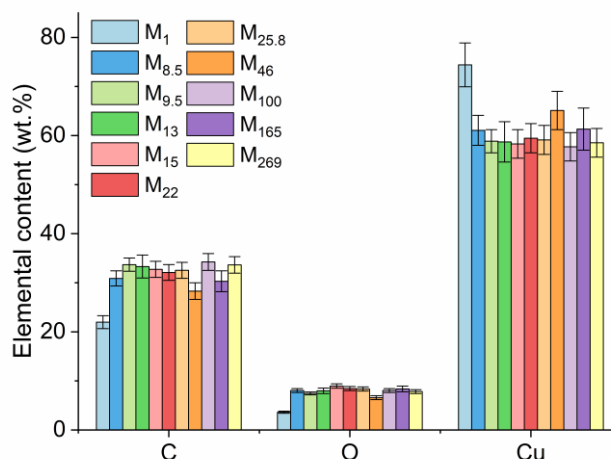


Рисунок 4.11 – Массовый элементный состав медных образцов.

Установлено, что доля кислорода в элементном составе абразивно-обработанных образцов увеличилась до $\approx 7,5\%$, в сравнении с полированным ($\approx 3,6\%$), а доля углерода возросла с $20,5\%$ (полированная поверхность) до 31% (абразивно-обработанные). Учитывая инструментальную погрешность измерения (5%), а также случайную (измерения проводились 3 раза, элементный состав усреднён по площади образца), можно сделать вывод о том, что элементный состав поверхностей меди одинаков по прошествии одного месяца после обработки абразивными материалами со средним зерном от 1 до 269 мкм. Следовательно, элементный состав не оказывает влияния на различие в свойствах смачивания (контактных углах), поверхностной энергии поверхностей меди, обработанных абразивом, характеризующимся средним зерном от 1 до 269 мкм.

Сталь является ферромагнетиком, поэтому при воздействии приставки EDS Bruker XFlash 40 может происходить намагничивание датчика и дальнейшее искажение результатов, поэтому химический анализ стальных образцов не проводился.

4.3 Поверхностная энергия и смачивание абразивно-обработанных образцов меди и стали

На рисунке 4.12 приведены зависимости поверхностной энергии, рассчитанной по методике [135], и измеренных статических контактных углов от характеристик шероховатости.

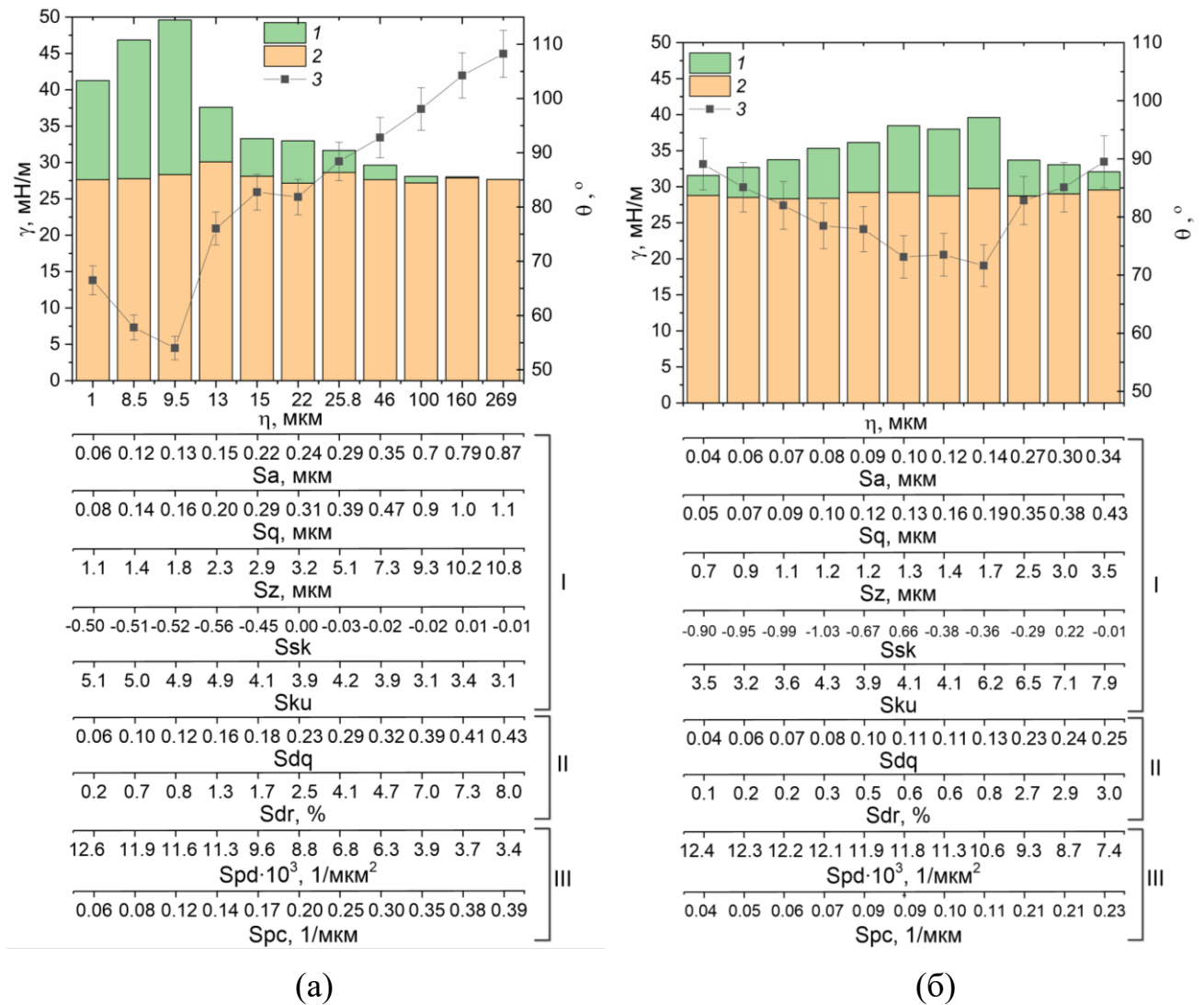


Рисунок 4.12 – Зависимости поверхностной энергии (полярной (1) и дисперсной (2) составляющих) и статического контактного угла (3) от характеристик шероховатости: (а) медь, (б) сталь. I – высотные характеристики шероховатости; II – гибридные характеристики шероховатости; III – характеристики элемента.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что после абразивной обработки полярная составляющая СПЭ поверхностей меди изменяется в диапазоне от 0,1 до 21,3 мН/м (рис. 4.12(а)), поверхностей стали от 2,5 до 9,8 мН/м (рис. 4.12(б)). Дисперсная составляющая поверхностной энергии незначительно изменяется на поверхностях меди от 27,2 до 30,1 мН/м (рис. 4.12(а)) и стали от 28,3 до 29,8 мН/м (рис. 4.12(б)). Известно [174], что механические напряжения не влияют на дисперсионную составляющую поверхностной энергии. После абразивной обработки в элементном составе приповерхностных слоев меди возрастает содержание кислорода и углерода (п. 4.2). По результатам анализа элементного состава (п. 4.2) установлено, что доля кислорода и углерода в элементном составе образцов $\text{Cu}_{8,5}$ – Cu_{269} практически одинакова. Поэтому содержание в приповерхностном слое этих элементов не может быть основным фактором, влияющим на изменение полярной составляющей СПЭ и контактного угла поверхностей меди и стали (рис. 4.12). Такое изменение полярной составляющей (рис. 4.12) и контактного угла после абразивной обработки оказывает влияние шероховатость поверхности меди и стали.

По результатам анализа рис. 4.12 условно выделены два диапазона изменения полярной составляющей и контактного угла с ростом шероховатости, оценка которых выполнена по трехмерным параметрам шероховатости. В первом диапазоне с ростом шероховатости полярная составляющая растет, контактный угол уменьшается (свойства смачиваемости улучшаются). Улучшение смачиваемости можно объяснить следующим. Когда расстояние между двумя соседними пиками невелико (плотность пиков не менее $\text{Spd} \approx 10,6\text{--}11,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мкм}^2$ (рис. 4.12)) по сравнению с их высотой (высота выступов не менее 1,7 мкм (рис. 4.12)) пики и полости на поверхности образуют капилляр. За счет капиллярных сил жидкость лучше смачивает поверхность, на которой образованы такого вида капилляры.

Во втором условно выделенном диапазоне (рис. 4.12) с ростом шероховатости полярная составляющая уменьшается, контактный угол растет

(свойства смачиваемости ухудшаются). Из рис. 4.12 видно, что переход между условно выделенным первым и вторым интервалом на поверхностях меди и стали происходит при близких по значению характеристик $Sa \approx 0,13-0,14$ мкм, $Sq \approx 0,16$ мкм, $Sz \approx 1,7-1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,12-0,13$, $Sdr \approx 0,8$ %, $Spd \approx 10,6-11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², $Spc \approx 0,11-0,12$ 1/мкм. Также из рис. 4.12 видно, что характеристики шероховатости Sku , Ssk для поверхностей меди и стали при этом переходе значительно отличаются. Стоит отметить, что параметры Sa и Sq являются аналогами друг друга, как и Sdq и Sdr , а также Spd и Spc . Следовательно, при анализе текстуры поверхностей можно применять одну из каждой пары приведенных характеристик. На основании анализа рис. 4.12 можно сделать вывод о том, что при росте шероховатости после абразивной обработки поверхностей меди и стали, шероховатость которых по оценке группы характеристик не будет превышать значения порядка $Sa \approx 0,14$ мкм, $Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$ мкм, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², их поверхностная энергия будет увеличиваться, следовательно, свойства смачиваемости улучшатся. Если же текстура поверхностей меди и стали после абразивной обработки характеризуется величинами, значения которых превышают $Sa \approx 0,14$ мкм, $Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то свойства смачиваемости будут ухудшаться. Стоит отметить, что нельзя использовать один параметр из группы (Sa , Sz , Sdq , Spd) в качестве критерия, характеризующего шероховатость поверхности меди и стали. Анализ шероховатости поверхности по одной характеристике крайне ошибочен.

Согласно уравнению Венцеля [163], если молекулярно-гладкая поверхность характеризуется гидрофильными свойствами, то увеличение шероховатости такой поверхности улучшает свойство смачиваемости. Последнее хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными в первом условно выделенном диапазоне роста шероховатости (рис. 4.12). Установлено, что вывод, следствий из уравнения Венцеля, по усилению свойств смачивания гидрофильных поверхностей за счет роста шероховатости справедлив для абразивно-обработанных поверхностей меди и стали, если их шероховатость, характеризуемая трехмерными параметрами, не превышает значения $Sa \approx 0,14$ мкм,

$Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$ мкм, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм² и образует из пиков и впадин капилляр. Из рис. 4.12 видно, что в условиях, соответствующих второму, условно выделенному интервалу, следствие из уравнения Венцеля противоречит полученным экспериментальным результатам. Такое же противоречие установлено в работах при магнетронном нанесении меди на подложки из кремния [175], при абразивной обработке сплава алюминия, стали, меди, керамики, органического стекла и титана [91].

Согласно современным представлениям [131] свободную поверхностную энергию молекулярно-гладкого тела можно представить в виде двух составляющих:

$$\gamma = \gamma^P + \gamma^D$$

где γ – свободная поверхностная энергия; γ^P – полярная составляющая поверхностной энергии; γ^D – дисперсная (неполярная) составляющая поверхностной энергии.

Полярная составляющая поверхностной энергии характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные связи), а дисперсная характеризует слабые связи дисперсионных сил (ван-дер-ваальсовых взаимодействий). Такие связи и межмолекулярные взаимодействия обусловлены элементарным составом приповерхностного слоя. Как показано выше, полярная составляющая, зависит от шероховатости, следовательно, можно сделать вывод, что полярная составляющая кроме связи между молекулами учитывает и шероховатость приповерхностного слоя.

Из рис. 4.12 видно, что абразивная обработка позволяет изменять свойства смачиваемости в достаточно широком диапазоне изменения контактных углов (для поверхностей меди от 54° (гидрофильные свойства) до 108,2° (гидрофобные свойства), для поверхностей стали от 71,6° до 89,5° (гидрофильные свойства)).

Известно [176], что путем изменения химического состава молекулярно-гладкой поверхности невозможно получить углы, превышающие 120°. Поэтому изменение шероховатости поверхности является эффективным способом

получения поверхностей с разными свойствами смачивания (варьированием угла в широких диапазонах).

Следует отметить, что абсолютные значения поверхностной свободной энергии следует использовать с осторожностью, поскольку расчеты поверхностной энергии основаны на уравнении Юнга, при выводе которого предполагается термодинамическое равновесие. Но это условие не выполняется на шероховатых поверхностях. В тоже время определение поверхностной энергии путем измерения углов смачивания является подходящим методом для сравнения эффективности модификации поверхностей в результате абразивной обработки.

4.4. Смачивание и растекание капель жидкости на абразивно-обработанных поверхностях алюминий-магниевого

С целью обоснования механизма влияния шероховатости поверхности на смачивание и растекание исследована микроструктура поверхностей алюминий-магниевого сплава АМг6 (рис. 4.13) исследована с помощью комплекса «Micro Measure 3D station».

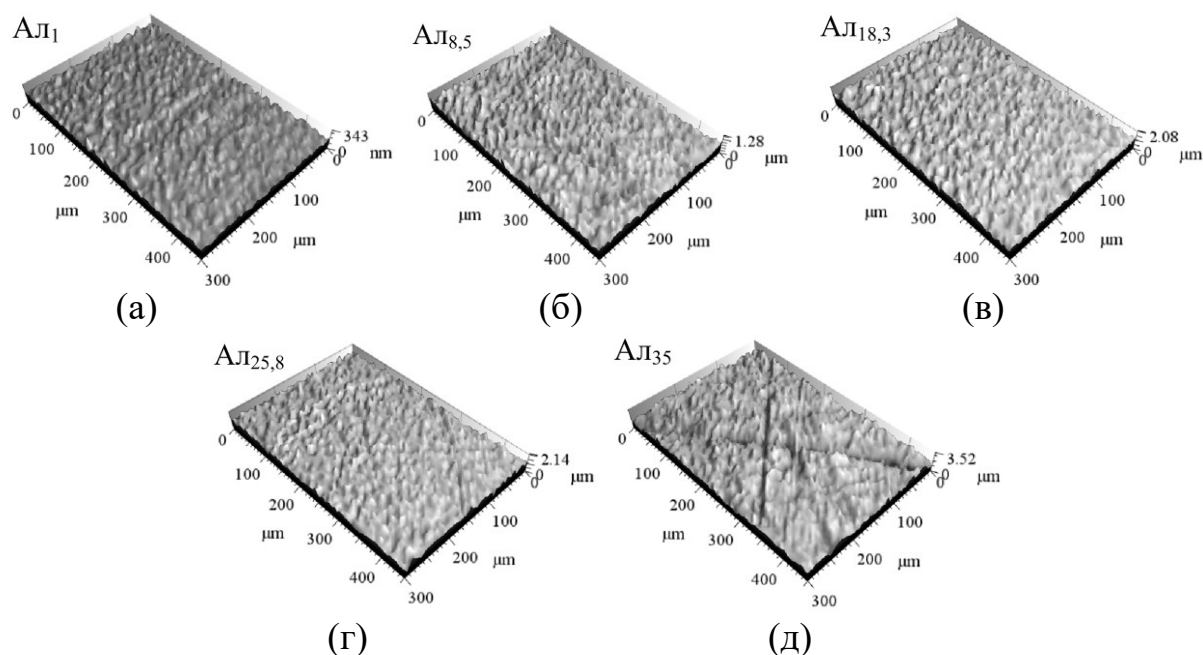


Рисунок 4.13 – Трехмерные изображения текстуры поверхностей образцов стали после обработки абразивными дисками со средним размером зерна, мкм: (а) – 1; (б) – 8,5; (в) – 18,3; (г) – 25,8; (д) – 35.

Зависимости использовавшихся при анализе характеристик шероховатости от среднего размера зерна представлены на Рис. 4.14.

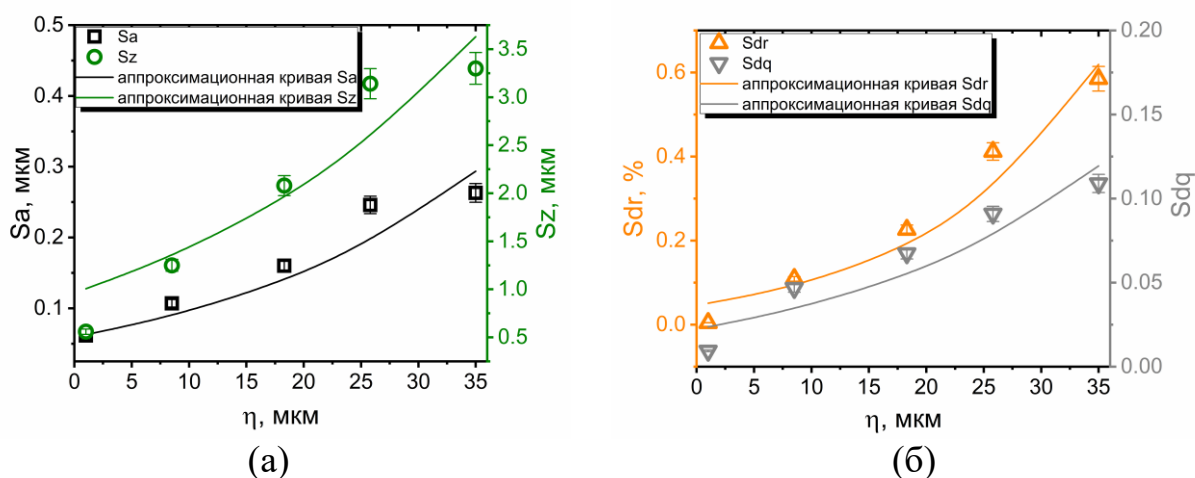


Рисунок 4.14 – Зависимости характеристик шероховатости от среднего размера зерна: (а) амплитудных, (б) гибридных. Sa – среднее арифметическое отклонение поверхности; Sz – максимальная высота неровностей поверхности; Sdq – приращение среднеквадратичного отклонения профиля; Sdr – уровень развернутой межфазной поверхности.

Из рисунка 4.14 видно, что с увеличением среднего размера зерна абразивных дисков от 1 до 35 μm при обработке ими поверхности алюминиевого сплава амплитудные Sa , Sz и гибридные Sdq , Sdr характеристики шероховатости поверхности изменяются по экспоненте. Стоит отметить, что прирост площади поверхности после обработки диском со средним размером зерна 35 μm составил не более 0,6 % относительно молекулярно-гладкой (рис. 4.14 (б), регрессионная функция Sdr). При этом максимальная высота неровностей увеличилась в 6 раз, т.е. более чем на 3 μm (рис. 4.14 (а), регрессионная функция Sz), а рост Sa составил 0,26 μm , что соответствует увеличению в 4 раза. Можно сделать вывод, что в условиях абразивной обработки (в широких пределах варьирования среднего размера зерна от 1 μm до 35 μm) на поверхности алюминиевого сплава создается хаотично-ориентированная текстура из разнонаправленных перекрещивающихся канавок микрометрового размера (рис. 4.13). В таких условиях обработки площадь поверхности увеличивается незначительно, но на

текстуре поверхности образуются локальные неровности, которые являются энергетическими барьерами [177], препятствующими движению капли по таким поверхностям.

4.4.1 Смачивание абразивно-обработанного алюминиево-магниевого сплава

Проведен анализ влияния текстуры (шероховатости) на свойства смачиваемости созданных поверхностей алюминиевого сплава. На рисунке 4.15 представлены типичные зависимости статического и динамических контактных углов в условиях растекания капли с расходом 5 мкл/с от амплитудных (S_a , S_z) и гибридных (S_{dr} , S_q) характеристик шероховатости.

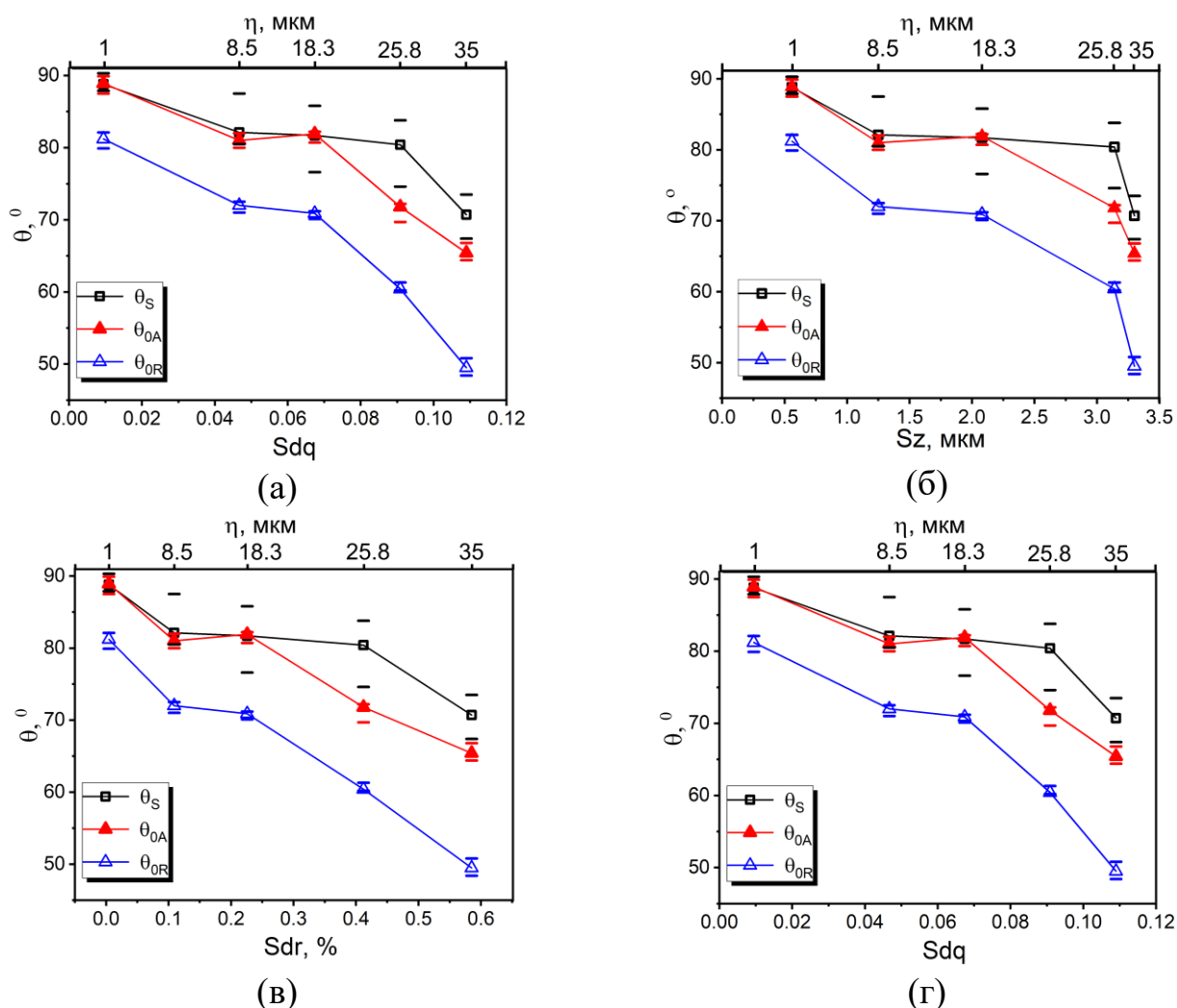


Рисунок 4.15 – Зависимости статических и динамических контактных углов от характеристик шероховатости в условиях растекания капли с расходом 5 мкл/с: (а, б) амплитудных; (в, г) гибридных. Горизонтальными отрезками представлен разброс экспериментальных данных.

Из рисунка 4.15 видно, что на текстурах, характеризующихся большими значениями характеристик шероховатости (S_a , S_z , S_{dr} , S_{dq}), статический и динамические контактные углы меньше.

Согласно основным положениям теории Венцеля-Дерягина [163,178] увеличение шероховатости гидрофильной поверхности способствует усилению ее гидрофильных свойств. По результатам проведенной серии экспериментов установлено, что увеличение шероховатости (оценка которой проведена по характеристикам S_a , S_z и S_{dr}) способствовало усилению гидрофильных свойств (рис. 4.15). Так как алюминиевый сплав в состоянии молекулярно-гладкой текстуры демонстрирует гидрофильные свойства, то полученные результаты согласуются с положениями теории Венцеля-Дерягина. Стоит отметить, что согласно уравнению Венцеля-Дерягина [163,178] для шероховатой поверхности $\cos \theta_r = r \cdot \cos \theta$, изменение контактного угла прямо пропорционально характеристике шероховатости r (отношение фактической площади к ее проекции). По результатам анализа сформированных текстур установлено, что приращение площади поверхности, характеризующее величиной S_{dr} , составило не более 0,6 % (рис. 4.14 (б)). Следовательно, изменение контактного угла не прямо пропорционально (рис. 4.15) приращению площади поверхности. Можно предположить, что на свойства смачиваемости (изменения контактного угла) после абразивной обработки поверхности алюминиевого сплава помимо увеличения площади поверхности, значительное влияние оказывают геометрические характеристики элементов текстуры (углублений и возвышенностей), которые характеризуются значениями S_a и S_z . Однако тривиальной зависимости изменения контактного угла от этих характеристик не установлено (рис. 4.15 (а)).

Известно [179], что статический контактный угол должен находиться в интервале измеренных на этой же поверхности динамических углов натекания и отекания ($\theta_{0R} \leq \theta_S \leq \theta_{0A}$). Из рисунка 4.15 видно, что статический контактный угол, измеренный на полированной поверхности находится в интервале $\theta_{0R} \leq \theta_S \leq \theta_{0A}$.

На образцах, поверхность которых обработана абразивными дисками, статический контактный угол больше динамического угла натекания. Для объяснения этого эффекта предложена гипотеза о том, что шероховатость поверхности является причиной метастабильного равновесия системы “твёрдое тело–жидкость–газ”. Согласно молекулярно-кинетической модели [78] при дозировании капли на молекулярно-гладкую поверхность состояние равновесия устанавливается только тогда, когда кинетическая энергия капли рассеивается. Если поверхность шероховатая, то кинетическая энергия капли при ее дозировании рассеивается до достижения термодинамически равновесного состояния. Контактная линия капли при ее растекании по поверхности “зацепляется” за неровности, что приводит к увеличению статического угла. В этом случае статический контактный угол будет больше динамического угла натекания. Термодинамически равновесного состояния на шероховатой поверхности можно достичь внешним воздействием, например, вибрацией [179]. После её воздействия статический контактный угол уменьшается [179], метастабильное состояние переходит в равновесное, статический контактный угол будет находиться в интервале $\theta_{0R} \leq \theta_S \leq \theta_{0A}$. Стоит отметить, что при увеличении расхода дозирования капли с 5 мкл/с до 100 мкл/с отклонение от равновесного состояния усиливается (разница между статическим контактным углом и динамическим натекания растёт).

3.4.2 Динамические характеристики процесса растекания капель на абразивно-обработанных поверхностях алюминиево-магниевого сплава

Гистерезисы контактных углов ($\Delta\theta$) определены в соответствии с методикой [76], как разница между динамическими углами натекания и оттекания при неподвижной КЛ. Зависимости гистерезиса от характеристик шероховатости приведены на рисунке 4.16.

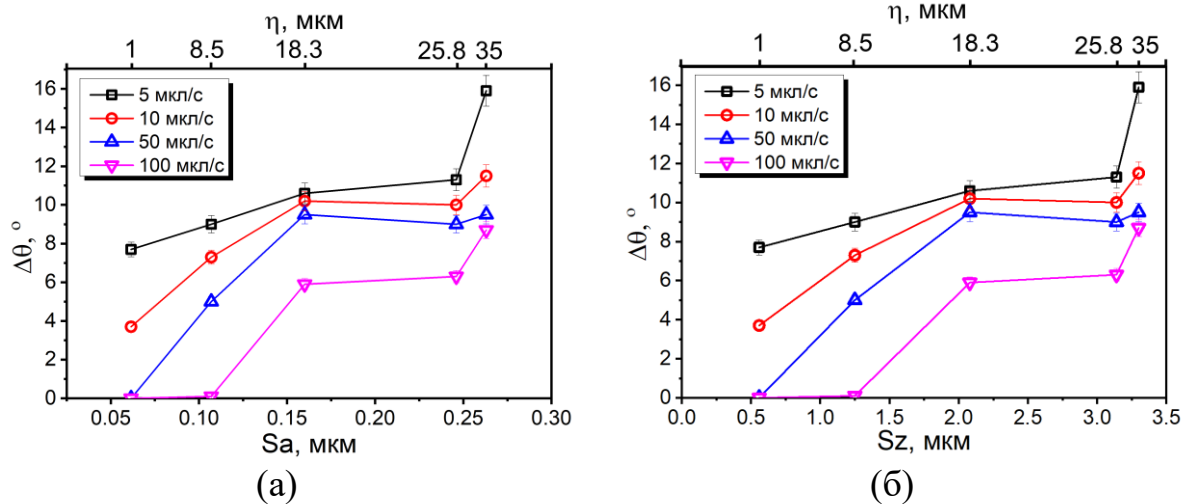


Рисунок 4.16 – Зависимости гистерезиса контактного угла от амплитудных характеристик шероховатости при разных расходах жидкости: (а) Sa ; (б) Sz .

Из рисунка 4.16 видно, что при расходе 100 мкл/с на абразивно-обработанных зерном со средним размером менее 8,5 мкм поверхностях гистерезисы контактного угла менее 1° , что не более погрешности измерений. Зависимость $\Delta\theta$ от среднего размера зерна (рис. 4.16) в интервале от 18,3 до 35 мкм растет. Уменьшение расхода дозирования капли от 100 мкл/с до 5 мкл/с увеличивает гистерезис. Это можно объяснить тем, что при абразивной обработке на поверхности образуются разноразмерные хаотично расположенные неровности в виде канавок (рис. 4.13). Последние являются энергетическими барьерами, препятствующими движению капли. Количественными характеристиками этих неровностей являются величины Sa и Sz . Первый из них характеризует средний размер неровностей вдоль горизонта по направлению движения контактной линии, второй – максимальный размер десяти неровностей по вертикали. Стоит отметить подобные зависимости Sa и Sz от среднего размера зерна (рис. 4.14). При растекании капли по поверхности контактная линия зацепляется за неровности (энергетические барьеры, препятствующие её движению). Если кинетическая энергия капли (которая зависит от расхода дозирования) достаточна для преодоления энергетических барьеров, то жидкость беспрепятственно растекается (контактная линия не «пиннингуется»), гистерезис в этом случае будет минимальным. На рисунке 4.16 такому случаю соответствуют

условия расхода 100 мкл/с при растекании капли по поверхностям, которым соответствуют Sa и Sz не более 0,11 и 1,25 мкм, соответственно. При этом же расходе вследствие шероховатости с характеристиками $Sa > 0,16$ мкм и $Sz > 2,08$ мкм зарегистрирован рост гистерезиса до $5,9^\circ$. В этом случае кинетической энергии капли недостаточно для преодоления неровностей, КЛ «пиннинговалась» на них. С уменьшением расхода дозирования капли от 100 мкл/с до 5 мкл/с кинетической энергии капли недостаточно для преодоления неровностей на поверхностях с Sa и Sz менее 0,11 и 1,25 мкм, что вызывает пиннинг КЛ и увеличение гистерезиса (рис. 4.16) (не противоречит выводам [180]). Можно сделать вывод, что гистерезис контактного угла зависит от геометрических размеров неровностей на поверхности и кинетической энергии капли.

На рисунке 4.17 представлены типичные зависимости скорости перемещения контактной линии на поверхностях алюминиевого сплава в условиях расхода дозирования 5 мкл/с.

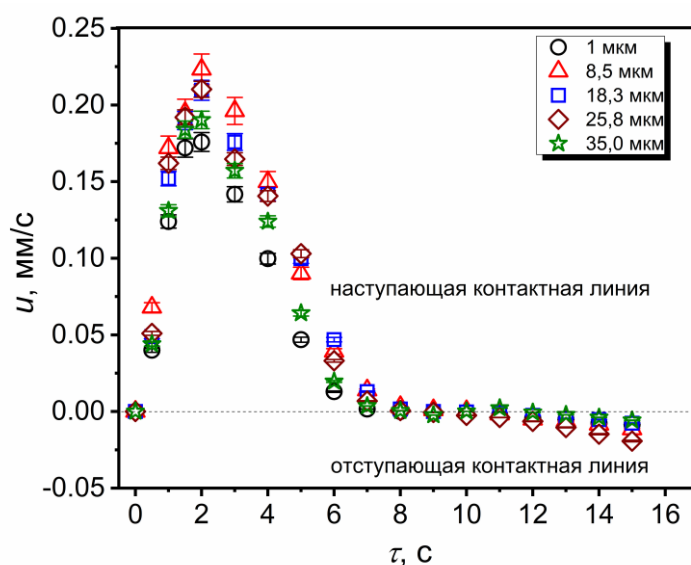


Рисунок 4.17 – Зависимости скорости перемещения контактной линии от времени растекания поверхности сплава АМгб в условиях расхода дозирования 5 мкл/с.

Положительные значения u (рис. 4.17) соответствуют движению наступающей контактной линии (в условиях работы насоса в режиме подачи жидкости), отрицательные u – отступающей контактной линии (в условии работы насоса в режиме откачки жидкости). Кривые, соответствующие образцам,

обработанным дисками с различным средним размером зерна, имеют одинаковый вид, следовательно, шероховатость поверхности не оказала значительного влияния на скорость перемещения контактной линии по поверхности сплава. Доминирующим фактором в этом случае является расход дозирования, с ростом которого скорость движения КЛ увеличивается.

4.4.3 Математическое моделирование растекания капель жидкости по абразивно-обработанным поверхностям алюминиевого сплава

Полученные экспериментальные зависимости ДКУ от скорости перемещения КЛ (рис. 4.18) сопоставлены с выражениями (1.2) и (1.3) молекулярно-кинетической модели [78,79]. Известная гидродинамическая модель [81] не использовалась, как и в работах [77,181], вследствие возникновения пиннинга при движении капли по шероховатым образцам.

Для аппроксимации экспериментальных данных уравнениями (1.2) и (1.3) использовался метод наименьших квадратов. Значения параметров ξ , k^0 , λ , θ в первом приближении приняты по данным [83,85,143,182–185] и в последующих итерациях выбирались таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений рассчитанных значений ДКУ от экспериментальных была минимальной. Анализ соответствия экспериментальных данных и теоретических зависимостей проведен с использованием коэффициента детерминации R^2 . Определены параметры ξ , k^0 , λ . Равновесный контактный угол θ в выражениях МКМ (1.2) и (1.3) принимался как варьируемый параметр.

Аппроксимация экспериментальных данных выражениями (1.2) и (1.3) проводилась отдельно для условий натекания и оттекания с целью исключения гистерезиса контактного угла. Ранее установлено [143] большое отклонение экспериментальных данных от теоретических зависимостей (1.2) и (1.3) при ГКУ равном 5° . Полученные значения ГКУ на абразивных поверхностях превышают эту величину. Поэтому можно предположить, что отклонения будут еще существеннее. Отсюда следует, что величины равновесных углов в выражениях

МКМ (1.2) и (1.3) соответствуют динамическим углам натекания и оттекания в условиях пиннинга контактной линии.

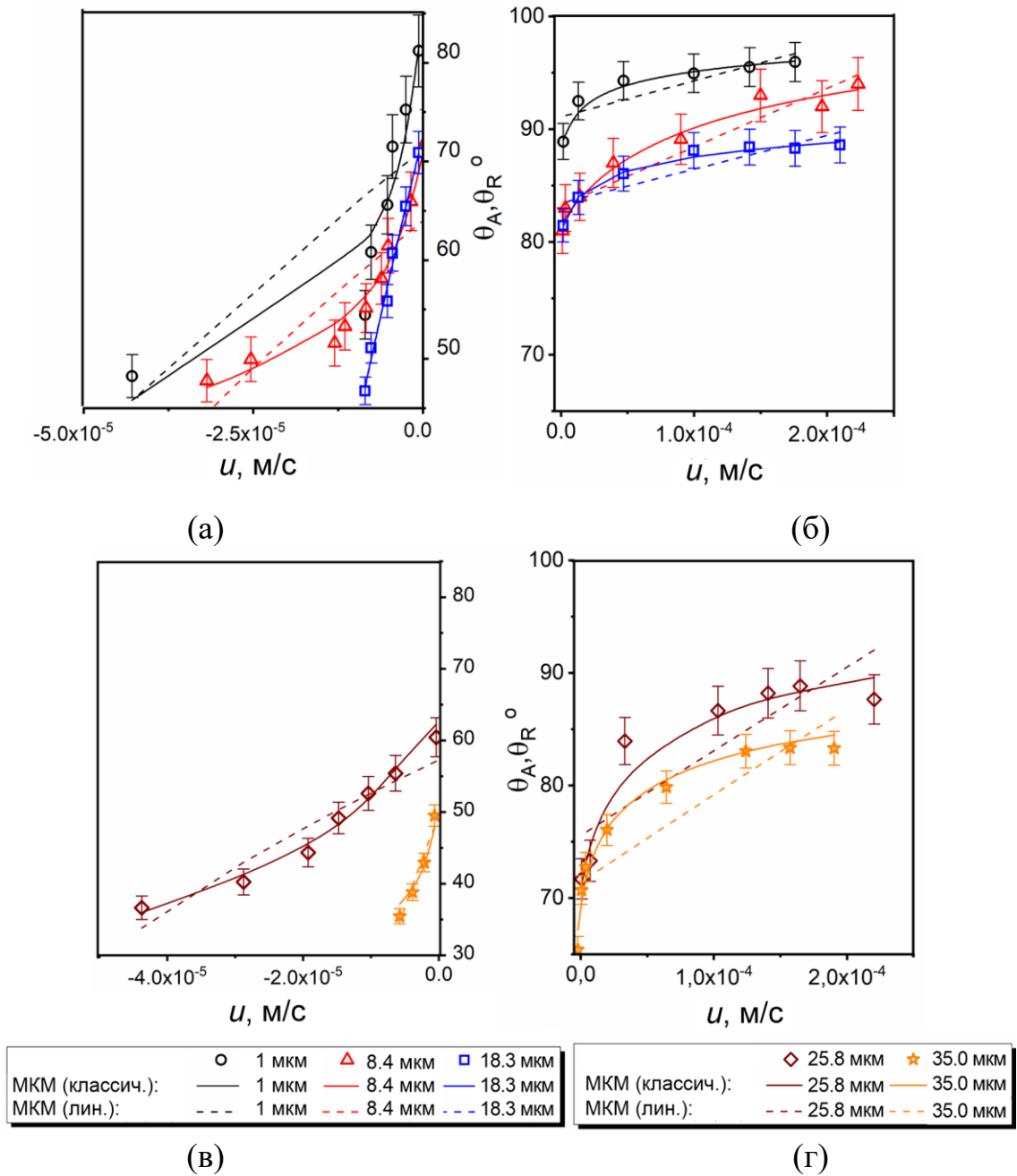


Рисунок 4.18 – Зависимость динамических наступающих (б, г) и отступающих (а, в) контактных углов от скорости перемещения контактной линии.

В таблице 4.2 представлены параметры моделей (1.2) и (1.3), полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных (в условиях расхода дозирования 5 мкл/с) зависимостями МКМ (классической и линейной). Можно сделать вывод, что при использовании выражения (1.2) МКМ отклонения меньше.

Из таблицы 4.2 видно, что среднее расстояние между соседними участками адсорбции молекул λ варьируется в пределах $0,9 \div 2,1$ нм, что больше размера молекул воды 0,28 нм. Полученный диапазон согласуется с результатами расчетов [83,85,143,182–185]. Равновесная частота случайных молекулярных перемещений изменяется в пределах $k^0 = 141,2 \div 2957,4$ Гц и отличается от полученных в [143] для условий натекания и оттекания жидкости по полированной поверхности алюминиево-магниевого сплава. Это связано с высокой скоростью перемещения контактной линии, обусловленной расходом (50–110 мкл/с), больше чем в настоящем исследовании, что и привело к росту частоты случайных молекулярных перемещений, которая колеблется в диапазоне 10^3 – 10^4 Гц в [143]. Такой широкий диапазон изменения $k^0 = 141,2 \div 2957,4$ Гц можно объяснить хаотичным расположением элементов шероховатости.

Таблица 4.2 – Параметры, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных.

η, мкм	ДКУ θ_{0A}/θ_{0R}	Модели						
		МКМ по выражению (1.2)				Линейная МКМ по выражению (1.3)		
		θ , °	k^0 , Гц	λ , нм	R ²	θ , °	ξ, Па·с	R ²
Наступающая контактная линия $\theta_A(u)$								
1	88,9	86,4	141,2	2,1	0,99	91,1	40,0	0,63
8,5	81,0	81,6	331,8	1,9	0,91	83,2	65,1	0,80
18,3	81,5	80,8	1121,5	1,9	0,99	83,5	37,5	0,78
25,8	71,7	70,7	2216,4	1,2	0,96	75,6	92,8	0,70
35,0	65,4	69,1	2957,4	1,4	0,99	71,3	94,5	0,86
Отступающая контактная линия $\theta_R(u)$								
1	81,2	83,7	542,1	0,9	0,88	71,2	626,8	0,58
8,5	72,0	70,9	740,1	1,1	0,98	64,0	619,5	0,71
18,3	70,9	72,7	521,2	1,0	0,83	72,4	3189,4	0,99
25,8	60,4	63,4	771,3	1,2	0,94	57,7	486,5	0,87
35,0	49,5	53,5	401,1	1,1	0,99	49,4	2164,9	0,94

Аппроксимационная зависимость (1.3) МКМ неудовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (рис. 4.18). Это связано с тем, что в

условиях натекания (оттекания) жидкости по поверхности динамический контактный угол изменяется нелинейно с изменением скорости перемещения КЛ. Исключением является аппроксимация зависимости ДКУ оттекания от скорости перемещения КЛ на образце, обработанном дисками со средним размером зерна 18,3 мкм. В этом случае из-за линейного вида $\theta_R = f(u)$ уравнение (1.3) лучше описывает экспериментальные данные (для МКМ по выражениям (1.2) – $R^2 = 0,83$, (1.3) – $R^2 = 0,99$). Коэффициент трения контактной линии ξ в выражении (1.3) варьируется в пределах $37,5 \div 92,8$ Па·с для наступающей контактной линии и $486,5 \div 3189,4$ Па·с – для отступающей. При растекании капли воды на полиэтилентерефталате [83] он равнялся 0,01 Па·с. Однако для жидкостей с большей вязкостью, например, силиконовое масло на стекле [184], ξ достигало 3580 Па·с. Значения коэффициентов трения можно считать физическими обоснованными, поскольку в проведенных исследованиях использовались поверхности с большей шероховатостью по сравнению с полиэтилентерефталатом, то есть имело место достаточно большое трение жидкости, вследствие которого происходит пиннинг контактной линии.

Выводы по четвертой главе

1. При аппаратной абразивной обработке поверхностей меди и стали использование абразивов со средним размером зерна до 100 мкм позволяет значительно изменить высоту неровностей и глубину полостей (характеризующиеся S_z), продольное и поперечное расстояние между неровностями и полостями по поверхности (характеризующиеся S_a или S_q), площадь поверхности (характеризующаяся S_{dq} или S_{dr}), плотность расположения неровностей и полостей по поверхности (характеризующиеся S_{pd}), а также радиус кривизны неровностей (характеризующийся S_{pc}). Использование абразивных материалов со средним размером более 100 мкм не приводит к значительным изменениям шероховатости, образованной материалом с зерном 100 мкм. Следовательно, для управления интенсивностью процессов, реализуемых на

технологических поверхностях меди и стали, а также изменения их функциональных свойств, зависящих от шероховатости, необходимо использовать абразивные материалы со средним размером до 100 мкм при аппаратной абразивной обработке.

2. Установлено, что абразивная обработка значительно изменяет полярную составляющую свободной поверхностной энергии и не изменяет её дисперсную составляющую. Условно выделены два диапазона изменения полярной составляющей и свойств смачиваемости с ростом шероховатости, оценки которых выполнены по трехмерным характеристикам шероховатости. Установлено, что, если после абразивной обработки шероховатость поверхностей меди и стали, оцененная группой трехмерных характеристик шероховатости, не будет превышать значения $Sa \approx 0,14$ мкм, $Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то поверхностная энергия будет увеличиваться, следовательно, свойства смачиваемости улучшатся. Улучшение смачиваемости связано с образованием текстуры в форме капилляров. Вследствие капиллярных сил жидкость лучше смачивает поверхность, на которой образованы такого вида капилляры. Если же текстура поверхностей меди и стали после абразивной обработки характеризуется величинами, значения которых превышают $Sa \approx 0,14$ мкм, $Sz \approx 1,8$ мкм, $Sdq \approx 0,13$, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то поверхностная энергия уменьшается, а свойства смачиваемости будут ухудшаться.

3. Абразивная обработка позволяет изменять свойства смачиваемости в достаточно широком диапазоне изменения контактных углов. Для поверхностей меди от 54° (гидрофильные свойства) до 108,2° (гидрофобные свойства), для поверхностей стали от 71,6° до 89,5° (гидрофильные свойства).

4. Установлено, что при механической обработке алюминиевого сплава трехмерные характеристики шероховатости (Sa , Sz , Sdr , Sdq) увеличиваются по экспоненте при увеличении размера зерна с 1 до 35 мкм. Показано, что после абразивной обработки со средним размером зерна 35 мкм площадь поверхности сплава АМг6 увеличивается незначительно (не более 0,6 %), а статический контактный угол уменьшается с 88,8° до 70,7°. Поскольку молекулярно-гладкая

поверхность алюминиевого сплава демонстрирует гидрофильные свойства, то полученные экспериментальные значения контактного угла после абразивной обработки качественно согласуются с положениями теории Венцеля-Дерягина. Однако количественно уменьшение контактного угла не согласуются с результатами расчетов по уравнению Венцеля-Дерягина.

5. Установлено, что после абразивной обработки поверхности алюминиевого сплава капля дистиллированной воды объемом 10 мкл будет находиться в метастабильном состоянии, которое характеризуется значительным гистерезисом и неравенством $\theta_{0R} \leq \theta_{0A} \leq \theta_S$. Также установлено, что на отклонение от равновесного состояния помимо текстуры влияет расход дозирования капли. От последнего также зависит гистерезис контактного угла. Из метастабильного состояния в стабильное каплю на шероховатой поверхности можно перевести вибрацией подложки. Стабильное состояние капли на поверхности важно для технологий, в которых реализуется капельное дозирование на поверхность, например, оросительные системы охлаждения, микрофлюидные устройства.

6. Полученные зависимости динамического контактного угла натекания от скорости перемещения контактной линии описаны аппроксимационными выражениями молекулярно-кинетической модели (линейной и классической). Получено хорошее согласование с классической зависимостью $\theta(u)$.

Основные результаты и выводы

1. По результатам экспериментальных исследований свойств смачиваемости специальные огнетушащие составы условно разделены на две группы. При тушении пожаров жидкостями первой группы (суспензия бентонита, раствор бишофита) подавление пламени происходит за счет осаждения твердых частиц и образования огнестойкого слоя в зоне пиролиза ЛГМ, благодаря чему происходит подавление процесса выхода газообразного горючего. Вторая группа жидкостей (эмульсия пенообразователя и раствор ОС-5), за счет низкого поверхностного натяжения (хороших свойств смачиваемости), пропитывает элементы ЛГМ на всю глубину слоя (до зоны пиролиза), охлаждая горючий материал и препятствуя его пиролизу.

2. Установлено, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться значительно (например, в 2 раза при $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для воды и эмульсии пенообразователя). Показано, что с ростом температуры поверхности нагрева средние времена полного испарения капель исследовавшихся достаточно типичных составов становились сопоставимыми.

3. В подавлении процессов термического разложения лесных горючих материалов доминирующую роль играет не только поглощение теплоты в результате испарения воды, а также воздействие твердых продуктов (остающихся после испарения воды эмульсий, растворов и суспензий) – компонент специальных составов на элементы ЛГМ и соответствующее изменение их теплофизических и термохимических свойств.

4. Экспериментальные исследования показали, что времена существования (полного испарения) капель перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться при нагреве на подложке в 3,7 раза (например, при $T \approx 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ для суспензии бентонита и эмульсии пенообразователя), в

потоке воздуха – в 1,25 раза (при $T \approx 100$ °С для эмульсии пенообразователя и суспензии бентонита), в муфельной печи – в 1,9 раза (при $T \approx 100$ °С для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя) при идентичных схемах и температурах источника нагрева. Эти результаты показывают, что для обеспечения полного испарения капель таких составов в зоне горения лесного массива с различным тепловыделением необходимы разные высоты сброса и, соответственно, отличающиеся длительности прогрева и движения в пламенной зоне горения.

5. Диапазон изменения скоростей испарения огнетушащих составов составил 0,00788–0,07589 кг/(м²с) при температуре нагрева 70–100 °С (схема с нагревом на подложке). При этом максимальные значения скоростей испарения соответствовали эмульсии пенообразователя (концентрация 10 %), а минимальные – раствору бишофита (концентрация 10 %) и воде без примесей. В целом диапазон изменения зарегистрированных значений скоростей испарения огнетушащих составов составил 0,006–0,102 кг/(м²с) при температурах нагрева 70–600 °С.

6. Выделены три режима испарения водных растворов солей: 1 – увеличение площади контакта; 2 – “пиннинг” капли (площадь контакта постоянна); 3 – “образование кристаллов соли или кристаллогидратов”.

7. Установлено, что при испарении воды из водных растворов солей LiBr, LiCl, CaCl₂ (при $t_n = 80$ °С) на поверхности капли образуется тонкая оболочка кристаллогидратов. В случае раствора NaCl образуются объёмные кристаллы соли (без кристаллогидратов). Зарегистрирована область кристаллизации перед контактной линией при покрытии поверхности капли кристаллической оболочкой.

8. Анализ зависимостей изменения объема капли во времени показал, что скорость испарения воды имеет линейный вид, водных растворов солей LiCl, CaCl₂, LiBr квазилинейный, трансформирующийся в нелинейный при испарении воды. Кривые десорбции водного раствора соли NaCl квазилинейны. Последнее обусловлено разными условиями, необходимыми для кристаллизации (низкой растворимостью NaCl и ранней кристаллизацией).

9. При аппаратной абразивной обработке поверхностей меди и стали использование абразивов со средним размером зерна до 100 мкм позволяет значительно изменить высоту неровностей и глубину полостей (характеризующиеся S_z), продольное и поперечное расстояние между неровностями и полостями по поверхности (характеризующиеся S_a или S_q), площадь поверхности (характеризующаяся S_{dq} или S_{dr}), плотность расположения неровностей и полостей по поверхности (характеризующиеся S_{pd}), а также радиус кривизны неровностей (характеризующийся S_{pc}). Использование абразивных материалов со средним размером более 100 мкм не приводит к значительным изменениям шероховатости, образованной материалом с зерном 100 мкм. Следовательно, для управления интенсивностью процессов, реализуемых на технологических поверхностях меди и стали, а также изменения их функциональных свойств, зависящих от шероховатости, необходимо использовать абразивные материалы со средним размером до 100 мкм при аппаратной абразивной обработке.

10. Установлено, что абразивная обработка значительно изменяет полярную составляющую свободной поверхностной энергии и не изменяет её дисперсную составляющую. Условно выделены два диапазона изменения полярной составляющей и свойств смачиваемости с ростом шероховатости, оценки которых выполнены по трехмерным характеристикам шероховатости. Установлено, что, если после абразивной обработки шероховатость поверхностей меди и стали, оцененная группой трехмерных характеристик шероховатости, не будет превышать значения $S_a \approx 0,14$ мкм, $S_z \approx 1,8$ мкм, $S_{dq} \approx 0,13$, $S_{pd} \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то поверхностная энергия будет увеличиваться, следовательно, свойства смачиваемости улучшатся. Улучшение смачиваемости связано с образованием текстуры в форме капилляров. Вследствие капиллярных сил жидкость лучше смачивает поверхность, на которой образованы такого вида капилляры. Если же текстура поверхностей меди и стали после абразивной обработки характеризуется величинами, значения которых превышают $S_a \approx 0,14$ мкм, $S_z \approx 1,8$ мкм, $S_{dq} \approx 0,13$, $S_{pd} \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 1/мкм², то поверхностная энергия уменьшается, а свойства

смачиваемости будут ухудшаться.

11. Абразивная обработка позволяет изменять свойства смачиваемости в достаточно широком диапазоне изменения контактных углов. Для поверхностей меди от 54° (гидрофильные свойства) до $108,2^\circ$ (гидрофобные свойства), для поверхностей стали от $71,6^\circ$ до $89,5^\circ$ (гидрофильные свойства).

12. Установлено, что после абразивной обработки поверхности алюминиевого сплава капля дистиллированной воды объемом 10 мкл будет находиться в метастабильном состоянии, которое характеризуется значительным гистерезисом и неравенством $\theta_{0R} \leq \theta_{0A} \leq \theta_S$. Также установлено, что на отклонение от равновесного состояния помимо текстуры влияет расход дозирования капли. От последнего зависит и гистерезис контактного угла. Из метастабильного состояния в стабильное каплю на шероховатой поверхности можно перевести вибрацией подложки. Стабильное состояние капли на поверхности важно для технологий, в которых реализуется капельное дозирование на поверхность, например, оросительные системы охлаждения, микрофлюидные устройства.

13. Полученные зависимости динамического контактного угла натекания от скорости перемещения контактной линии описаны аппроксимационными выражениями молекулярно-кинетической модели (линейной и классической). Получено хорошее согласование с классической зависимостью $\theta(u)$.

Список принятых сокращений и условных обозначений

Ал	алюминий
ГКУ	гистерезис контактного угла
ДКУ	динамические контактные углы
КЛ	контактная линия
ЛГМ	лесной горючий материал
М	медь
МКМ	молекулярно-кинетическая модель
ОВРК	метод Оунса, Вендта, Рабея и Кьельбле
ПАВ	поверхностно-активные вещества
СПЭ	свободная поверхностная энергия
Ст	сталь
a, b, c	эмпирические коэффициенты
C	концентрация, %
c_p	теплоемкость, Дж/(кг·К)
d	диаметр, м
E	энергия, Дж
g	ускорение свободного падения, м/с ²
h	высота, м
k^0	равновесная частота случайных молекулярных перемещений, Гц
k_B	постоянная Больцмана, м ² ·кг/(с ² ·К)
L	капиллярная длина, м
L_m	длина скольжения, м
m	масса, кг
p	давление, Па
q	удельная теплота испарения, Дж/кг
r	радиус, м
S	площадь поверхности капли, м ²
T	температура, К

t_k	температура поверхности капли, °С
t_n	температура поверхности, °С
u	скорости перемещения контактной линии, м/с
V	объем, м ³
W	скорость испарения, кг/(м ² ·с)
α	температуропроводность, м ² /с
β	коэффициент объемного расширения, °С ⁻¹
$\Delta\theta$	гистерезис, °
ε	степень черноты
γ	коэффициент поверхностного натяжения, Н/м
η	среднего размера зерна, мкм
ν	кинематическая вязкость, м ² /с
λ	среднее расстояние между соседними участками адсорбции молекул жидкости, м
λ_m	теплопроводность, Вт/(м·К)
μ	динамическая вязкость, Па·с
θ	контактный угол, °
ρ	плотность жидкости, кг/м ³
σ	постоянная Стефана-Больцмана Вт/(м ² ·К ⁴)
τ	время, с
ζ	коэффициент трения контактной линии, Па·с
B_f	число массообмена
Gr	число Грасгофа
Nu	число Нуссельта
Pr	число Прандтля
Ra	число Рэлея
Re	число Рейнольдса
Kr	средний наклон мотивов шероховатости
Ra	среднее арифметическое отклонение профиля, мкм

Rlo	длина растянутого профиля, мкм
Rmr	удельная опорная длина профиля, %
Rz	максимальная высота элемента (неровностей), мкм
Sa	среднее арифметическое высоты, мкм
Sal	длина автокорреляции
Sdq	приращение среднеквадратичного отклонения профиля
Sdr	уровень развернутой межфазной поверхности, %
Sku	эксцесс
Spc	среднее арифметическое кривизны высших точек, 1/мкм
Spd	плотность выступов, 1/мкм ²
Sq	среднее квадратичное высоты, мкм
Ssk	асимметрия
Str	отношение аспекта текстуры
Sz	максимальная высота, мкм

Список литературы

1. Ferreira L. N. Global fire season severity analysis and forecasting / L.N. Ferreira, D.A. Vega-Oliveros, L. Zhao, M.F. Cardoso, E.E.N. Macau // *Computers & Geosciences*. – 2020. – Vol. 134. – P. 104339.
2. Бондур В.Г. Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей в Европе по данным космического мониторинга / В.Г. Бондур, М.Н. Цидилина, В.Л. Кладов, К.А. Гордо // *Доклады Академии наук*. – 2019. – Т. 485. – № 6. – С. 745–749.
3. Kuznetsov G. V. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests / G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 121. – P. 398–409.
4. Волков Р.С. Тушение низового лесного пожара путем распыления воды по его кромке / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Инженерно-физический журнал*. – 2018. – Т. 91. – № 3. – С. 807–814.
5. Антонов Д.В. Влияние специализированных добавок и примесей в водном аэрозоле на условия подавления лесного пожара / Д.В. Антонов, Р.С. Волков, И.С. Войтков, А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов // *Инженерно-физический журнал*. – 2018. – Т. 91. – № 5. – С. 1318–1327.
6. Neogi P. Spreading kinetics of a drop on a smooth solid surface / P. Neogi, C. A. Miller // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1982. – Vol. 86, No. 2. – P. 525–538.
7. Rioboo R. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces / R. Rioboo, M. Marengo, C. Tropea // *Experiments in fluids*. – 2002. – Vol. 33, No. 1. – P. 112–124.
8. Šikalo Š. Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces / Š. Šikalo, M. Marengo, C. Tropea, E.N. Ganić // *Experimental thermal and fluid science*. – 2002. – Vol. 25, No. 7. – P. 503–510.

9. Boinovich L. B. Synergistic effect of superhydrophobicity and oxidized layers on corrosion resistance of aluminum alloy surface textured by nanosecond laser treatment / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, A.D. Modestov, A.G. Domantovsky, K.A. Emelyanenko // *ACS applied materials & interfaces*. – 2015. – Vol. 7, No. 34. – P. 19500–19508.
10. Fox J.C. Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing / J.C. Fox, S.P. Moylan, B.M. Lane // *Procedia Cirp*. – 2016. – Vol. 45. – P. 131–134.
11. Wu D. Y. Electrochemical surface-enhanced Raman spectroscopy of nanostructures / D.Y. Wu, J.F. Li, B. Ren, Z.Q. Tian // *Chemical Society Reviews*. – 2008. – Vol. 37, No. 5. – P. 1025–1041.
12. Yang H. Robust superhydrophobic surface with reinforced skeletons for corrosion protection / H. Yang, Y. Gao, G.S. Frankel, W. Qin, T. Li, Z. Huang, L. Wu // *Applied Surface Science*. – 2020. – Vol. 499. – P. 143916.
13. Zhang W. Probing the effect of abrasive grit size on rail grinding behaviors / W. Zhang, P. Zhang, J. Zhang, X. Fan, M. Zhu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 53. – P. 388–395
14. Kubiak K. J. Influence of roughness on contact interface in fretting under dry and boundary lubricated sliding regimes / K.J. Kubiak, T.G. Mathia // *Wear*. – 2009. – Vol. 267, No. 1–4. – P. 315–321.
15. Wang M. 3-Dimensional ink printing of friction-reducing surface textures from copper nanoparticles / M. Wang, X. Wang, J. Liu, J. Wei, Z. Shen, Y. Wang // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 364. – P. 57–62.
16. De Groot W. J. A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes / W.J. De Groot, A.S. Cantin, M.D. Flannigan, A.J. Soja, L.M. Gowman, A. Newbery // *Forest Ecology and Management*. – 2013. – Vol. 294. – P. 23–34.
17. Гришин, А. М. Математические модели лесных пожаров / А. М. Гришин. – Томск: Издательство Томского университета, 1981. – 277 с.
18. Duane A. Predictive modelling of fire occurrences from different fire spread patterns in Mediterranean landscapes / A. Duane, M. Piqué, M. Castellnou, L.

- Brotons // *International Journal of Wildland Fire*. – 2015. – Vol. 24, No. 3. – P. 407–418.
19. Conard S. G. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia / S.G. Conard, A.I. Sukhinin, B.J. Stocks, D.R. Cahoon, E.P. Davidenko, G.A. Ivanova // *Climatic Change*. – 2002. – Vol. 55, No. 1. – P. 197–211.
 20. Антонов Д.В. Экспериментальное исследование условий тушения лесных горючих материалов / Д.В. Антонов, Р.С. Волков, А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // *Инженерно-физический журнал*. – 2017. – Т. 90, № 3. – С. 543–553.
 21. Yao B. A review of water mist fire suppression systems / B. Yao, W.K. Chow // *Journal of Applied Fire Science* – 2000. – Vol. 10, No. 3. – P. 277–294.
 22. Zhdanova A.O. Suppression of forest fuel thermolysis by water mist / A.O. Zhdanova, R.S. Volkov, I.S. Voytkov, K.Y. Osipov, G. V Kuznetsov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 126. – P. 703–714.
 23. Korobeinichev O. P. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology / O.P.P. Korobeinichev, A.G.G. Shmakov, V.M.M. Shvartsberg, A.A.A. Chernov, S.A.A. Yakimov, K.P.P. Koutsenogii, V.I.I. Makarov // *Fire Safety Journal*. – 2012. – Vol. 51. – P. 102–109.
 24. Korobeinichev O. P. Fire suppression by aerosols of aqueous solutions of salts / O.P. Korobeinichev, A.G. Shmakov, A.A. Chernov, T.A. Bol'shova, V.M. Shvartsberg, K.P. Kutsenogii, V.I. Makarov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2010. – Vol. 46, No. 1. – P. 16–20.
 25. Plucinski M. P. A methodology for comparing the relative effectiveness of suppressant enhancers designed for the direct attack of wildfires / M.P.P. Plucinski, A.L.L. Sullivan, R.J.J. Hurley // *Fire Safety Journal*. – 2017. – Vol. 87. – P. 71–79.
 26. Grishin A. M. A deterministic-probabilistic system for predicting forest fire hazard / A.M. Grishin, A.I. Filkov // *Fire Safety Journal*. – 2011. – Vol. 46, No. 1–2. – P. 56–62.

27. Antonov D. V. Experimental study of the conditions for quenching forest combustible materials // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90, No. 3. – P. 511–520.
28. Strizhak P. A. Transformation of water ball falling in high-temperature gases / P. Strizhak, R. Volkov, M. Piskunov, M. Zabelin // Atomization Sprays. – 2017. – Vol. 27, No. 10. – P. 893–911.
29. Calkin D. E. Large airtanker use and outcomes in suppressing wildland fires in the United States / D.E. Calkin, C.S. Stonesifer, M.P. Thompson, C.W. McHugh // International Journal of Wildland Fire. – 2014. – Vol. 23, No. 2. – P. 259–271.
30. Thompson M.P. Airtankers and wildfire management in the US Forest Service: examining data availability and exploring usage and cost trends / M.P. Thompson, D.E. Calkin, J. Herynk, C.W. McHugh, K.C. Short // International Journal of Wildland Fire. – 2013. – Vol. 22, No. 2. – P. 223–233.
31. Lin H. Effect of surfactant concentration on the spreading properties of pesticide droplets on Eucalyptus leaves / H. Lin, H. Zhou, L. Xu, H. Zhu, H. Huang // Biosystems Engineering. – 2016. – Vol. 143. – P. 42–49.
32. Rakowska J. Selection of surfactants as main components of ecological wetting agent for effective extinguishing of forest and peat-bog fires / J. Rakowska, K. Prochaska, B.B. Twardochleb, M. Rojewska, B.B. Porycka, A. Jaszkievicz // Chemical Papers. – 2014. – Vol. 68, No. 6. – P. 823–833.
33. Гуцев Н.Д. Исследование зависимости времени смачивания лесных горючих материалов от величины поверхностного натяжения растворов смачивателей и пенообразователей / Н.Д. Гуцев, Н.В. Михайлова, Н.А. Грабежева // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2015. – № 3. – С. 31–43.
34. Appah S. Charged monosized droplet behaviour and wetting ability on hydrophobic leaf surfaces depending on surfactant-pesticide concentrate formulation / S. Appah, H. Zhou, P. Wang, M. Ou, W. Jia // Journal of Electrostatics. – 2019. – Vol. 100. – P. 103356.

35. Wang K. Application of the addition of ionic liquids using a complex wetting agent to enhance dust control efficiency during coal mining / K. Wang, C. Ding, S. Jiang, W. Zhengyan, H. Shao, W. Zhang // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol. 122. – P. 13–22.
36. Li S. Wetting behavior of superhydrophobic surface in the liquid influenced by the existing of air layer / S. Li, M. Jin, C. Yu, M. Liao // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2013. – Vol. 430. – P. 46–50.
37. Bertola V. Dynamic contact angle of dilute polymer solution drops impacting on a hydrophobic surface / V. Bertola, M. Wang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2015. – Vol. 481. – P. 600–608.
38. Paria S. Surface tension, adsorption, and wetting behaviors of natural surfactants on a PTFE surface / S. Paria, N.R. Biswal, R.G. Chaudhuri // *AIChE journal*. – 2015. – Vol. 61, No. 2. – P. 655–663.
39. Lee K. M. Fabrication of a superhydrophobic surface using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer with poly lactic acid (PLA) filament and dip coating with silica nanoparticles / K.M. Lee, H. Park, J. Kim, D.M. Chun // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 467. – P. 979–991.
40. Pan S. Investigating and biomimicking the surface wetting behaviors of ginkgo leaf / S. Pan, R. Guo, W. Xu // *Soft Matter*. – 2014. – Vol. 10, No. 44. – P. 8800–8803.
41. Brahmia F. Z. Comparative analysis of wettability with fire retardants of Poplar (*Populus cv. euramericana I214*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) / F.Z. Brahmia, T. Alpár, P.G. Horváth, C. Csiha // *Surfaces and Interfaces*. – 2020. – Vol. 18. – P. 100405.
42. Papp E. A. Contact angle as function of surface roughness of different wood species / E.A. Papp, C. Csiha // *Surfaces and Interfaces*. – 2017. – Vol. 8. – P. 54–59.
43. Mantanis G. I. Wetting of wood / G.I. Mantanis, R.A. Young // *Wood science and Technology*. – 1997. – Vol. 31, No. 5. – P. 339–353.

44. Wang W. Correlation between dynamic wetting behavior and chemical components of thermally modified wood / W. Wang, Y. Zhu, J. Cao, W. Sun // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 324. – P. 332–338.
45. Rakowska J. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting / J. Rakowska, R. Szczygieł, M. Kwiatkowski, B. Porycka, K. Radwan, K. Prochaska // *Fire technology*. – 2017. – Vol. 53, No. 3. – P. 1379–1398.
46. Volkov R. S. Movement of water drops in a forest fuel layer in the course of its thermal decomposition / R.S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Thermal Science*. – 2018. – Vol. 22, No. 1 Part A. – P. 301–312.
47. Коробейничев О.П. Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей / О.П. Коробейничев, А.Г. Шмаков, А.А. Чернов, Т.А. Большова, В.М. Шварцберг, К.П. Куценогий, В.И. Макаров // *Физика горения и взрыва*. – 2010. – Vol. 46. № 1. – С. 20–25.
48. Mykhalichko B. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions / B. Mykhalichko, H. Lavrenyuk, O. Mykhalichko // *Fire Safety Journal*. – 2019. – Vol. 105. – P. 188–195.
49. Бараш Л. Ю. Испарение и динамика лежащей на подложке капли. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф.-мат. наук. Москва, 2009.
50. Picknett R. G. The evaporation of sessile or pendant drops in still air / R.G. Picknett, R. Bexon // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1977. – Vol. 61, No. 2. – P. 336–350.
51. Wayner Jr P. C. Fluid flow in the interline region of an evaporating non-zero contact angle meniscus / P.C. Wayner // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1973. – Vol. 16, No. 9. – P. 1777–1783.
52. Gatapova E. Y. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability / E.Y. Gatapova, A.A. Semenov, D. V. Zaitsev, O.A. Kabov // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2014. – Vol. 441. – P. 776–785.

53. Rowan S. M. Evaporation of microdroplets and the wetting of solid surfaces / S.M. Rowan, M.I. Newton, G. McHale // *The Journal of physical chemistry*. – 1995. – Vol. 99, No. 35. – P. 13268–13271.
54. Birdi K. S. A study of the evaporation rates of small water drops placed on a solid surface / K.S. Birdi, D.T. Vu, A. Winter // *The Journal of physical chemistry*. – 1989. – Vol. 93, No. 9. – P. 3702–3703.
55. Panwar A. K., Barthwal S. K., Ray S. Effect of evaporation on the contact angle of a sessile drop on solid substrates / A.K. Panwar, S.K. Barthwal, S. Ray // *Journal of adhesion science and technology*. – 2003. – Vol. 17, No. 10. – P. 1321–1329.
56. Erbil H. Y. Drop evaporation on solid surfaces: constant contact angle mode / H.Y. Erbil, G. McHale, M.I. Newton // *Langmuir*. – 2002. – Vol. 18, No. 7. – P. 2636–2641.
57. McHale G. Evaporation and the wetting of a low-energy solid surface / G. McHale, S.M. Rowan, M.I. Newton, M.K. Banerjee // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 1998. – Vol. 102, No. 11. – P. 1964–1967.
58. Mangel Jr R. F. The evaporation of water drops from a “Teflon” surface / R.F. Mangel, E. Baer // *Chemical Engineering Science*. – 1962. – Vol. 17, No. 9. – P. 705–706.
59. Yu H. Z. Evaporation of Water Microdroplets on Self-Assembled Monolayers: From Pinning to Shrinking / H.-Z. Yu, D.M. Soolaman, A.W. Rowe, J.T. Banks // *ChemPhysChem*. – 2004. – Vol. 5, No. 7. – P. 1035–1038.
60. Anantharaju N. Evaporating drops on patterned surfaces: Transition from pinned to moving triple line / N. Anantharaju, M. Panchagnula, S. Neti // *Journal of colloid and interface science*. – 2009. – Vol. 337, No. 1. – P. 176–182.
61. Bourges-Monnier C. Influence of evaporation on contact angle / C. Bourges-Monnier, M.E.R. Shanahan // *Langmuir*. – 1995. – Vol. 11, No. 7. – P. 2820–2829.
62. Semenov S. Simultaneous spreading and evaporation: recent developments / S. Semenov, A. Trybala, R.G. Rubio, N. Kovalchuk, V. Starov, M.G. Velarde // *Advances in colloid and interface science*. – 2014. – Vol. 206. – P. 382–398.

63. Ranz W.E. Evaporation from drops / W.E. Ranz, W.R. Marshall // *Chemical Engineering*. – 1952. – Vol. 48. – P. 141–146.
64. Кузнецов Г. В. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия / Г.В. Кузнецов, Д.В. Феоктистов, Е.Г. Орлова // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 17–22.
65. Charlesworth D. H. Evaporation from drops containing dissolved solids / D.H. Charlesworth, W.R. Marshall // *AIChE Journal*. – 1960. – Vol. 6, No. 1. – P. 9–23.
66. Elzaabalawy A. Multifunctional silica–silicone nanocomposite with regenerative superhydrophobic capabilities / A. Elzaabalawy, P. Verberne, S.A. Meguid // *ACS applied materials & interfaces*. – 2019. – Vol. 11, No. 45. – P. 42827–42837.
67. Kumar A. Droplets on microdecorated surfaces: evolution of the polygonal contact line / A. Kumar, R. Raj // *Langmuir*. – 2017. – Vol. 33, No. 19. – P. 4854–4862.
68. Cheng W. L. Spray cooling and flash evaporation cooling: the current development and application / W.L. Cheng, W.W. Zhang, H. Chen, L. Hu // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 55. – P. 614–628.
69. Wang J. X. Investigation on a gas-atomized spray cooling upon flat and micro-structured surfaces / J.X. Wang, Y.Z. Li, M.L. Zhong, H.S. Zhang // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2021. – Vol. 161. – P. 106751.
70. Zhao H. Experimental study on vertical rigid and flexible polyurethane fire suppression using water spray / H. Zhao, Y. Li, Y. Qi, X. Dong, Y. Zhang, Q. Zhang // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2019. – Article number. 0892705719879185.
71. Mesli B. Extinction limits of opposed jet turbulent premixed methane air flames with sprays of water and NaCl-water solution / R. Zheng, K.N.C. Bray, B. Rogg // *Combustion science and technology*. – 2000. – Vol. 153, No. 1. – P. 193–211.
72. Bonn D. Wetting and spreading / D. Bonn, J. Eggers, J. Indekeu, J. Meunier // *Reviews of modern physics*. – 2009. – Vol. 81, No. 2. – P. 739–805.
73. Nakae H. Effects of surface roughness on wettability / H. Nakae, R. Inui, Y. Hirata, H. Saito // *Acta materialia*. – 1998. – Vol. 46, No. 7. – P. 2313–2318.

74. Ma L. Preparation of a superhydrophobic TiN/PTFE composite film toward self-cleaning and corrosion protection applications / L. Ma, J. Wang, Z. Zhang, Y. Kang, M. Sun, L. Ma // *Journal of Materials Science*. – 2021. – Vol. 56, No. 2. – P. 1413–1425.
75. Young T. III. An essay on the cohesion of fluids / Young T. // *Philosophical transactions of the royal society of London*. – 1805, No. 95. – P. 65–87.
76. Dussan E. B. On the spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines / E.B. Dussan // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1979. – Vol. 11, No. 1. – P. 371–400.
77. Kim J. H. Dynamic contact angle measurements on superhydrophobic surfaces / J.H. Kim, P. Kavehpour, J.P. Rothstein // *Physics of Fluids*. – 2015. – Vol. 27, No. 3. – P. 032107.
78. Blake T. D., Haynes J. M. Kinetics of liquidliquid displacement / T.D. Blake, J.M. Haynes // *Journal of colloid and interface science*. – 1969. – Vol. 30, No. 3. – P. 421–423.
79. Ruckenstein E. Slip velocity during wetting of solids / E. Ruckenstein, C.S. Dunn // *Wetting Theory*. – 2018. – P. 40–44.
80. Cox R. G. The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1. Viscous flow / R.G. Cox // *Journal of fluid mechanics*. – 1986. – Vol. 168. – P. 169–194.
81. Voinov O. V. Hydrodynamics of wetting / O. V. Voinov // *Fluid dynamics*. – 1976. – Vol. 11, No. 5. – P. 714–721.
82. De Souza E. J. Effect of contact angle hysteresis on the measurement of capillary forces / E.J. De Souza, L. Gao, T.J. McCarthy, E. Arzt, A.J. Crosby // *Langmuir*. – 2008. – Vol. 24, No. 4. – P. 1391–1396.
83. Ranabothu S. R. Dynamic wetting: hydrodynamic or molecular-kinetic? / S.R. Ranabothu, C. Karnezis, L.L. Dai // *Journal of colloid and interface science*. – 2005. – Vol. 288, No. 1. – P. 213–221.
84. Kistler S. F. Hydrodynamics of wetting / S.F. Kistler // *Wettability*. – 1993. – Vol. 6. – P. 311–430.

85. Hayes R. A. Forced liquid movement on low energy surfaces / R.A. Hayes, J. Ralston // *Journal of colloid and interface science.* – 1993. – Vol. 159, No. 2. – P. 429–438.
86. Chen S. Y. Contact angle and adhesion dynamics and hysteresis on molecularly smooth chemically homogeneous surfaces / S.Y. Chen, Y. Kaufman, A.M. Schrader, D. Seo, D.W. Lee, S.H. Page, P.H. Koenig, S. Isaacs, Y. Gizaw, J.N. Israelachvili // *Langmuir.* – 2017. – Vol. 33, No. 38. – P. 10041–10050.
87. Long J. Superhydrophobic surfaces fabricated by femtosecond laser with tunable water adhesion: from lotus leaf to rose petal / J. Long, P. Fan, D. Gong, D. Jiang, H. Zhang, L. Li, M. Zhong // *ACS applied materials & interfaces.* – 2015. – Vol. 7, No. 18. – P. 9858–9865.
88. Dubov A. L. Contact angle hysteresis on superhydrophobic stripes / A.L. Dubov, A. Mourran, M. Möller, O.I. Vinogradova // *The Journal of chemical physics.* – 2014. – Vol. 141, No. 7. – P. 074710.
89. Misyura S. Y. Effect of various key factors on the law of droplet evaporation on the heated horizontal wall / S.Y. Misyura // *Chemical Engineering Research and Design.* – 2018. – Vol. 129. – P. 306–313.
90. Kubiak K. J. Dynamics of contact line motion during the wetting of rough surfaces and correlation with topographical surface parameters / K.J. Kubiak, M.C.T. Wilson, T.G. Mathia, S. Carras // *Scanning.* – 2011. – Vol. 33, No. 5. – P. 370–377.
91. Kubiak K. J. Wettability versus roughness of engineering surfaces / K.J. Kubiak, M.C.T. Wilson, T.G. Mathia, P. Carval // *Wear.* – 2011. – Vol. 271, No. 3–4. – P. 523–528.
92. Hejazi V. Beyond Wenzel and Cassie–Baxter: second-order effects on the wetting of rough surfaces / V. Hejazi, A.D. Moghadam, P. Rohatgi, M. Nosonovsky // *Langmuir.* – 2014. – Vol. 30, No. 31. – P. 9423–9429.
93. Gu H. Investigation on contact angle measurement methods and wettability transition of porous surfaces / H. Gu, C. Wang, S. Gong, Y. Mei, H. Li, W. Ma // *Surface and Coatings Technology.* – 2016. – Vol. 292. – P. 72–77.

94. Encinas N. Control of wettability of polymers by surface roughness modification / N. Encinas, M. Pantoja, J. Abenojar, M.A. Martínez // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2010. – Vol. 24, No. 11–12. – P. 1869–1883.
95. Fu B. Q. Calculation of the surface energy of bcc-metals with the empirical electron theory / B.Q. Fu, W. Liu, Z.L. Li // *Applied surface science*. – 2009. – Vol. 255, No. 20. – P. 8511–8519.
96. Wenzel R. N. Surface roughness and contact angle / R.N. Wenzel // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1949. – Vol. 53, No. 9. – P. 1466–1467.
97. Cassie A. B. D. Large contact angles of plant and animal surfaces / A.B.D. Cassie, S. Baxter // *Nature*. – 1945. – Vol. 155, No. 3923. – P. 21–22.
98. Hiremath S. S. Effect of surface roughness and surface topography on wettability of machined biomaterials using flexible viscoelastic polymer abrasive media / S.S. Kumar, S.S. Hiremath // *Surface Topography: Metrology and Properties*. – 2019. – Vol. 7, No. 1. – P. 015004.
99. Дедкова А. А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщины слоев / А.А. Дедкова, В.Ю. Киреев, М.А. Махиборода // *Наноструктуры. Математическая физика и моделирование*. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 23–40.
100. Kuznetsov G. V. Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, I.Y. Zykov, A.G. Islamova // *Journal of colloid and interface science*. – 2019. – Vol. 553. – P. 557–566.
101. Батищева К.А. Испарение капель воды в изолированной от внешней среды камере / К.А. Батищева, А.Е. Нурпейис // *Вестник Тюменского Государственного Университета. Физико-Математическое Моделирование. Нефть, Газ, Энергетика*. – 2020. – Т. 6, № 3. – С. 8–22.
102. Kubiak K. J. Methodology for metrology of wettability versus roughness of engineering surfaces / K.J. Kubiak, T.G. Mathia, M.C.T. Wilson // *Proceedings of Fourteenth International Congress of Metrology. Paris, France*. – 2009.

103. Лич, Р. Инженерные основы измерений нанометрической точности: Учебное издание/ Р. Лич – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 400 с.
104. Kuznetsov G. V. Droplet Spreading and Wettability of Abrasive Processed Aluminum Alloy Surfaces / G.V. V. Kuznetsov, E.G.G. Orlova, D.V. V. Feoktistov, A.G.G. Islamova, A.V. V. Zhuikov // Metals and Materials International. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 46–55.
105. Zahiri B. Understanding the wettability of rough surfaces using simultaneous optical and electrochemical analysis of sessile droplets / B. Zahiri, P.K. Sow, C.H. Kung, W. Mérida // Journal of colloid and interface science. – 2017. – Vol. 501. – C. 34–44.
106. Giljean S. New insights on contact angle/roughness dependence on high surface energy materials/ S. Giljean, M. Bigerelle, K. Anselme, H. Haidara // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257, No. 22. – P. 9631–9638.
107. Bortolotti M. Numerical models for the evaluation of the contact angle from axisymmetric drop profiles: a statistical comparison / M. Bortolotti, M. Brugnara, C. Della Volpe, S. Siboni // Journal of colloid and interface science. – 2009. – Vol. 336, No. 1. – P. 285–297.
108. Li L. A contact angle measurement method for the droplets in EWOD-based chips / L. Li, W. Kang, D. Ye // 2007 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. – IEEE, 2007. – P. 1071–1075.
109. Rotenberg Y. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces / Y. Rotenberg, L. Boruvka, A.W. Neumann // Journal of colloid and interface science. – 1983. – Vol. 93, No. 1. – P. 169–183.
110. Spelt J. K. Sessile-drop contact angle measurements using axisymmetric drop shape analysis / J.K. Spelt, Y. Rotenberg, D.R. Absolom, A.W. Neumann // Colloids and surfaces. – 1987. – Vol. 24, No. 2–3. – P. 127–137.
111. Cheng P. Automation of axisymmetric drop shape analysis for measurements of interfacial tensions and contact angles / P. Cheng, D. Li, L. Boruvka, Y.

- Rotenberg, A.W. Neumann // *Colloids and Surfaces*. – 1990. – Vol. 43, No. 2. – P. 151–167.
112. Kuznetsov G. V. Evaporation modes of LiBr, CaCl₂, LiCl, NaCl aqueous salt solution droplets on aluminum surface / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova, S.Y. Misyura, V.S. Morozov, A.G. Islamova // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 126. – P. 161–168.
 113. Solomatin Y. Secondary atomization of firefighting liquid droplets by their collisions / Y. Solomatin, N. Shlegel, P. Strizhak // *Atomization and Sprays*. – 2019. – Vol. 29, No. 5. – P. 429–454.
 114. Kuznetsov G. V. Influence of forest fuel structure on thermophysical characteristics / G.V. Kuznetsov, S.S. Kropotova, A.G. Islamova, D.S. Romanov // *Powder Technology*. – 2020. – Vol. 366. – P. 832–839.
 115. Kuznetsov G. V. Rates of high-temperature evaporation of promising fire-extinguishing liquid droplets / G. V. Kuznetsov, S.S. Kralinova, I.S. Voytkov, A.G. Islamova // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9, No. 23. – P. 5190.
 116. Zambrano A. R. C. Wetting Properties and Foliar Water Uptake of Tillandsia L / A.R.C. Zambrano, V.C. Linis, M.R.J. Nepacina, M.L.T. Silvestre, J.R.F. Foronda, J.I.B. Janairo // *Biotribology*. – 2019. – Vol. 19. – Article number 100103.
 117. Kuznetsov G. V. Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating / G. V. Kuznetsov, M. V. Piskunov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 131. – P. 340–355.
 118. Sazhin S. Droplets and sprays / S. Sazhin. – London : Springer, 2014. – Vol. 345.
 119. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик.– 2-е изд., доп. и перераб. – Москва: Наука, 1972. – 721 с.
 120. Renksizbulut M., Numerical study of droplet evaporation in a high-temperature stream / M. Renksizbulut, M.C. Yuen // *Journal of Heat Transfer*. – 1983. – Vol. 105. – P. 389–397.

121. Renksizbulut M., Yuen M. C. Experimental study of droplet evaporation in a high-temperature air stream / M. Renksizbulut, M.C. Yuen // *Journal of Heat Transfer*. – 1983. – Vol. 105. – P. 384–388.
122. Ranz W. E., Marshall W. R. Evaporation from droplets // *Chemical Engineering Progress*. – 1952. – Vol. 48, No. 3. – P. 141–146.
123. Bays Jr G. S. Heat transfer coefficients in falling film heater streamline flow / G.S. Bays, W.H. McAdams // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1937. – Vol. 29, No. 11. – P. 1240–1246.
124. Drew T. B., Hogan J. J., McAdams W. H. Heat Transfer in Stream-Line Flow / T.B. Drew, J.J. Hogan, W.H. McAdams // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1931. – Vol. 23, No. 8. – P. 936–945.
125. Akin G. A., McAdams W. H. Boling Heat Transfer in Natural Convection Evaporators / G.A. Akin, W.H. McAdams // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1939. – Vol. 31, No. 4. – P. 487–491.
126. Bøhm B. Experimental determination of heat losses from buried district heating pipes in normal operation / B. Bøhm // *Heat transfer engineering*. – 2001. – Vol. 22, No. 3. – P. 41–51.
127. Gedik E. Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon at different operating conditions / E. Gedik // *Energy and Buildings*. – 2016. – Vol. 127. – P. 1096–1107.
128. Phuoc T. X. Heat losses associated with the upward flow of air, water, CO₂ in geothermal production wells / T.X. Phuoc, M. Massoudi, P. Wang, M.L. McKoy // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 132. – P. 249–258.
129. Wu S.Y. Numerical investigation on combined natural convection and radiation heat losses in one side open cylindrical cavity with constant heat flux / S.-Y. Wu, F.-H. Guo, L. Xiao // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 71. – P. 573–584.
130. Modestov A. D. Application of laser micro-and nanotexturing for the fabrication of superhydrophobic corrosion-resistant coatings on aluminum / A.D. Modestov,

- K.A. Emelyanenko, A.M. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, L.B. Boinovich // Russian Chemical Bulletin. – 2016. – Vol. 65, No. 11. – P. 2607–2611.
131. Sharma P. K. Analysis of different approaches for evaluation of surface energy of microbial cells by contact angle goniometry / P.K. Sharma, K. Hanumantha Rao // Advances in Colloid and Interface Science. – 2002. – Vol. 98, No. 3. – P. 341–463.
 132. Wang D. Ionomer thermodynamic interrelationships associated with wettability, surface energy, swelling, and water transport / D. Wang, C.J. Cornelius // European Polymer Journal. – 2016. – Vol. 85. – P. 126–138.
 133. Wang D. Ionomer thermodynamic interrelationships associated with wettability, surface energy, swelling, and water transport / D. Wang, C.J. Cornelius // European Polymer Journal. – 2016. – Vol. 85. – P. 126–138.
 134. Jain A. Surface properties and bacterial behavior of micro conical dimple textured Ti6Al4V surface through micro-milling / A. Jain, N. Kumari, S. Jagadevan, V. Bajpai // Surfaces and Interfaces. – 2020. – Vol. 21. – P. 100714.
 135. Matavž A. Tailoring ink–substrate interactions via thin polymeric layers for high-resolution printing / A. Matavž, V. Bobnar, B. Malič // Langmuir. – 2017. – Vol. 33, No. 43. – P. 11893–11900.
 136. Neumann A. W. An equation-of-state approach to determine surface tensions of low-energy solids from contact angles / A.W. Neumann, R.J. Good, C.J. Hope, M. Sejpal // Journal of colloid and interface science. – 1974. – Vol. 49, No. 2. – P. 291–304.
 137. Owens D. K. Estimation of the surface free energy of polymers / D.K. Owens, R.C. Wendt // Journal of applied polymer science. – 1969. – Vol. 13, No. 8. – P. 1741–1747.
 138. Kuznetsov G. V. Regimes of water droplet evaporation on copper substrates / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, E.G. Orlova, K.A. Batishcheva // Colloid Journal. – 2016. – Vol. 78, No. 3. – P. 335–339.
 139. Bateni A. A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles / A. Bateni, S.S. Susnar, A. Amirfazli, A.W.W. Neumann // Colloids and Surfaces

- A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2003. – Vol. 219, No. 1–3. – P. 215–231.
140. Бараненко А. В. Водные растворы абсорбционных термотрансформаторов / А.В. Бараненко, С.В. Караван, О.А. Пинчук, Д.В. Караван. М.: Перо. – 2014. – 414 с.
 141. Nakoryakov V.E. Nonisothermal desorption of droplets of complex compositions / V.E. Nakoryakov, S.Y. Misyura, S.L. Elistratov // Thermal Science. – 2012. – Vol. 16, No. 4. – P. 997–1004.
 142. Deegan R. D. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops / R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, T.A. Witten // Nature. – 1997. – Vol. 389, No. 6653. – P. 827–829.
 143. Orlova E. G. Spreading of a distilled water droplet over polished and laser-treated aluminum surfaces / E.G. Orlova, D.V. Feoktistov, G.V. Kuznetsov, K.O. Ponomarev // European Journal of Mechanics-B/Fluids. – 2018. – Vol. 68. – P. 118–127.
 144. Blázquez C. Non-aqueous and crude oil foams / C. Blazquez, E. Emond, S. Schneider, C. Dalmazzone, V. Bergeron, V. Bergeron Non-, C. Blázquez // Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles. – 2014. – Vol. 69, No. 3. – P. 467–479.
 145. Zhu F. Wetting behavior and maximum retention of aqueous surfactant solutions on tea leaves / F. Zhu, C. Cao, L. Cao, F. Li, F. Du, Q. Huang // Molecules. – 2019. – Vol. 24, No. 11. – P. 2094.
 146. Srivastava T. Analytical model for predicting maximum spread of droplet impinging on solid surfaces / T. Srivastava, S. Kondaraju // Physics of Fluids. – 2020. – Vol. 32, No. 9. – P. 092103.
 147. Yonemoto Y., Kunugi T. Wettability model for various-sized droplets on solid surfaces / Y. Yonemoto, T. Kunugi // Physics of Fluids. – 2014. – Vol. 26, No. 8. – Article number 082110.

148. Yonemoto Y. Analytical consideration of liquid droplet impingement on solid surfaces / Y. Yonemoto, T. Kunugi // *Scientific reports*. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–11.
149. Atroshenko Y. K. Protective Lines for Suppressing the Combustion Front of Forest Fuels: Experimental Research / Y.K. Atroshenko, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, R.S. Volkov // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol. 131. – P. 73–88.
150. Tang Y. Development of a novel bentonite–acrylamide superabsorbent hydrogel for extinguishing gangue fire hazard / Y. Tang, H. Wang // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 323. – P. 486–494.
151. Strizhak P. A. Heating and evaporation of suspended water droplets: Experimental studies and modelling / P.A. Strizhak, R.S. Volkov, G. Castanet, F. Lemoine, O. Rybdylova, S.S. Sazhin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 127. – P. 92–106.
152. Volkov R. S. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using Planar Laser-Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – Vol. 97. – P. 392–407.
153. Lautenberger C. A model for the oxidative pyrolysis of wood / C. Lautenberger, C. Fernandez-Pello, M. Tanaka, K. Yoshimura, K.S. Pervunin, K.P. Koutsenogii, V.I. Makarov, J.R. Raposo // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156, No. 8. – P. 1503–1513.
154. Giménez A. Long-term forest fire retardants: a review of quality, effectiveness, application and environmental considerations / A. Giménez, E. Pastor, L. Zárata, E. Planas, J. Arnaldos // *International Journal of Wildland Fire*. – 2004. – Vol. 13, No. 1. – P. 1–15.
155. Grant G. Fire suppression by water sprays / G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale // *Progress in energy and combustion science*. – 2000. – Vol. 26, No. 2. – P. 79–130.
156. Meng N. Full-scale experimental study on fire suppression performance of a designed water mist system for rescue station of long railway tunnel / N. Meng, L.

- Hu, S. Liu, L. Wu, L. Chen, B. Liu // *Journal of fire sciences*. – 2012. – Vol. 30, No. 2. – P. 138–157.
157. Toosi S. F. Microfabrication of polymeric surfaces with extreme wettability using hot embossing / S.F. Toosi, S. Moradi, M. Ebrahimi, S.G. Hatzikiriakos // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 378. – P. 426–434.
 158. Zhou J. Electroplating of non-fluorinated superhydrophobic Ni/WC/WS₂ composite coatings with high abrasive resistance / J. Zhou, G. Zhao, J. Li, J. Chen, S. Zhang, J. Wang, F.C. Walsh, S. Wang, Y. Xue // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 487. – P. 1329–1340.
 159. Park B. A facile fabrication method for corrosion-resistant micro/nanostructures on stainless steel surfaces with tunable wettability / B. Park, W. Hwang // *Scripta Materialia*. – 2016. – Vol. 113. – P. 118–121.
 160. Rajab F. H. Production of hybrid macro/micro/nano surface structures on Ti6Al4V surfaces by picosecond laser surface texturing and their antifouling characteristics / F.H. Rajab, C.M. Liauw, P.S. Benson, L. Li, K.A. Whitehead // *Colloids and surfaces B: biointerfaces*. – 2017. – Vol. 160. – P. 688–696.
 161. Исламова А.Г. Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали / А.Г. Исламова, Д.В. Феоктистов, Е.Г. Орлова // *Вестник Тюменского Государственного Университета. Физико-Математическое Моделирование. Нефть, Газ, Энергетика*. – 2021. – Т. 7. – С. 60–78.
 162. Leach, R. Characterisation of areal surface texture / R. Leach. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. – 353 с.
 163. Wenzel R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water / R.N. Wenzel // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1936. – Vol. 28, No. 8. – P. 988–994.
 164. Kuznetsov G. V. Dynamic characteristics of water spreading over laser-textured aluminum alloy surfaces / G. V. Kuznetsov, D. V. Feoktistov, E.G. Orlova, I.Y. Zykov, E. Bartuli, M. Raudenský, A. V. Zhuikov // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2020. – Vol. 603. – P. 125253.

165. Kuznetsov G. V. New approach to the heat transfer modeling in the coolant layer on the lower cover of a thermosiphon / G. V. Kuznetsov, K.O. Ponomarev, D. V. Feoktistov, E.G. Orlova, H. Ouerdane, Y. V. Lyulin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 163. – P. 120555.
166. Kim J. Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on a superhydrophilic aluminum surface / J. Kim, S. Jun, J. Lee, J. Godinez, S.M. You // *Journal of Heat Transfer*. – 2017. – Vol. 139, No. 10. – P. 120555.
167. Kuznetsov G. V. Heat transfer in a two-phase closed thermosyphon working in Polar Regions / G. V. Kuznetsov, K.O. Ponomarev, D. V. Feoktistov, E.G. Orlova, Y. V. Lyulin, H. Ouerdane // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2021. – Vol. 22. – P. 100846.
168. Gathimba N. Surface roughness characteristics of corroded steel pipe piles exposed to marine environment / N. Gathimba, Y. Kitane, T. Yoshida, Y. Itoh // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 203. – P. 267–281.
169. Liang G. An investigation of the influence of initial roughness on the friction and wear behavior of ground surfaces / G. Liang, S. Schmauder, M. Lyu, Y. Schneider, C. Zhang, Y. Han // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, No. 2. – P. 237.
170. Toloei A. The relationship between surface roughness and corrosion / A. Toloei, V. Stoilov, D. Northwood // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – American Society of Mechanical Engineers, 2013. – Vol. 56192. – Article number V02BT02A054.
171. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – Москва: Машиностроение, 1974. – 319 с.
172. Boinovich L. B. Comment on “Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications” by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard (*Appl. Surf. Sci.* 357 (2015) 248–254) / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko, K.A. Emelyanenko, A.G. Domantovsky, A.A. Shiryayev // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 379. – P. 111–113.

173. Pilot R. A review on surface-enhanced Raman scattering / R. Pilot, R. Signorini, C. Durante, L. Orian, M. Bhamidipati, L. Fabris // *Biosensors*. – 2019. – Vol. 9, No. 2. – P. 57.
174. Fowkes F. M. Determination of interfacial tensions, contact angles, and dispersion forces in surfaces by assuming additivity of intermolecular interactions in surfaces / F.M. Fowkes // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1962. – Vol. 66, No. 2. – C. 382–382.
175. Foadi F. et al. Roughness dependent wettability of sputtered copper thin films: The effect of the local surface slope / F. Foadi, G.H. Ten Brink, M.R. Mohammadizadeh, G. Palasantzas // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 125, No. 24. – P. 244307.
176. Boinovich L. B. Hydrophobic materials and coatings: principles of design, properties and applications / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko // *Russian Chemical Reviews*. – 2008. – Vol. 77, No. 7. – P. 583.
177. De Gennes P. G. Wetting: statics and dynamics // *Reviews of modern physics*. – 1985. – Vol. 57, No. 3. – P. 827–863.
178. Дерягин Б. В. О зависимости краевого угла от микрорельефа или шероховатости смачиваемой поверхности / Б.В. Дерягин // *Доклады АН СССР*. – 1946. – Т. 51, № 5. – С. 357–360.
179. Kanungo M. Effect of roughness geometry on wetting and dewetting of rough PDMS surfaces / M. Kanungo, S. Mettu, K.Y. Law, S. Daniel // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30, No. 25. – P. 7358–7368.
180. Johnson R. E., Dettre R. H. *Wetting of low-energy surfaces*. – Marcel Dekker, Inc.: New York, 1993. – Vol. 49. – P. 1–73.
181. Karim A. M. Experimental study of dynamic contact angles on rough hydrophobic surfaces / A.M. Karim, J.P. Rothstein, H.P. Kavehpour // *Journal of colloid and interface science*. – 2018. – Vol. 513. – P. 658–665.
182. Berg, J.C. *A Review of: "Wettability"* / J.C. Berg. New York: Marcel Dekker, 1993. – 531 с.

183. Fetzner R. Dynamic dewetting regimes explored / R. Fetzner, J. Ralston // The Journal of Physical Chemistry C. – 2009. – Vol. 113, No. 20. – P. 8888–8894.
184. Hayes R. A. The molecular-kinetic theory of wetting / R.A. Hayes, J. Ralston // Langmuir. – 1994. – Vol. 10, No. 1. – P. 340–342.
185. Hoffman R. L. A study of the advancing interface. I. Interface shape in liquid—gas systems / R.L. Hoffman // Journal of colloid and interface science. – 1975. – Vol. 50. – № 2. – P. 228–241.