

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор **Кузнецов Гений Владимирович**

кандидат технических наук,
Феоктистов Дмитрий Владимирович

Официальные оппоненты:

Демин Виталий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», кафедра теоретической физики, заведующий кафедрой

Марчук Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», механико-математический факультет, декан

Защита состоится «8» октября 2021 года в 10 час. 00 мин. на заседании объединенного междисциплинарного диссертационного совета МДС.ТПУ.03, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова 7 (уч. корпус № 8, аудитория 217).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>.

Автореферат разослан «4» августа 2021 года.

Ученый секретарь
междисциплинарного
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Глушков
Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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. 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. Но применение последних осуществляется по результатам их экспериментальной обработки, 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. 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, литография, травление, абразивная обработка, аддитивные технологии) 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».

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, 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 вода и эмульсия 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, $Sdq \approx 0,13$, $Spd \approx 11,6 \cdot 10^{-3}$ 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 ухудшатся.

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.

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 конференции 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 тепломассообмена 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ степени ее разработанности, сформулирована цель, задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа современного состояния проблемы тушения лесных пожаров. Сделан вывод, что для полного описания механизмов подавления процессов горения и термического разложения ЛГМ необходимы экспериментальные данные о процессах взаимодействия капель огнетушащих составов с элементами структуры ЛГМ (хвоинками, листьями, веточками). Из анализа результатов известных исследований установлено, что характеристики процессов смачивания, растекания и испарения воды и специальных огнетушащих составов на поверхностях типичных элементов структуры лесных горючих материалов не установлены. Также показано, что целесообразна оценка возможности анализа основных характеристик процессов смачивания, растекания и испарения специальных составов на поверхностях металлов или сплавов (гладких или шероховатых). Установлено, что абразивная обработка изменяет рельефа приповерхностного слоя металлов и их сплавов, а также их поверхностную энергию и свойства смачиваемости. Но опубликованных работ недостаточно для разработки прогностической модели, позволяющей оценить влияние изменений текстуры на поверхностную энергию и свойства смачиваемости поверхностей металлов. Недостаточно для разработки новых технологий 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. Практически отсутствуют данные по кристаллизации капель солей при высоких температурах и тепловых потоках.

Во второй главе приведено описание использованных методов и экспериментального оборудования, а также материалов.

Определение свойств смачиваемости и характеристик процесса растекания по поверхностям лесных горючих материалов, металлов (меди М1 и стали хромоникелетитановой аустенитной стали 12Х18Н10Т) и сплава (алюминиево-магнийевый сплав АМг6) с текстурами, образованными абразивной обработкой, проведены на установке (рис. 1) с использованием оборудования оптического теневого метода. Суть последнего заключается в определении геометрических характеристик капли (контактного угла (θ),

контактного диаметра (d), высоты (h), объема (V)) по ее теньвым изображениям, обработанным методами гониометрии.

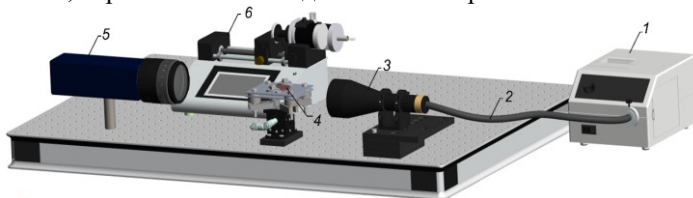


Рисунок 1 – Установка для определения свойств смачиваемости и характеристик процесса растекания малых объемов жидкости: 1 – источник света; 2 – стекловолоконный кабель; 3 – телецентрическая труба; 4 – металлическая подложка; 5 – высокоскоростная камера; 6 – электронный шприцевой насос

Принцип работы оптической теневой системы заключается в освещении капли жидкости, помещенной на поверхность образца, плоскопараллельным светом и получении её фотоизображения высокоскоростной видеокамерой 1. Свет генерируется с помощью источника 2, проходит по стекловолоконному оптическому кабелю 3 и телецентрической трубе 4, освещает каплю на образце 5. Смачиваемость поверхностей характеризовалась статическим контактным углом, который измерялся в условиях дозирования капли жидкости объемом 10 мкл на подложку 4 в произвольно выбранную точку электронным одноканальным дозатором Ленпипет Степпер.

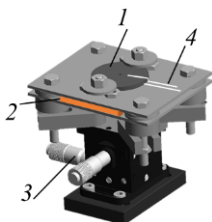


Рисунок 2 – Рабочий участок:
1 – металлическая подложка;
2 – силиконовый нагреватель;
3 – гониометр; 4 – термопары

Исследования испарения капель жидкости, так же, как и при определении свойств смачивания и характеристик процесса растекания, проводились на экспериментальной установке (рис. 1) с использованием теневого метода. Методика исследований отличалась следующим: рабочий участок (рис. 2) – алюминиево-магнелиевая подложка 1, нагреваемая силиконовым нагревателем 2, подключённым к лабораторному автотрансформатору. Гониометр 3 предназначен для выравнивания поверхности в двух плоскостях. Температура поверхности подложки (t_n) регистрировалась термопарами хромель-алюмель 4.

При изучении испарения капель на поверхностях алюминиево-магнелиевого сплава в качестве исследуемых жидкостей выбраны дистиллированная вода и водные растворы солей LiBr (10, 30 %), CaCl₂ (10 %), LiCl (10 %), NaCl (10 %). Объем жидкости варьировался от 10 до 60 мкл с шагом 10 мкл. Температура поверхности была постоянной и равнялась 80 °С.

При исследовании свойств смачивания и процесса испарения капель на поверхностях лесных горючих материалов в качестве исследуемых материалов 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 ЛГМ в качестве основного варьируемого фактора принят начальный объем капель

дистиллированной воды и четырех специальных составов (10 % растворы огнетушащего состава ОС-5 и бишофита, 10 % суспензия бентонита, 10 % эмульсия пенообразователя). Объем капель варьировался в диапазоне от 5 мкл до 25 мкл. При исследовании процесса испарения капель применялась три схемы их нагрева: на разогретой поверхности (кондукция), в газовом потоке (конвекция), в муфельной печи (радиационный нагрев). При исследовании процесса испарения специальных огнетушащих составов основным варьируемым фактором являлась температура. Начальный объем капли составлял 10 мкл. При кондуктивном нагреве в качестве рабочих поверхностей использовались поверхности листов и металлов меди М1 и стали 12Х18Н10Т.

С целью определения влияния шероховатости на процессы смачивания, растекания и испарения капель жидкостей на поверхностях образцов из стали (12Х18Н10Т) и меди (М1) сформировано по одиннадцать текстур абразивной обработкой с использованием шлифовально-полировального станка FORCIPOL 1V с автоматическим головным устройством FORCIMAT. На поверхностях образцов из алюминиево-магниевого сплава (АМг6) сформировано пять текстур с помощью шлифовальной машины Makita. В таблице 1 приведены значения среднего размера зерна (η) абразивных дисков, используемых при обработке меди и стали, в таблице 2 – алюминиево-магниевого сплава.

Таблица 1 – Средний размер зерна абразивных дисков.

Маркировка материала	Паста АСМ 1/0 НВОМ	P2500	P2000	P1500	P1200	P800	P600	P320	P150	P100	P60
η , мкм	меньше 1	8,5	9,5	13	15	22	25,8	46	100	160	269

Таблица 2 – Зернистость материалов (алмазная паста и абразивные диски).

Маркировка материала	Паста АСМ 1/0 НВОМ	P2500	P1000	P600	P400
η , мкм	меньше 1	8,5	18,3	25,8	35,0

Свободная поверхностная энергия (СПЭ) для поверхностей меди и стали определена методом гармонического среднего (Оунса-Вендта-Рабея-Ксельбле).

Исследования растекания капли (рис. 1) проводились при реализации вынужденного нагнетания и откачки жидкости на подложку системой, состоящей из высокоточного электронного шприцевого насоса Cole Parmer 6 и силиконовой трубки диаметром 2 мм, соединяющей насос с отверстием диаметром 0,3 мм в центре подложки 4 (рис. 1). Объем жидкости был постоянным 30 мкл. Эксперименты проведены в условиях изменения расхода (G), который составлял 5, 10, 50, 100 и 600 мкл/мин.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов смачивания и испарения капель растворов, эмульсий и суспензий на поверхностях лесных горючих материалов (хвоя сосны, листья березы и сосновые ветки) и металлов.

Результаты экспериментальных исследований смачивания поверхностей листьев, веток, хвоинок каплями воды и четырех специальных огнетушащих составов (суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор огнетушащего состава ОС-5, эмульсия пенообразователя) приведены на рис. 3.

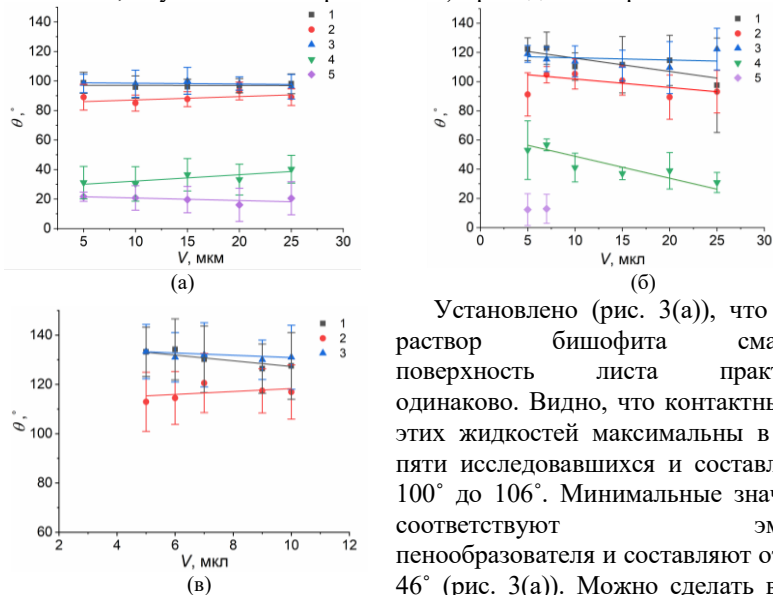


Рисунок 3 – Зависимости контактных углов капель огнетушащих составов от объема дозируемой жидкости на поверхности: (а) – листа, (б) – ветки, (в) – хвоинки. Жидкости: вода (1); суспензия бентонита (2); растворы бишофита (3) и ОС-5 (4); эмульсия пенообразователя (5)

Установлено (рис. 3(а)), что вода и раствор бишофита смачивают поверхность листа практически одинаково. Видно, что контактные углы этих жидкостей максимальны в группе пяти исследовавшихся и составляют от 100° до 106°. Минимальные значения θ соответствуют эмульсии пенообразователя и составляют от 40° до 46° (рис. 3(а)). Можно сделать вывод о том, что в диапазоне изменения объема капель от 5 мкл до 25 мкл эмульсия пенообразователя очень хорошо смачивает поверхность листа, а раствор бишофита и вода не смачивают. Контактные углы капель суспензии бентонита на поверхности листа находятся в диапазоне от 90° до 100° (рис. 3(а)), что соответствует пороговым значениям между режимами смачивания и несмачивания. 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). Также можно отметить, что контактные углы воды, суспензии бентонита и раствора бишофита на поверхности ветки (рис. 3(б)) выше, чем на поверхности листа (рис. 3(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. 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 (рис. 3(в)). Как и в случаях смачивания листьев

и веток, зависимости контактных углов капель от изменения объема на поверхностях хвоинок (рис. 3) имеют схожий характер.

Проведен анализ зависимостей геометрических характеристик капель от их объема. 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 имеет вид:

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

После подстановки выражения для составляющих энергии:

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

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

Принято 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. Радиальная скорость движения жидкости $u = (2r_m - d_0)/\tau_m$. Время растекания $\tau_m = 20$ с установлено в экспериментах. Выражение высоты для капли, если она смачивает материал, имеет вид: $h_m = r_m (1 - \cos \theta) / \sin \theta$. Уравнение (1) решено 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. 4.

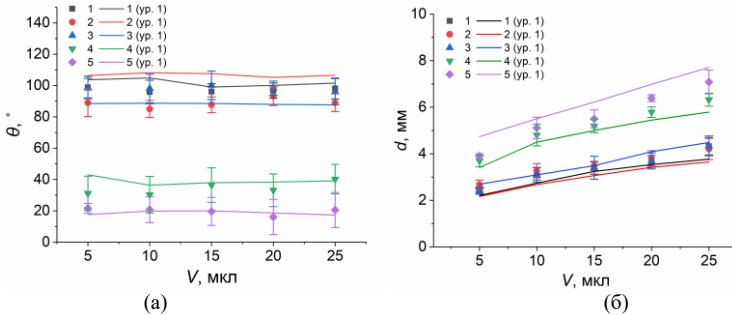


Рисунок 4 – Зависимости геометрических характеристик капель огнетушащих составов от объема дозируемой жидкости на поверхности листа: (а) – контактный угол, (б) – диаметр, (в) – высота. Точки – экспериментально установленные значения, линии – вычисленные значения. Жидкости: 1 – вода; 2 – суспензия бентонита;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

Из рисунка 4 видно, что уравнение (1) удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости контактных углов от объема. Однако, расчетные зависимости диаметра и высоты от объема капли для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя лежат вне диапазона доверительных интервалов экспериментальных данных. Такие расхождения могут быть связаны с тем, что уравнение (1) не учитывает физические и химические свойства поверхности. Известно, что однозначную связь объема капли с ее геометрией можно установить на поверхностях с текстурой близкой к молекулярно-гладкой. Реальные поверхности ЛГМ характеризуются разноразмерной многомодальной шероховатостью и химической неоднородностью. Поэтому предсказать геометрические характеристики капелек на поверхности ЛГМ с высокой точностью сложно.

На рисунке 5 приведены результаты регистрации времен полного испарения капелек исследованных составов в условиях кондуктивного, конвективного и радиационного нагрева.

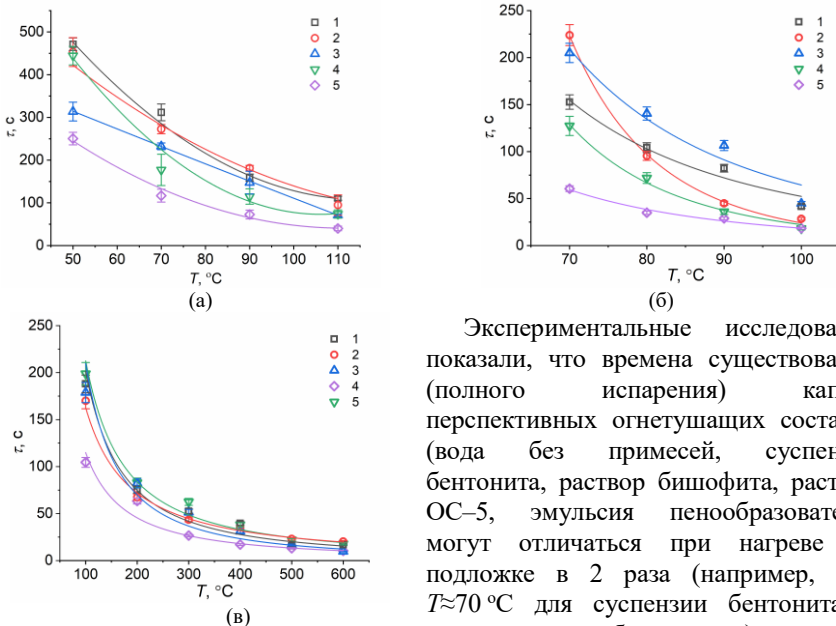


Рисунок 5 – Зависимости времен испарения капелек объемом 10 мкл растворов огнетушащих составов и воды от температуры поверхности листа (а), воздушного потока (б), воздуха при нагреве в муфельной печи (в): вода (1); суспензия бентонита (2); растворы бишофита (3) и ОС-5 (4); эмульсия пенообразователя (5)

схемах и температурах источника нагрева. Эти результаты показывают, что для обеспечения полного испарения капелек таких составов в зоне горения лесного массива с различным тепловыделением необходимы разные высоты сброса и,

Экспериментальные исследования показали, что времена существования (полного испарения) капелек перспективных огнетушащих составов (вода без примесей, суспензия бентонита, раствор бишофита, раствор ОС-5, эмульсия пенообразователя) могут отличаться при нагреве на подложке в 2 раза (например, при $T \approx 70$ °C для суспензии бентонита и эмульсии пенообразователя), в потоке воздуха – в 1,25 раза (при $T \approx 100$ °C для эмульсии пенообразователя и суспензии бентонита), в муфельной печи – в 1,9 раза (при $T \approx 100$ °C для раствора ОС-5 и эмульсии пенообразователя) при идентичных

соответственно, отличающиеся длительности прогрева и движения в пламенной зоне горения.

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 своеобразной теплоизоляции газообразных продуктов пиролиза (горючих газов) от окислительной внешней среды. 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. Вследствие низкого поверхностного натяжения, эти жидкости смачивают ЛГМ и тормозят процесс его термического разложения.

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.

По результатам анализа изменения контактного диаметра (рис. 6) выделены три режима испарения капель 10 % водных растворов солей CaCl_2 , LiCl , NaCl , LiBr , а также 30 % LiBr на полированной поверхности алюминий-магниевого сплава: 1 – увеличение площади контакта; 2 – “пиннинг” капли (площадь контакта постоянна); 3 – “образование кристаллов соли или кристаллогидратов”.

Сравнение изменений объёмов капель дистиллированной воды и водных растворов солей LiCl , NaCl и CaCl_2 в условиях испарения приведено на рис. 6. Установлено, что скорость испарения водных растворов солей CaCl_2 , LiCl , LiBr уменьшается во времени для любого начального объёма капли.

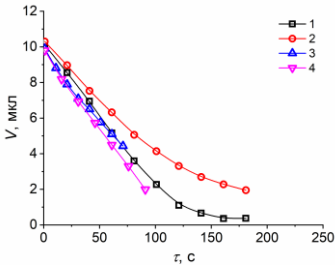


Рисунок 6 – Зависимость объёма капли от времени ($t_n = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – CaCl_2 , $C_0 = 10\%$; 2 – LiCl , $C_0 = 10\%$; 3 – NaCl , $C_0 = 10\%$; 4 – дистиллированная вода

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 .

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов смачивания и растекания капель жидкости на абразивно-обработанных поверхностях металлов.

Для математического описания текстуры поверхностей выбраны трехмерные характеристики шероховатости, установленные стандартом ISO 25178-2:2012: 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}).

На рис. 8 приведены определенные в экспериментах трехмерные характеристики высоты (S_a , S_q , S_z) поверхностей меди и стали в зависимости от среднего размера зерна типичных абразивных дисков (табл. 1). Из рисунка 8 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 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 больше.

Уменьшение со временем скорости испарения обусловлено несколькими причинами. Для воды парциальное давление и концентрация пара C_n вблизи межфазной поверхности зависит от температуры $t_{нк}$ (рис. 7). Для водных растворов солей $C_n = f(t_{нк}, C_c)$, где C_c – концентрация соли вблизи межфазной поверхности (жидкость–газ). Процесс испарения водного раствора соли NaCl (рис. 6) отличается от аналогичного процесса для солей LiCl , CaCl_2 , LiBr .

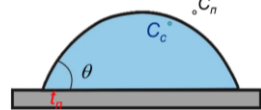


Рисунок 7 – Схематическое изображение капли

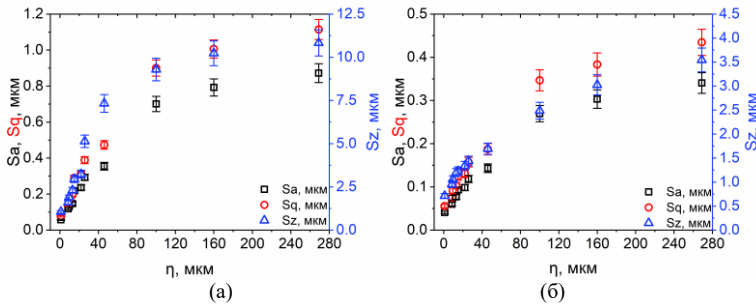


Рисунок 8 – Зависимости основных характеристик высоты (1 – Sa; 2 – Sq; 3 – Sz) от среднего размера зерна абразивных дисков. Поверхности: (а) медь; (б) сталь

Условно можно выделить два интервала роста площади поверхностей меди и стали по среднему размеру зерна при абразивной обработке. Значительный рост амплитуды шероховатости, высоты выступов и глубины впадин по сравнению с полированной поверхностью (близкой по характеристикам к молекулярно-гладкой) происходит при абразивной обработке со средним размером зерна до 100 μm . Увеличение среднего размера зерна от 100 μm до 269 μm не приводит к образованию текстуры, значительно отличающейся от полученной при обработке абразивом с размером зерна 100 μm .

Проведены эксперименты по определению смачиваемости абразивно-обработанных поверхностей меди и стали с использованием теневой методики. На рисунке 9 приведены зависимости поверхностной энергии и статических контактных углов от характеристик шероховатости.

По результатам анализа рис. 9 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 $\text{Spd} \approx 10,6 - 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}\mu\text{m}^2$ (рис. 9)) по сравнению с их высотой (высота выступов не менее 1,7 μm (рис. 9)) 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. 9) с ростом шероховатости полярная составляющая уменьшается, контактный угол растет (свойства смачиваемости ухудшаются). На основании анализа рис. 9 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 $\text{Sa} \approx 0,14 \mu\text{m}$, $\text{Sz} \approx 1,8 \mu\text{m}$, $\text{Sq} \approx 0,13$, $\text{Spd} \approx 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}\mu\text{m}^2$, их поверхностная энергия будет увеличиваться, следовательно, свойства смачиваемости улучшатся. Если же текстура поверхностей меди и стали после абразивной обработки

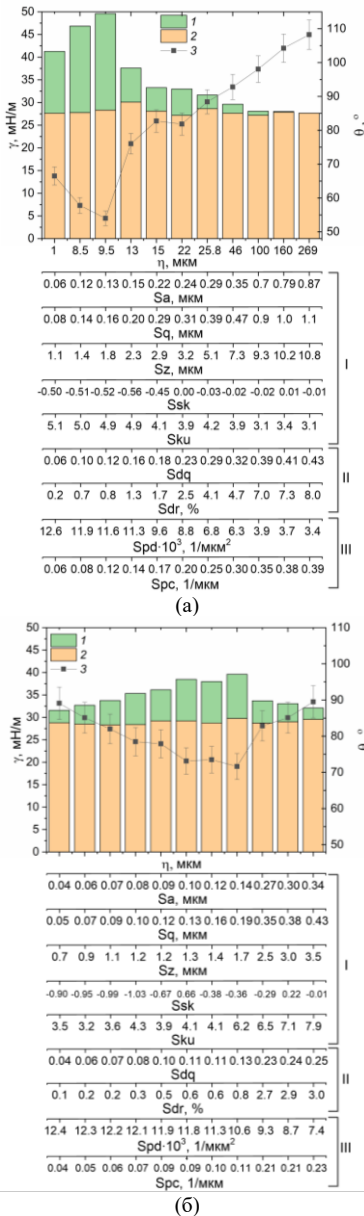


Рисунок 9 – Зависимости поверхностной энергии (полярной (1) и дисперсной (2) составляющих) и статического контактного угла (3) от характеристик шероховатости: (а) медь, (б) сталь. I – высотные характеристики шероховатости; II – гибридные характеристики шероховатости; III – характеристики элемента

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 ошибочен.

Проведен анализ влияния шероховатости на свойства смачиваемости обработанных поверхностей алюминивно-магниевого сплава. На рисунке 10 представлены типичные зависимости статического и динамических контактных углов (ДКУ) в условиях растекания капли с расходом 5 мкл/с от высотных (Sa , Sz) и гибридных (Sdr , Sq) характеристик шероховатости.

По результатам проведенной серии экспериментов установлено, что увеличение шероховатости (оценка которой проведена по характеристикам Sa , Sz , Sdr и Sdq) способствовало усилению гидрофильных свойств (рис. 10). Так как алюминивно-магниевый сплав в состоянии молекулярно-гладкой текстуры демонстрирует гидрофильные свойства, то полученные результаты согласуются с положениями теории Венцеля-Дерягина. Согласно этой теории для шероховатой поверхности $\cos \theta_r = r \cdot \cos \theta$, а изменение

контактного угла прямо пропорционально характеристике шероховатости r (отношение фактической площади к ее проекции). По результатам анализа сформированных текстур установлено, что приращение площади поверхности,

характеризуемое величиной Sdr , составило не более 0,6 %. Следовательно, изменение контактного угла не прямо пропорционально (рис. 10) приращению площади поверхности. Можно предположить, что на свойства смачиваемости после абразивной обработки поверхности сплава АМгб, помимо увеличения площади поверхности, значительное влияние оказывают геометрические параметры элементов текстуры (углублений и выступов), которые характеризуются значениями Sa и Sz . Однако тривиальной зависимости изменения контактного угла от этих характеристик не установлено (рис. 10(а)).

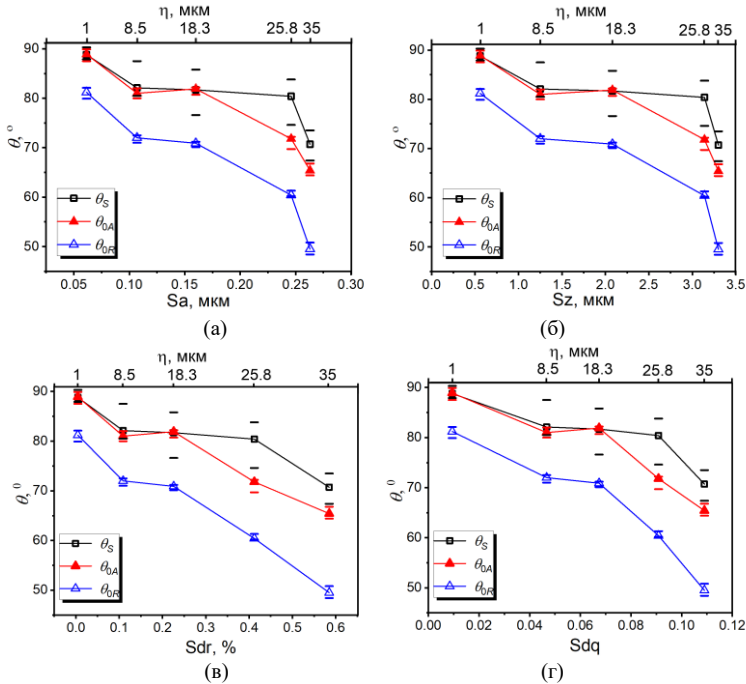


Рисунок 10 – Зависимости статических (θ_s) и динамических (θ_{0A} , θ_{0R}) контактных углов от характеристик шероховатости в условиях растекания капли с расходом 5 мл/с: (а, б) высотных; (в, г) гибридных. Горизонтальными отрезками представлен разброс экспериментальных данных

Из рисунка 10 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 результата сформулирована гипотеза о том, что шероховатость поверхности является причиной метастабильного равновесия системы “твердое тело-жидкость-газ”. Согласно молекулярно-кинетической модели (Т.Д. Блейк) 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. Стоит отметить, что при увеличении расхода дозирования капли с 5 мкл/с до 100 мкл/с отклонение от равновесного состояния увеличивается (разница между статическим контактным углом и динамическим натекания растет).

Известные выражения гидродинамической модели (О.В. Войнов, Р. Кокс) и молекулярно-кинетической модели (Т.Д. Блейк) применены для описания экспериментальных зависимостей ДКУ от скорости перемещения контактной линии (рис. 11). На основе полученных данных установлено, что молекулярно-кинетическая модель наиболее точно аппроксимирует экспериментальные зависимости $\theta = f(V)$. Сделан вывод о том, что молекулярные перемещения являются доминирующими в механизме движения контактной линии по абразивно-обработанным поверхностям алюминиево-магниевого сплава в диапазоне скоростей перемещения контактной линии до 1 мм/с.

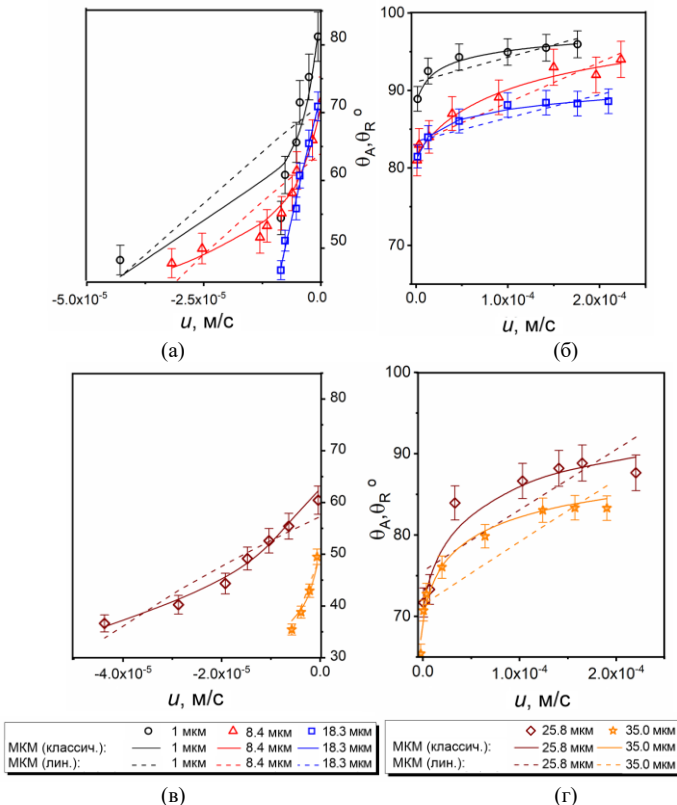


Рисунок 11 – Зависимость динамических наступающих (б, г) и отступающих (а, в) контактных углов от скорости перемещения контактной линии

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что модификация текстуры поверхностей типичных конструкционных материалов (меди, стали, алюминивно-магниевого сплава) абразивной обработкой позволяет изменять диаметр капли воды (стабилизировать положение на шероховатых нагретых поверхностях) до 25 % в условиях её пиннинга (баланса сил, действующих на каплю).

В **заключении** подведены итоги диссертационного исследования, сформулированы 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 средние времена полного испарения капель исследовавшихся достаточно типичных составов становились сопоставимыми.

3. 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.

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 $T \approx 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для эмульсии пенообразователя и суспензии бентонита), в муфельной печи – в 1,9 раза (при $T \approx 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $0,00788\text{--}0,07589\text{ кг/(м}^2\text{s)}$ при температуре поверхности $70\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$

(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 окружающей среды 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 $Sa \approx 0,14$ 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.

11. 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).

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 ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в изданиях, 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:

1. 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, Part A. – P. 161–168.

2. Kuznetsov G.V. Physicochemical features of the effect of special water-based fire retardants on forest materials / G.V. Kuznetsov, **A.G. Islamova**, E.G. Orlova, P.A. Strizhak, D.V. Feoktistov // Fire Safety Journal. – 2021. – Vol. 123, Article number 103371. – P. 1–12.

3. Kuznetsov G.V. Rates of high-temperature evaporation of promising fire-extinguishing liquid droplets / G.V. Kuznetsov, S.S. Kropotova, I.S. Voytkov, **A.G. Islamova** // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, No. 23. – Article number 5190. – P. 1–21.

4. Kuznetsov G.V. Droplet spreading and wettability of abrasive processed aluminum alloy surfaces / G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova, D.V. Feoktistov, **A.G. Islamova**, A.V. Zhuikov // Metals and Materials International. – 2020. – Vol. 26, № 1. – P. 46–55.

5. **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, № 1(25). – С. 58–76.