

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

На правах рукописи

Абедтазехабади Акрам

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО РЕАГИРОВАНИЯ,
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

Специальность 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика
экстремальных состояний вещества

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:
доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Гений Владимирович
кандидат технических наук
Феоктистов Дмитрий Владимирович

Томск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ, ДИСПЕРГИРОВАНИЯ, ИСПАРЕНИЯ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	24
1.1 Влияние текстуры поверхностей нагрева на характеристики зажигания и горения капель жидких топлив.....	24
1.2 Условия и характеристики микровзрывного диспергирования	27
1.3 Сдвиг кризиса кипения второго рода в область более высоких температур	30
1.4 Системы охлаждения на базе двухфазных термосифонов.....	32
Выводы по главе 1	36
ГЛАВА 2. ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	39
2.1 Экспериментальные установки и методы исследования.....	39
2.1.1 Методика формирования текстур на поверхности стали	39
2.1.2 Методы и оборудование для исследования конфигурации текстур поверхностей стали.....	43
2.1.3 Экспериментальный стенд для исследования процессов зажигания и горения капель композиционных топлив на текстурированных поверхностях	44
2.1.4 Методики определения характеристик процессов зажигания и горения капель топлив.....	46
2.1.5 Композиционное топливо	48
2.2 Результаты и обсуждение	51
2.2.1 Анализ геометрических характеристик микроканалов и трехмерных параметров шероховатости	51
2.2.2 Анализ характеристик процессов зажигания и горения топлив	58
Выводы по главе 2.....	70

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО РАСПЫЛЕНИЯ (ПАФФИНГА И МИКРОВЗРЫВА) ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ СМАЧИВАНИЯ И ТЕОРИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕЩЕСТВ	73
3.1 Экспериментальная установка и методы исследования.....	74
3.1.1 Компонентный состав жидких смесей.....	74
3.1.2 Аналитические исследования	75
3.1.3 Экспериментальная установка для создания условий высокотемпературного нагрева жидких веществ	78
3.2 Результаты и обсуждение	80
Выводы по главе 3	91
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ВТОРОГО РОДА.....	93
4.1 Методы исследования и используемое экспериментальное оборудование	93
4.2 Результаты и обсуждение	97
Выводы по главе 4.....	116
ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОСИФОНА.....	119
5.1 Экспериментальная установка и методика исследования.....	119
5.1.1 Экспериментальная установка.....	119
5.1.2 Область варьирования факторов	124
5.1.3 Оценка погрешностей измерений	124
5.2 Результаты экспериментальных исследований.....	126
5.2.1 Изменение текстуры приповерхностного слоя металлических поверхностей	126
5.2.2 Особенности процессов теплопереноса в термосифоне	131
5.3 Результаты экспериментальных исследований.....	143
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	147

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
------------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Главными проблемами энергетического комплекса любой страны является переход к альтернативным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) и снижение антропогенного воздействия процессов сжигания ископаемых видов топлива [1]. Несмотря на колоссальные вложения в развитие отрасли и технологий возобновляемых источников энергии [2], ни одной стране в мире не удалось обеспечить замещением ВИЭ даже половины потребляемой тепловой и электрической энергии только населением (без учета промышленных предприятий). Поэтому в настоящее время наиболее перспективным решением проблем замещения традиционных ископаемых твердых видов топлива и снижения антропогенного воздействия продуктов горения от них является использование новых видов топлив (композиционных), представляющих собой смесь твердых натуральных топлив (угля или торфа), воды (в виде стоков) и различных энергетических добавок в виде отработанных жидких, горючих веществ (например, отходов производства и переработки нефти) [3]. Такие перспективные виды топлив известны под названием водоугольных (ВУТ) [4] и органоводоугольных (ОВУТ) [5]. Исследования процессов зажигания и горения ВУТ и ОВУТ направлены в основном на разработку технологий приготовления, транспорта, хранения [6–8], установление условий и характеристик зажигания и горения [9,10], а также на анализ антропогенных выбросов продуктов их горения [11]. В настоящее время для перспективных видов композиционных топлив (также и традиционных) не изучено влияние характеристик поверхностей нагрева, в частности шероховатости и конфигурации текстуры, на характеристики зажигания и горения, шлакования, теплообмена на уровне, позволяющем сформулировать практические рекомендации по текстуре поверхностей теплообмена, обеспечивающей возможность интенсификации процессов теплообмена.

Один из самых дешевых и практичных способов производства тепловой и электрической энергии во всем мире – это сжигание топлива. Топочные устройства рассчитываются под определенный технический и элементный состав проектного и резервного топлив. Переход на непроектное топливо, например, в случае снижения общего расхода угля путем вовлечения в топливно-энергетический баланс новых видов топлив (ВУТ и ОВУТ) пока маловероятен по ряду причин. Одна из основных – загрязнения поверхностей нагрева в топке котла, которые приводят к снижению интенсивности теплообмена и, соответственно, к резкому увеличению общего расхода топлива на тепловой электрической станции.

Проблема золообразования и шлакования поверхностей нагрева возникает в том числе из-за выхода из строя обдувочных устройств или смены режима работы по каким-либо причинам. Полностью предотвратить процесс шлакования поверхностей нагрева можно только сжигая уголь с образованием тугоплавкой золы. В остальных случаях котельные агрегаты несколько раз в год останавливают для проведения внутритопочных очистных мероприятий. Зола после кристаллизации так же предоставляет угрозу для поверхностей нагрева, расположенных после топки (пароперегреватели, водяные экономайзеры, воздухоподогреватели). Такая зола может уменьшать размеры зазоров между трубками. Все это может привести к падению давления, снижению интенсивности теплоотдачи от омывающихся дымовыми газами труб и к дальнейшему аварийному останову котельного агрегата.

Снизить шлакование и коррозию поверхностей нагрева частично можно путем использования минеральных и серных добавок, смешанных с топливом до или вовремя сжигания. При этом в топке происходит высвобождение кислотных элементов (оксиды серы при горении гипса), которые вступают в химическую реакцию с хлоридами щелочных металлов, снижая тем самым загрязнение поверхностей нагрева. Использование измельченных отходов гипсокартона может снизить возможность шлакования топочных экранов при сжигании биотоплива (древесная кора, солома, сухая трава). Однако все эти добавки требуют

дополнительных капиталовложений. Высокие содержания в каплях других микроэлементов топлива, образующих золу (Cl, Si, P и S), может интенсифицировать процесс шлакования. Добавки, используемые для снижения шлакования топочных экранов, действуют в результате химической адсорбции; физической адсорбции; добавление инертных элементов для повышения температуры плавления золы; измельчение и разбавление добавок, приводящее к снижению спекаемости золы. В то же время анализ ранее выполненных исследований [12–22] позволяет выдвинуть гипотезу, что перспективным является способ модификации поверхностей металлов и сплавов путем лазерной обработки с целью достижения эффективного взаимодействия с окружающей средой (каплями жидкостей и расплавов). Но характеристики (гидрофильность/гидрофобность, олеофильность/олеофобность, свободная поверхностная энергия) поверхностей нагрева до настоящего времени не изучены в полном объеме, что ограничивает их применение в технике и технологиях.

При зажигании и горении капель топлив, широко используемых на практике (бензин, керосин, спирт, отработанное масло), реализуется достаточно хорошо изученный процесс фазового перехода в режимах испарения или кипения горючей жидкости. Зажигание и горение композитных многокомпонентных топлив при определенных условиях происходит в условиях диспергирования капель (вторичного измельчения капель). Последнее известно под терминами паффинг и микровзрыв [23–25]. Суть этих процессов состоит во вторичном дроблении капель жидких топлив, способствующем увеличению в несколько раз площади поверхности испарения горючих компонентов и размеров области их выгорания, что значительно интенсифицирует процессы зажигания и горения, а также увеличивает полноту выгорания топлива. Анализ публикаций [23–37], посвященных диспергированию жидких и композитных топлив, показал, что интенсивность этого процесса зависит от большого числа факторов, таких как способ подвода теплоты (кондуктивный, конвективный, радиационный); температура среды; концентрации компонентов в составе композитных топлив (суспензий, эмульсий, растворов); свойства компонентов и их соотношение в

смеси (твердые частицы, горючая жидкость, вода, поверхностно-активные вещества); размеры капель и условия их формирования, определяющие как структуру капли (горючая жидкость является оболочкой, вода ядром, и наоборот), так и расположение капли в пространстве («сидячая» на поверхности, «висящая» на подвеске, летящая в потоке газа). В реальных условиях на характеристики диспергирования многокомпонентных топлив оказывает влияние совокупность перечисленных выше факторов. Поэтому при изменении условий зажигания и горения таких топлив, отдельные факторы из выше перечисленных при их совокупном влиянии на процесс диспергирования, могут оказывать как положительный эффект, так и ослаблять его влияние [38]. Известные эксперименты [39–41] позволили установить механизм диспергирования – разрушение паровых пузырей в ядре капли. Но пока не определены причины, особенности и масштабы протекания этого эффекта при зажигании и горении композитных топлив. Также стоит отметить, что компонентная база исследованных топлив [42] достаточно ограничена и представлена в основном углями (каменные, бурые), горючими жидкостями (керосин, мазут, различные виды масел) и одной не горючей жидкостью (водой), которые являются самостоятельными технологическими энергоресурсами, широко используемыми на практике. Не разработаны основные положения теории, применимые на практике для прогнозирования гарантированного протекания диспергирования капель, в том числе топливных композиций.

Разработка новых технологий и технических решений, приводящих к повышению энергоэффективности и ресурсосбережения систем охлаждения энергонасыщенного оборудования невозможна без создания новых конструкционных материалов с целевыми функциональными свойствами [43]. К перспективным системам охлаждения, например, устройств связи пятого поколения 5G, с поверхности которых отводятся тепловые потоки высокой плотности (до 1000 Вт/см^2), относятся системы, базирующиеся на капельном орошении [44]. Такое охлаждение позволяет повысить интенсивность и равномерность теплоотвода, значительно снизить расход теплоносителя. Но

полученные к настоящему времени результаты показывают, что использование традиционных подходов (применение элементов систем охлаждения, изготовленных из стали, меди, алюминия и их сплавов, обработанных шлифовкой или полировкой) не позволяют решить задачу интенсивного охлаждения поверхностей, нагретых до высоких температур. Лазерные методы обработки теплопередающих поверхностей – один из наиболее эффективных способов интенсификации процессов испарения и кипения. В связи с развитием в последние десятилетия лазерной техники стали доступны финансово возможные технологии создания целевых, функциональных поверхностных свойств металлов. Использование на практике модифицированных лазерным излучением теплопередающих поверхностей систем охлаждения может решить ряд проблем, связанных с растущим глобальным спросом на электронную технику нового поколения, в частности, при интенсификации отвода тепловых потоков высокой плотности от элементов энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур.

Термосифон (ТС) – современная, автономная, энергоэффективная и ресурсосберегающая система охлаждения способная отводить тепловые потоки высокой плотности [45]. В термосифоне теплоноситель циркулирует в виде капель и пленок жидкости, поэтому свойства смачиваемости внутренней поверхности (гидрофильные, гидрофобные, комбинированные) играют важную роль в увеличении интенсивности тепломассопереноса в условиях испарения и кипения слоя жидкости на нижней крышке и конденсации (например, гидрофобные поверхности способствуют процессу капельной конденсации) на верхней крышке ТС [46]. Известно, что физико-химическое взаимодействие жидкостей с поверхностями твердых тел в различных комбинациях жидкой и твердой фаз является в последнее время активным объектом исследований [47], [48–50]. Большинство таких исследований проведено при анализе основных характеристик «сидячих» [51,52] на горизонтальных поверхностях капель и стекающих пленок жидкости [53,54] из-за относительной простоты таких экспериментов. Установлено, что тонкий слой жидкости создает тепловое

сопротивление, снижающее интенсивность тепломассопереноса, а образование капель приводит к росту характеристик отвода теплоты (коэффициент теплоотдачи в таких условиях в несколько раз выше, чем при переносе теплоты через пленку жидкости). Анализ результатов исследований [55–63] показал, что изменение свойств смачиваемости возможно разными способами (спекание, нанесение пленок сублимирующихся материалов, нанесение гидрофобных агентов, травление, электроосаждение наночастиц, химическое осаждение углеродных нанотрубок и др.)

Наиболее перспективным способом обработки металлических поверхностей, придающим поверхности важные на практике (гидрофобные и гидрофильные) свойства, является лазерная обработка, так как это уже относительно простой и быстрый технологический процесс, который легко применим для деталей сложной конструкции. Варьируя параметрами лазерного луча можно изменять приповерхностный слой, получая различные текстуры, которые мало подвержены деградации и старению [64–67]. Но до настоящего времени достаточно ограничена информация о закономерностях и характеристиках процесса тепломассопереноса и гидромеханики в термосифоне, внутренняя поверхность которого текстурирована лазерным излучением [68,69]. Не установлено влияние текстуры внутренних поверхностей термосифона после импульсной наносекундной лазерной обработки на условия возникновения процесса кипения и конденсации теплоносителя в ТС. Не установлены особенности механизмов пространственного тепломассопереноса и гидромеханики в термосифонах с внутренними текстурированными импульсным лазером поверхностями нижней и верхней крышек в условиях тепловых потоков высокой плотности, характерных для элементов конструкции например, ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в аварийных режимах.

Важно, что отсутствует методика проведения экспериментальных исследований основных закономерностей процессов тепломассопереноса в термосифоне, к испарительной части которого подведен тепловой поток высокой плотности, соответствующий аварийным условиям работы ЯЭУ, а на внутренних

поверхностях нижней и верхней крышек ТС нанесена текстура. Такие исследования с визуальным наблюдением процессов, происходящих в испарительной и конденсационной частях позволят более детально изучить процессы в термосифоне и позволят дать объективное обоснование возможности охлаждения теплонагруженных элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах автономными (не связанными с источниками электроснабжения) системами охлаждения на базе термосифонов с внутренними текстурированными поверхностями нижней и верхней крышек.

Научные проблемы, на решение которых направлена диссертация. В области «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» одна из научных проблем решаемых в диссертации – отсутствие экспериментальных данных о закономерностях влияния перспективных способов модификации поверхностей металлов и сплавов на условия и характеристики взаимодействия при высоких температурах таких поверхностей с химически активными двухфазными потоками, в том числе содержащими капли композиционных топлив и расплава минеральной части угля, в условиях варьирования в широких диапазонах значимых факторов. Научная проблема имеет междисциплинарный характер. Базируется на современных представлениях теорий химической физики, тепломасообмена, материаловедения, механики сплошной среды, термодинамики смачивания, поверхностной энергии жидких и твердых тел. До настоящего времени, несмотря на широкий интерес международного научного сообщества к решению проблемы взаимодействия продуктов горения разных видов топлив с поверхностями нагрева в топочных устройствах, не установлена однозначная связь между характеристиками отдельных компонентов зольных частиц и материалов поверхностей нагрева, их компонентным составом. Отсутствие достоверных экспериментальных данных препятствует разработке универсального научно-обоснованного способа снижения интенсивности адгезии золы к поверхностям нагрева, применимого при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ,

направленных на повышение эффективности объектов промышленной энергогенерации.

Также процессы зажигания капли (фрагмента композитного) топлива, горения и выгорания его компонентов в условиях взаимодействия с шероховатыми поверхностями нагрева не изучены на уровне, позволяющем разработать практические рекомендации к обработке поверхностей последних, в частности к формированию вида текстуры (шероховатости), которая может быть охарактеризована параметрами шероховатости.

Кроме того, в диссертации решается задача установления основных закономерностей процессов вторичного распыления капель топлива (диспергирования в режимах паффинга или микровзрыва), в том числе композиций сложного компонентного состава.

В области «Теплофизика и теоретическая теплотехника» решалась задача по разработке физических основ работы систем охлаждения нового поколения для отвода тепловых потоков высокой плотности. При отводе тепловых потоков высокой плотности возникает кризис теплообмена второго рода [70], для капель широко известен как “эффект Лейденфроста”. Последний является частным случаем пленочного кипения. Капля жидкости, соприкасаясь с твердой поверхностью, температура которой значительно выше температуры кипения этой жидкости, образует между поверхностью и жидкостью теплоизолирующий слой (“паровую подушку”), характеризующийся высоким термическим сопротивлением. Температура поверхности теплонагруженного оборудования в таких случаях будет повышаться, что может привести к термическому разрушению теплопередающей поверхности и аварии охлаждаемого устройства. В диссертации предложен новый подход к решению данной проблемы путем формирования лазерным излучением наносекундной длительности многомодальной шероховатости с заданным видом текстуры и создания экстремальных свойств смачивания на поверхностях металлов. Также диссертационная работа направлена на решение актуальной на международном уровне научной проблемы отвода тепловой энергии от ядерных энергетических

установок в аварийных режимах работы (отсутствие электроэнергии) с помощью автономных (не связанных с источниками электроснабжения) систем охлаждения на базе термосифонов.

Цели и задачи решаемые в диссертации. По специальности «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»: 1) определение влияния конфигурации текстуры поверхностей стали, модифицированных абразивными материалами и лазерным излучением наносекундной длительности, на закономерности и характеристики процессов зажигания, горения и диспергирования капель, а также осаждения продуктов выгорания капель новых видов топлива ОБУТ, эмульсии и масла в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме пуска (смешанный подвод теплоты к капле (конвекцией, излучением и кондукцией)) и в режиме номинальной работы оборудования (преимущественно кондуктивный прогрев капли топлива при ее взаимодействии с поверхностью); 2) обоснование гипотезы о причинах реализации диспергирования (паффинга и микровзрыва) капель бинарных жидкостей (в том числе, входящих в компонентный состав многокомпонентных топлив) на основе представлений термодинамики смачивания и теории двухкомпонентной поверхностной энергии веществ и материалов.

По специальности «Теплофизика и теоретическая теплотехника»: 1) оценка возможности смещения кризиса теплообмена второго рода (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева лазерным излучением наносекундной длительности; 2) обоснование возможности охлаждения теплонагруженных элементов конструкции ядерных энергетических установок в аварийных режимах автономными (не связанными с источниками электроснабжения) системами охлаждения на базе термосифонов с внутренними поверхностями, модифицированными лазерным излучением наносекундной длительности.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использованы методы и методики экспериментального исследования процессов

зажигания, горения, тепло- и массопереноса. Подробное описание методов и методик экспериментальных исследований, используемых в экспериментах, представлено в главах 2, 3, 4 и 5.

Научная новизна работы.

1. Показано, что обработка поверхностей металлов лазерным излучением значительно увеличивает стойкость поверхностей к адгезии продуктов горения жидких и композиционных топлив.

2. Установлено, что за счет формирования конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов лазерными методами обработки поверхностей металлов можно уменьшить время задержки зажигания капель топлив объемом до 10 мкл (масла до 25%, эмульсии до 28%, суспензии до 55%) в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования. Последнее обусловлено лучшим взаимодействием капель топлива с модифицированными лазерным излучением поверхностями нагрева и наибольшим приростом площади поверхности, обусловленным развитой шероховатостью.

3. Установлено, что использование на практике поверхностей нагрева с текстурой в виде микроканалов в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования, способствует интенсификации физико-химических процессов, происходящих при горении капель топлив (эмульсий и суспензий). Последнее характеризуется увеличением максимального размера области выгорания капель (свыше 50%), а в случае горения композиционных топлив увеличением числа инициаций паффинга, что в итоге снижает время выгорания капель топлив.

4. В условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, использование поверхностей нагрева с текстурой в виде микроканалов позволяет до 40% уменьшить время задержки зажигания капель композиционных жидких топлив (например, ОБУТ), а также широко используемых на практике обычных жидких топлив.

5. Из используемых текстур в экспериментах, воспроизводящих номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, наименьшее

время выгорания капель топлив масла, эмульсии и суспензии зарегистрировано на поверхностях с текстурой ширина микроканалов которой 65 мкм, а ширина нетекстурированной части 130 мкм при всех прочих равных условиях. Полученный результат объясняется более развитой поверхностью за счет выбранной конфигурации текстуры. Так уменьшение времен выгорания на таких поверхностях, модифицированных лазерным излучением, по сравнению с полированной поверхностью в случае горения капель масла составляет более 40%, в случае эмульсии 40%, а в случае суспензии 34%.

6. Для интенсификации процесса выгорания капель топлив в условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, предпочтительно использовать на практике поверхности нагрева с более развитой текстурой. Из исследовавшихся конфигураций текстур, сформированных лазерным способом обработки, наилучшие результаты по характеристикам зажигания (τ_d) и горения (τ_{burn} , N , D_{max}) капель топлив, в том числе и композитных, в условиях, воспроизводящих пуск и номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, продемонстрировала текстура ширина микроканалов которой 65 мкм, а ширина нетекстурированной части 130 мкм.

7. Экспериментально доказано, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Паффинг реализуется при смешении нерастворимых (или плохо растворимых) жидких компонентов, характеризующихся значительным отличием полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения. Микровзрыв реализуется только при смешении взаимно нерастворимых компонентов, причем один компонент должен характеризоваться отношением $\sigma_L^P/\sigma_L^D > 1$ (должен быть «строغو» полярным), а второй отношением $\sigma_L^P/\sigma_L^D \leq 0,1$ (должен быть «строغو» дисперсным). Кроме того, необходимо обеспечение внешних условий нагрева,

при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю.

8. Экспериментально установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью, высотой между впадинами и вершинами, а также приростом площади поверхности за счет шероховатости. Температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности..

9. Экспериментально доказано, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), широко используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств, является наиболее перспективным по сравнению с механической обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры и создания экстремальных свойств смачивания (супергидрофильности) в достаточно широких диапазонах значений управлять характеристикой кризиса кипения второго рода температурой Лейденфроста (увеличивается более чем 110°C на поверхности алюминия, и более чем на 45°C на поверхности нержавеющей стали). Зарегистрированное смещение температур Лейденфроста характерно для кризиса кипения в атмосферных условиях с использованием дистиллированной деаэрированной воды в качестве теплоносителя на сформированных лазерным излучением текстурах при энергии в импульсе до 0,6 мДж. Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развитую многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее трех.

10. Результаты экспериментов обосновывают возможность охлаждения теплонагруженных элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах автономными (не связанными с источниками электроснабжения) системами охлаждения на базе термосифонов с внутренними текстурированными поверхностями нижней и верхней крышек. В диапазоне тепловых потоков $q=0,7 - 15 \text{ кВт/м}^2$ при заполнении испарителя на 15% и в условиях близких к критическим условиям работы термосифонов ($\varepsilon=5\%$) испаритель ТС не будет осушен. Показано, что при тепловых потоках малой плотности (до $1,3 \text{ кВт/м}^2$) текстурирование крышек не влияет на теплоперенос в термосифоне.

Практическая значимость работы. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при решении актуальных проблем теплотехники – повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем использования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) с модификацией поверхностей лазерным излучением наносекундной длительности. Примерами энергонасыщенного оборудования являются устройства связи пятого поколения 5G, атомные реакторы, микропроцессоры суперкомпьютеров и радиоэлектронной техники авиа- и космических аппаратов. Полученные в настоящей работе результаты способствуют не только развитию фундаментальных знаний о процессах диспергирования (вторичного распыления) капель, но и разработке перспективных промышленных технологий, основанных на процессах вторичного распыления капель. К таким технологиям относятся: 1) в промышленной теплоэнергетике – энергоэффективные способы сжигания в условиях микровзрывного диспергирования капель композиционных топлив; 2) в металлургии – способ отвода тепловых потоков высокой плотности от поверхностей непрерывнолитой заготовки в условиях микровзрывного диспергирования капель негорючих эмульсий и суспензий при орошении ими поверхности сляба в зоне вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок; 3) в цифровых, интеллектуальных производственных технологиях способ охлаждения, базирующийся на микровзрывном диспергировании капель

теплоносителей, а также для микроэлектронных устройств, с поверхности которых отводятся тепловые потоки высокой плотности (до 1000 Вт/см^2).

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных средств измерений, методов анализа и обработки опытных данных, а также в ряде примеров хорошим согласованием экспериментальных и теоретических результатов. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных проводилась по результатам расчетов погрешностей измерений регистрируемых физических величин.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Экспериментальные данные по влиянию шероховатости и конфигурации текстуры поверхностей стали, модифицированных абразивными материалами и лазерным излучением наносекундной длительности, на закономерности и характеристики процессов зажигания, горения, диспергирования капель, а также осаждения продуктов выгорания капель новых видов топлива ОБУТ, эмульсии и масла в обычном жидком состоянии в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме пуска (смешенный подвод теплоты к капле (конвекцией, излучением и кондукцией)) и в режиме номинальной работы оборудования (преимущественно кондуктивный прогрев капли топлива при ее взаимодействии с поверхностью).

2. Модели процессов паффинга и микровзрыва капель в условиях высокотемпературного нагрева, достаточного для стабильного зажигания многокомпонентных топлив. Модели базируются на положении, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Оценка растворимости многокомпонентных составов выполнена на основе широко известного подхода «подобное растворяет подобное». Последний базируется на сопоставлении дисперсной и полярной составляющих поверхностного натяжения компонентов, входящих в состав топлив. При смешении полярного вещества с

неполярным согласно подходу «подобное растворяет подобное» образуется смесь с взаимонерастворимыми компонентами. При нагревании малых объемов жидкостей (капель) этих смесей до высоких температур происходит диспергирование (вторичное распыление). Т.е. паффинг или микровзрыв реализуются только при интенсивном высокотемпературном нагреве многокомпонентной капли при условии, что в поверхностном натяжении одного компонента преобладает полярная составляющая (жидкость должна быть «строго» полярной $\sigma_L^P/\sigma_L^D > 1,0$), а в поверхностном натяжении другого компонента преобладает дисперсная составляющая (жидкость должна быть «строго» дисперсной $\sigma_L^P/\sigma_L^D \leq 0,1$).

3. Обоснование того, что Лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств (атомных реакторов, устройств микроэлектроники, в том числе в авиа- и космических технологиях, устройств охлаждения на базе термосифонов и тепловых труб), является наиболее перспективным по сравнению с механической обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры, шероховатости и создания экстремальных свойств смачивания (супергидрофильности) в достаточно широких диапазонах значений смещать температуру Лейденфроста более чем 110°C при нагреве поверхности алюминия и более чем на 45°C при нагреве поверхности нержавеющей стали. Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развитую, многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее трех.

4. Экспериментальные данные по влиянию текстуры (шероховатости), внутренних поверхностей нижней и верхней крышек термосифона и свойств

смачиваемости на характеристики процессов кипения и конденсации теплоносителя в термосифоне при тепловых потоках, характерных для элементов конструкции ядерных энергетических установок в аварийных режимах.

Личный вклад автора состоит в разработке методик экспериментальных исследований; проведении экспериментальных исследований; выборе методов измерений в экспериментах; оценке систематических и случайных погрешностей; в совместной с научными руководителями формулировке выводов и основных защищаемых положений диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» 23 – 25 апреля 2019 г.
2. IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (октябрь 2020).
3. Международная молодежная научной конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» 20 – 22 апреля 2021 г.
4. II Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения» 13 – 15 Декабря 2022 года.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации изложены в шести публикациях, три из них статьи, опубликованные в научных журналах, индексируемых в базах данных «Web of Science» и «Scopus».

1. Orlova, E., Glushkov, D., Abedtazehabadi, A., Belyaev, S., & Feoktistov, D. (2023). Influence of the Texture Configuration of Heating Surfaces Created by Laser Irradiation on the Ignition and Combustion Characteristics of Liquid Fuels. *Applied Sciences*, 13(1), 95.

2. Feoktistov, D., Orlova, E., Glushkov, D., Abedtazehabadi, A., & Belyaev, S. (2023). Conditions for and Characteristics of the Dispersion of Gel Fuel Droplets during Ignition. *Applied Sciences*, 13(2), 1072.
3. Феоктистов Д.В., Кузнецов Г.В., Абедтазехабади Акрам, Орлова Е.Г., Бондарчук С.П., Дорожкин А.В. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 04. С. 12–18.
4. Ponomarev K., Feoktistov D., Abedtazehabadi A. Experimental investigation of the heat transfer intensity in thermosyphon // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2019. – Т. 2135. – №. 1. – С. 020048.
5. Ponomarev K., Feoktistov D., Abedtazehabadi A. Aspects of the research methodology of convection, conduction, evaporation and condensation jointly occurring in the thermosyphon // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2019. – Т. 2135. – №. 1. – С. 020047.
6. Ponomarev, K., Abedtazehabadi, A. (2020). Experimental Investigation of the Temperature Distribution Along the Two-Phase Thermosyphon Height and the Condensation Type on the Top Cover. AIP Conference Proceedings, 1-4.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, основных результатов и выводов по диссертации, списка литературных источников, включающего 213 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен анализ степени ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна работы и ее практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, и сведения об их апробации.

В первой главе выполнен анализ современного состояния теории и практики процессов зажигания, кипения и диспергирования на текстурированных поверхностях.

Во второй главе приведено описание разработанных экспериментальных стендов, полученных результатов и выводов по влиянию конфигурации текстуры в виде микроканалов на характеристики зажигания и горения капель композиционного топлива ОБУТ, эмульсии и масла в обычном жидком состоянии в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме запуска (смешенный подвод теплоты к капле (конвекцией, излучением и кондукцией)) и в режиме номинальной работы оборудования (преимущественно кондуктивный прогрев капли топлива при ее взаимодействии с поверхностью).

В третьей главе приведено описание разработанных экспериментальных стендов, полученных результатов и выводы с целью обосновать сформулированную автором диссертации гипотезу о механизмах реализации паффинга и микровзрыва капель в условиях высокотемпературного нагрева, достаточного для стабильного зажигания многокомпонентных топлив. Гипотеза основана на предположении о том, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Оценка растворимости многокомпонентных составов выполнена на основе широко известного подхода «подобное растворяет подобное» [71]. Последний базируется на сопоставлении дисперсной и полярной составляющих поверхностного натяжения компонентов, входящих в состав топлив. Поверхностное натяжение связано с энергией взаимодействия молекул в объеме конденсированной фазы, мерой которой является энергия адгезии. Работа адгезии – это работа, которую нужно совершить в изотермических условиях для разделения молекул конденсированной фазы, т.е. разрыва межфазной поверхности компонентов, входящих в состав многокомпонентной смеси. Слабые связи (ван-дер-ваальсовых взаимодействий)

характеризуются дисперсной составляющей. Полярная составляющая поверхностного натяжения характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные). Практически все известные исследования по паффингу и микровзрыву проводятся на смесях, в состав которых входит вода, являющаяся наиболее распространенным сильно полярным веществом. Как правило, вода смешивается с углеродосодержащими горючими компонентами, которые являются неполярными (дисперсными) веществами. При смешении полярного вещества с неполярным согласно подходу «подобное растворяет подобное» образуется смесь с взаимонерастворимыми компонентами. При нагревании малых объемов жидкостей (капель) этих смесей до высоких температур происходит диспергирование (вторичное распыление). Т.е. паффинг или микровзрыв реализуются только при интенсивном высокотемпературном нагреве многокомпонентной капли при условии, что в поверхностном натяжении одного компонента преобладает полярная составляющая (жидкость должна быть «строго» полярной $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$), а в поверхностном натяжении другого компонента преобладает дисперсная составляющая (жидкость должна быть «строго» дисперсной $\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,1$).

В четвертой главе представлены результаты экспериментов с целью анализа возможности смещения кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур или модификации теплопередающих поверхностей нагрева лазерным излучением наносекундной длительности.

В пятой главе представлены результаты исследования системы охлаждения на базе двухфазного термосифона с модифицированными лазерным излучением верхними и нижними крышками.

В заключении сформулированы **основные результаты и выводы**.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ, ДИСПЕРГИРОВАНИЯ, ИСПАРЕНИЯ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

1.1 Влияние текстуры поверхностей нагрева на характеристики зажигания и горения капель жидких топлив

Главными проблемами энергетического комплекса любой страны является переход к альтернативным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) и снижение антропогенного воздействия продуктов сгорания ископаемых видов топлива (оксидов углерода, азота, серы). Несмотря на колоссальные вложения в развитие отрасли и технологий возобновляемых источников энергии [2], ни одной стране в мире не удалось обеспечить замещением ВИЭ даже половины потребляемой тепловой и электрической энергии только населением (без учета промышленных предприятий). Поэтому в настоящее время наиболее перспективным решением проблем замещения традиционных ископаемых твердых видов топлива и снижения антропогенного воздействия продуктов горения от них является использование новых видов топлив, представляющие собой смесь низкосортных твердых натуральных топлив (угля или отходов углеобогащения), воды (в виде стоков) и различных энергетических добавок в виде отработанных жидких, горючих веществ (например, отходов производства и переработки нефти). Такие перспективные виды топлив известны под названием водоугольных (ВУТ) [4] и органоугольных (ОВУТ) [5]. Известные исследования процессов зажигания и горения ВУТ и ОВУТ направлены на разработку процедуры приготовления, получение оптимального состава [6–8], исследование механизмов и характеристик зажигания и горения [9,10], а также на изучение антропогенных выбросов продуктов их горения [11].

Основной решаемой проблемой при разработке оптимального состава водоугольных суспензий является получение суспензии с высоким содержанием

угольной составляющей при низкой вязкости состава. В [6], для улучшения стабильности состава, увеличения теплотворной способности, а также снижения содержания оксидов азота и диоксида серы, предложено добавлять сажу в водоугольную суспензию. Влияние размера угольных частиц, объемной доли и марки угля в составе топлива на его реологические свойства изучено в [7], среди которых наиболее важным является вязкость. Варьированием доли угля от 30 до 50 % в составе суспензии, а также с использованием различных добавок, получены составы с улучшенными реологическими свойствами и стабильностью [8]. Механизмы горения водоугольной суспензии на воздухе и в кипящем слое детально изучены в [9], при лазерном нагреве – в [10]. Экспериментально доказано [11], что на единицу выделившейся энергии сжигание ВУТ и ОВУТ характеризуется малым по сравнению с традиционными ископаемыми топливами содержанием CO_2 , NO_x , SO_x в дымовых газах.

Водоугольные и органоводоугольные топлива на практике предполагается сжигать в условиях распыления форсунками или различного типа инжекторами в топках энергогенерирующих установок. В таких условиях на характеристики процессов зажигания и горения значительное влияние будут оказывать не только режим распыления от которого зависит размер образующихся капель и струй, но характеристики поверхностей нагрева с которыми часть капель будет взаимодействовать. Стоит отметить, что в настоящее время не только для перспективных новых видов топлив, таких как ВУТ и ОВУТ, но и для традиционных жидких топлив не изучено влияние характеристик поверхностей нагрева, в частности конфигурации текстуры, на характеристики зажигания и горения на уровне, позволяющим сформулировать практические рекомендации к текстуре поверхностей теплообмена энергогенерирующих установок.

Известны исследования влияния шероховатости термобарьерных покрытий на процессы тепломассопереноса и горения топлива в камерах сгорания дизельных двигателей [72], а также двигателей с искровым зажиганием [73]. Такие покрытия создавались методами плазменного напыления и анодирования. Обнаружен негативный эффект – шероховатость увеличивает теплоотдачу и

замедляет горение. С целью снижения такого отрицательного влияния в [74] предложено наносить покрытие только на верхнюю поверхность поршня, исключая камеру.

Метод оксидирования поверхностей нагрева котлоагрегатов [75] использовался для снижения адгезии продуктов горения топлив на поверхностях нагрева. В [75] установлено, что такой метод позволяет при эксплуатации котлоагрегата снизить загрязнение поверхностей золой за счет образующейся на поверхности металла защитной оксидной пленки. Последнее ослабляет адгезию золы и смолистых отложений на поверхностях нагрева, за счет чего появляется возможность увеличить время работы котельного агрегата между перерывами на его плановое обслуживание. Однако в [62] не исследовалось влияние текстуры поверхности нагрева, сформированной методом оксидирования, на процессы зажигания и горения капель топлив, расположенных на ней.

Влияние шероховатости поверхностей металлов на характеристики зажигания и горения изучалось при разработке теории детонации конденсированных взрывчатых веществ [76]. Установлено [76], что шероховатость поверхности увеличивает скорость распространения пламени вблизи поверхности нагрева. Аналогичный результат установлен в [77–79] при исследовании влияния шероховатости поверхностей металлов на характеристики зажигания капель ОБУТ при их взаимодействии с нагретой поверхностью в условиях кондуктивного и смешанного (кондуктивного, конвективного и радиационного) подвода тепловой энергии. Форма пламени зависит от шероховатости поверхности, на которой горит капля ОБУТ [78]. На гладких (полированных) поверхностях пламя вытянуто в вертикальном направлении. Чем больше шероховатость поверхности нагрева, тем пламя более вытянуто вдоль горизонтального направления вследствие более высокой скорости движения продуктов диспергирования вблизи этой поверхности [78]. Также известно [77–79], что управлять временем зажигания и временем выгорания можно изменяя шероховатость поверхности. Лазерная обработка является наиболее перспективным способом модификации поверхностей нагрева с целью

управления характеристиками горения капель ОВУТ, так как позволяет контролировать время зажигания и время выгорания в широком диапазоне значений, а также способствует значительному снижению осаждения твердых продуктов горения топлива на поверхности стали [79]. В известных исследованиях [77–79] по изучению влияния шероховатости поверхностей металлов на характеристики зажигания и горения жидких видов топлива, текстура формировалась двумя способами – обработки абразивными материалами и лазерным излучением. Стоит отметить, что модификация поверхностного слоя металлов [77–79] осуществлялась без изменения конфигурации текстуры, то есть без создания на поверхности регулярных текстур в форме, например, упорядоченных микроканалов, микростолбиков или кратеров [80,81].

1.2 Условия и характеристики микровзрывного диспергирования

Проблема негативного воздействия на окружающую среду продуктов горения ископаемых топлив может быть решена путем использования на практике композиционных многокомпонентных топливных смесей. Последние могут быть приготовлены в виде гелеобразных топлив [82], эмульсий [83] или суспензий [84], содержащих низкосортные твердые топлива, отходы углеобогащения, нефтепереработки и воды. По сравнению с ископаемыми топливами, композиционные топлива характеризуются повышенными экологическими характеристиками дымовых газов по причине содержания в топливных смесях воды и влияния ее паров на химические реакции, протекающие при газофазном горении.

При зажигании и горении капель топлив, широко используемых на практике (бензин, керосин, спирт), реализуется достаточно хорошо изученный процесс фазового перехода в режимах испарения или кипения горючей жидкости. Зажигание и горение многокомпонентных топлив при определенных условиях происходит в условиях диспергирования капель (вторичного дробления капель). Последнее известно под терминами паффинг и микровзрыв [23–25]. Суть этих

процессов состоит во вторичном дроблении жидких топлив, способствующем увеличению в несколько раз площади испарения компонентов и размеров области их выгорания, что значительно интенсифицирует процессы зажигания и горения, а также увеличивает полноту выгорания топлива. *Паффинг* характеризуется распадом капли на относительно крупные фрагменты. Tsue et al. [23] и Watanbe et al. [24] под паффингом понимали процесс истечения струи пара с поверхности капли топлива. *Микровзрыв* двухкомпонентной капли, например, вода и горючая жидкость, характеризуется взрывным дроблением капли с образованием аэрозоля [25] известное также, как и вторичное распыление [31].

Стабильный процесс микровзрывного вскипания или паффинга происходит в случае, когда «низкокипящий» компонент (как правило, вода) находится внутри «высококипящего» компонента (например, масла) [32]. То есть капля воды покрывается оболочкой масла. Механизм распада капель (паффинг и микровзрыв) объясняют [85] ростом температуры на границе раздела «низкокипящего» и «высококипящего» компонентов, до температуры кипения «низкокипящего» компонента, например, 100–120 °С для воды [33,34]. Распад в значительной степени зависит от разницы между температурами кипения масла и воды [35]. Известно, что, если размер двухкомпонентных капель будет мал, то их испарение может быть недостаточно сильным для разрушения масляной фазы и реализации микровзрыва [35]. В таком случае реализуется режим паффинга [24,36]. Однако, в [26–29,32,34,37] авторы показали, что даже частичная коалесценция может привести к микровзрыву. Установлено [25], что процессы паффинга и микровзрыва реализуются при кондуктивном нагреве и тепловых потоках высокой плотности для двухкомпонентных капель (вода и масло), суспензий, эмульсий и растворов. При конвективном нагреве такой эффект достигался только с добавлением горючего компонента (масла) и твердых составляющих [25]. При радиационном нагреве распад капли происходит с образованием мелкодисперсного аэрозоля и тумана (микровзрыв), либо капля монотонно испаряется (при относительно малых значениях плотности подведенного лучистого теплового потока) [25]. Режим паффинга не установлен в

опытах с радиационным нагревом [25]. В [30] получены диапазоны температур воздуха при конвективном нагреве, в которых реализуется тот или иной механизм: от 300 °С до 350 °С – паффинг, выше 400 °С – микровзрыв двухкомпонентной капли. При этом площадь поверхности испарения жидких топлив увеличивалась более чем в 100 раз [86]. Также известны исследования паффинг and микровзрыв гелеобразных топлив на основе керосина [87] и диметилгидразина [88].

Анализ публикаций [23,24,33–37,25–32], посвященных диспергированию топлив, показал, что его интенсивность зависит от большого числа факторов, таких как способ подвода теплоты (кондуктивный, конвективный, радиационный), температура среды, концентрация компонентов в составе суспензий, эмульсий, растворов, свойства компонентов и их соотношение в смеси (твердые частицы, горючая жидкость, вода, поверхностно-активные вещества), размеры капель, условия их формирования, определяющие как структуру капли (горючая жидкость является оболочкой, вода ядром, и наоборот), так и расположение капли в пространстве («сидячая» на поверхности, «висячая» на подвеске, летящая в потоке газа). В реальных условиях, на характеристики диспергирования многокомпонентных топлив оказывает влияние совокупность перечисленных выше факторов. Поэтому при изменении условий зажигания и горения таких топлив, отдельные факторы из вышеперечисленных при их совокупном влиянии на процесс диспергирования, могут оказывать как положительный эффект, так и ослаблять его влияние. Результаты [39–41] позволяют выделить механизм диспергирования, который в обобщенной форме сводится к разрушению паровых пузырей, но не позволяют определить причины, особенности и масштабы протекания этого эффекта при зажигании и горении топливных смесей. Также стоит отметить, что компонентная база исследованных в [42] топлив достаточно ограничена и представлена в основном углями (каменные, бурые), горючими жидкостями (керосин, мазут, различные виды масел) и одной не горючей жидкостью (водой), которые являются самостоятельными технологическими энергоресурсами, широко используемыми

на практике. Не разработаны основные положения теории, применимые на практике для прогнозирования гарантированного протекания диспергирования капель, в том числе топливных композиций произвольного компонентного состава.

1.3 Сдвиг кризиса кипения второго рода в область более высоких температур

За последнее десятилетие разработаны и внедрены в производство новые, высокотехнологичные, энерго- и ресурсосберегающие технологии, базирующиеся на фазовом переходе (испарении) малых объемов жидкостей (капель, тонких пленок жидкостей толщиной до 100 мкм) и превосходящие по характеристикам традиционные технологии, использующие большие объемы теплоносителей. Примерами таких технологий являются «лаборатория на чипе» [89,90], микрофлюидное охлаждение микропроцессоров [91], системы охлаждения на базе капельного орошения [4]. Известно [93–95] что процесс испарения капли, лежащей на поверхности, зависит от давления и влажности окружающей среды, температуры и свойств смачиваемости поверхности, наличия поверхностно-активных веществ. При подводе к теплоносителю тепловых потоков высокой плотности возникает кризис теплообмена, для капель широко известен как “эффект Лейденфроста” [96]. Последний является частным случаем пленочного кипения [97]. Капля жидкости, соприкасаясь с твердой поверхностью, температура которой значительно выше температуры кипения этой жидкости, образует между поверхностью и жидкостью теплоизолирующий слой (“паровую подушку” [77]), характеризующийся высоким термическим сопротивлением. Температура поверхности теплонагруженного оборудования в таких случаях будет повышаться, что может привести к термическому разрушению теплопередающей поверхности и аварии охлаждаемого устройства.

Эффект Лейденфроста характеризуется продолжительным временем жизни капли в сравнении с состоянием интенсивного испарения и кипения капли

на твердой поверхности [98]. Последнее обусловлено тем, что “паровая подушка” характеризуется высоким термическим сопротивлением, и как следствие, её образование уменьшает теплоотдачу от нагретой поверхности к капле. Кроме того, зарождение паровых пузырей в капле предотвращается из-за отсутствия контакта с твердым телом. Капля в состоянии Лейденфроста характеризуется геометрической формой близкой к сфере или “фасоли” [99], а также характеризуется высокой скоростью перемещения по поверхности [100,101].

Условия реализации эффекта Лейденфроста зависят от: химического состава и текстуры поверхности, ее свободной поверхностной энергии, теплофизических свойств жидкости и твердого тела [102,103]. На сегодняшний день не установлено, какой из факторов является доминирующим. Эффект Лейденфроста является межфазным явлением. По этой причине он, в первую очередь, зависит от химических (элементного состава) и топографических свойств поверхности (вида текстуры и шероховатости) [104–106]. Известно [105–109], что на гидрофильных поверхностях, смещение температуры возникновения эффекта Лейденфроста в область более высоких температур не превышает 30 °С. Гидрофобизация поверхностей приводит к уменьшению температуры возникновения эффекта Лейденфроста не более чем на 100 °С. Также известно [105,110], что изменение топографических свойств путем формирования текстур в виде микростолбиков или разноуровневой (микро- наноразмерной) шероховатости приводит к росту температуры возникновения эффекта Лейденфроста от 45 до 94 °С.

Лазерная обработка поверхностей металлов позволяет формировать текстуру [78], шероховатость [79] и свойства смачиваемости [82,111] в широких диапазонах варьирования заданных характеристик. Исследования по возникновению эффекта Лейденфроста на модифицированных лазерным излучением поверхностях металлов позволят расширить область практического применения на производстве технологий капельного орошения. В настоящее время известные результаты [112] не позволяют прогнозировать условия возникновения эффекта Лейденфроста на специально модифицированных

лазерным излучением теплопередающих поверхностях. Кроме того, результаты [113–117] получены с использованием лазерных технологий обработки поверхностей, базирующихся на пико- и фемтосекундной длительности лазерного излучения. Последние по сравнению с установками лазерного излучения наносекундной длительности при внедрении в промышленное производство часто являются финансово необоснованными технологиями генерации целевых, функциональных поверхностных свойств металлов.

1.4 Системы охлаждения на базе двухфазных термосифонов

В активной зоне реактора (в твэлах) выделяется порядка 90-95% тепловой мощности реактора. Поэтому для обеспечения его нормальной работы необходимо охлаждать твэлы. Теплота обычно отводится омываемой поверхностью оболочек твэлов теплоносителем. Жидкометаллические теплоносители высоко окисляемы и пожароопасны, а присутствующие в них примеси приводят к отложениям на поверхностях теплообменника [118], поэтому наиболее распространенными теплоносителями являются водные растворы.

В реакторе с кипящими водными растворами температура оболочки твэлов может достигать 319 °С, а в реакторе под давлением 340 °С [119]. Твэл АЭС Shippingport выдерживает максимальную температуру на внешней поверхности 350 °С. Во время эксплуатации реактора с целью достижения безопасного режима его работы необходимо при разработке твэлов уделить должное внимание выбору материалов, из которых они изготавливаются (взаимодействие с топливом и замедлителем, допустимый температурный режим и др.). Например, твэлы некоторых исследовательских и энергетических реакторов (Shippingport-2, EBWR) в оболочке из циркония омываются теплоносителем с температурой 255 - 295 °С, для твэлов в оболочке из нержавеющей стали (реакторы SM-1, PM-2A, ЕОСТ, VBWR) температура теплоносителя находится в диапазоне 230 – 285 °С, для твэлов в оболочке из сплава алюминия с никелем температура теплоносителя

достигает 215 °C (реактор SL-1), а в некоторых случаях не превышает 100 °C (реакторы CM-2 и HFTR) [119].

Широкое распространение, главным образом в США, получили пластинчатые твэлы типа MTR. Известны [120] реакторы для инженерных испытаний (ETR). Реактор ETR является усовершенствованной модификацией реактора для материаловедческих исследований MTR и предназначен для технических испытаний – создания условий, необходимых для полномасштабных испытаний тепловыделяющих элементов теплоносителей и конструктивных материалов. Тепловыделяющими элементами в таких реакторах являются не трубчатые твэлы, а плоские пластинчатые твэлы, собранные в кассеты. Горючее в таких реакторах – обогащенный уран. Теплоноситель входит в реактор с температурой 43,5 °C, а выходит с температурой 59 °C. Максимальная температура поверхности тепловыделяющего элемента достигает 138 °C. Несмотря на невысокие температуры (<150 °C) известны [121] аварии на таких реакторах. Например, в 1954 году в штате Айдахо (США) на реакторе «БОРАКС-1», состоящем из 28 топливных элементов типа MTR с легководным замедлителем, возник всплеск мощности и связанный с ним паровой взрыв, который разрушил активную зону реактора. Силы взрыва было достаточно, чтобы оторвать механизм управления регулирующим стержнем весом 1 тонну и подбросить его в воздух почти на 10 метров. На установке RA-2 в Аргентине в 1983 г. использовались пластины MTR. Всплеск мощности унес 1 человеческую жизнь, два оператора получили значительные (15 рад нейтронного и 20 рад гамма-излучения) дозы облучения.

Твэлы должны быть приспособлены к аварийным режимам эксплуатации реактора, например, при внезапных всплесках мощности, повреждении насосных установок или потери теплоносителя. Одним из решений терморегулирования ядерных энергетических установок является система охлаждения на базе термосифонов. Теплоносителем в термосифоне может являться дистиллированная вода, как и применяющийся замедлитель на установке RA-2. Однако известно [122], что вода не может использоваться в качестве рабочей жидкости в

термосифоне в температурном диапазоне (300 – 400 °C) из-за предела затопления «Flooding limit». Температура поверхности ТВЭЛОВ в низкоэнергетических реакторов типа CM-2, SL-1, HFTR с пластинчатыми ТВЭлами не превышает 215 °C.

На сегодняшний день исследованию процессов тепломассопереноса в термосифонах (ТС) посвящено значительное количество работ. Установлены [123–126] корреляции по прогнозированию критической плотности теплового потока и условия интенсификации процесса теплообмена в испарительной части ТС. Экспериментально и численно определены [127–130] температуры в характерных точках слоя теплоносителя на нижней крышке ТС и паровом канале. Сформулированы гипотезы [131–133] о механизме возникновения флуктуаций температур теплоносителя в жидком и газообразном состоянии в термосифоне. Установлены [134] факторы, приводящие к аварийному режиму работы ТС, соответствующему полному испарению теплоносителя в испарительной части. Выделены [135–138] режимы (кольцевой, пузырьковый, снарядный) движения двухфазного теплоносителя в вертикальных каналах. Установлено [139–142] влияние ряда факторов (подводимый тепловой поток, угол наклона, степень заполнения) на основные характеристики (термическое сопротивление, коэффициент теплоотдачи от поверхности нагрева к теплоносителю) процессов тепломассопереноса. На основе обобщения результатов [123–142] можно сделать вывод, что большинство исследований направлено на анализ процессов, происходящих в термосифонах, с целью повышения их производительности. Эти исследования условно можно разделить на две основные группы по подходам: выбор теплоносителя с лучшими теплофизическими свойствами [143–146] и модификация конструкции термосифона [147–149]. Установлено, что использование в термосифоне бинарных смесей и наножидкостей, которым уделено большое внимание в последние годы [150–153], позволяет достичь низкого термического сопротивления (эффективность работы таких устройств повышается). При втором подходе увеличивают интенсивность теплообмена в зонах теплоподвода и теплоотвода путем, в первую очередь, оребрения их

внешней поверхности [154–158]. Исследований, направленных на определение условий, способствующих росту теплопередающих характеристик термосифонов путем модификации их внутренних поверхностей, мало [159–161].

В термосифоне теплоноситель циркулирует в виде капель и пленок жидкости, поэтому свойства смачиваемости внутренней поверхности (гидрофильные, гидрофобные, комбинированные) играют решающую роль в увеличении интенсивности тепломассопереноса в условиях испарения и кипения слоя жидкости на нижней крышке и конденсации (например, гидрофобные поверхности способствуют процессу капельной конденсации) на верхней крышке ТС. Физико-химическое взаимодействие жидкостей с поверхностями твердых тел в различных комбинациях жидкой и твердой фаз является активным объектом исследований [48–50]. Большинство таких исследований проведено при анализе основных характеристик «сидячих» [51,52] на горизонтальных поверхностях капель и стекающих вертикальных пленок жидкости [53,54] из-за относительной простоты таких экспериментов. Установлено, что тонкий слой жидкости создает тепловое сопротивление, снижающее интенсивность тепломассопереноса, а образование капель приводит к росту теплопередающих характеристик (коэффициент теплоотдачи в таких условиях в несколько раз выше, чем при переносе теплоты через пленку жидкости). Анализ исследований [55–63] показал, что изменение свойств смачиваемости возможно разными способами (спекание, нанесение пленок сублимирующихся материалов, нанесение гидрофобных агентов, травление, электроосаждение наночастиц, химическое осаждение углеродных нанотрубок и др.) Наиболее перспективным способом обработки металлических поверхностей, придающим поверхности различные (гидрофобные и гидрофильные) свойства, является лазерная обработка, [111] так как это относительно простой технологический процесс, который легко применим для деталей сложной конструкции. Варьируя параметрами лазерного луча можно изменять шероховатость приповерхностного слоя, получая различные текстуры, которые мало подвержены деградации и старению [64–67].

Но до настоящего времени не установлены основные закономерности и характеристики процессов тепломассопереноса и гидромеханики в термосифонах, внутренняя поверхность которых текстурирована лазерным излучением [68,69]. Не установлено влияние текстуры внутренних поверхностей термосифона, полученной после импульсной наносекундной лазерной обработки, на условия возникновения процесса кипения и конденсации теплоносителя в ТС. Не установлены особенности механизмов пространственного тепломассопереноса и гидромеханики в термосифонах с внутренними текстурированными (импульсным лазером) поверхностями нижней и верхней крышек в условиях тепловых потоков высокой плотности, характерных для элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах. Отсутствует методика проведения экспериментальных и теоретических исследований основных закономерностей процессов тепломассопереноса в термосифоне, к испарительной части которого подведен тепловой поток высокой плотности, соответствующий аварийным условиям работы ЯЭУ, а на внутренних поверхностях нижней и верхней крышек ТС нанесена текстура. Такие исследования с визуальным наблюдением процессов, происходящих в испарительной и конденсационной частях позволят более детально изучить процессы внутри термосифона и обосновать возможность охлаждения теплонагруженных элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах автономными (не связанными с источниками электроснабжения) системами охлаждения на базе термосифонов с внутренними текстурированными поверхностями нижней и верхней крышек.

Выводы по главе 1

1. Исследования процессов горения композитных жидких топлив направлены на разработку процедуры приготовления, получение оптимального состава, исследование механизмов и характеристик зажигания и горения. В настоящее время для перспективных видов композитных топлив и традиционных не изучено влияние характеристик поверхностей нагрева, в частности

шероховатости и конфигурации текстуры, на характеристики зажигания и горения, шлакования на уровне, позволяющим сформулировать практические рекомендации к текстуре поверхностей теплообмена котельных установок.

2. Результаты исследования процессов вторичного измельчения капель (широко известного под терминами паффинг и микровзрыв) позволяют установить механизм диспергирования, который в обобщенной форме сводится к разрушению паровых пузырей, но не позволяют определить причины, особенности и масштабы этого эффекта при зажигании и горении топливных смесей. Необходимо отметить, что компонентная база исследованных топлив достаточно ограничена и представлена в основном углями (каменные, бурые), горючими жидкостями (керосин, мазут, различные виды масел) и одной не горючей жидкостью (водой), которые являются самостоятельными технологическими энергоресурсами, широко используемыми на практике. Не разработаны основные положения теории, которую можно было бы применять на практике для прогнозирования гарантированного протекания диспергирования капель, в том числе топливных композиций произвольного компонентного состава.

3. Разработка принципиально новых стратегий и технических решений, приводящих к повышению энергоэффективности и ресурсосбережения систем охлаждения энергонасыщенного оборудования невозможна без создания теории модификации поверхностей материалов теплообменников с целевыми функциональными свойствами. К перспективным системам охлаждения, относятся системы, базирующийся на капельном охлаждении. Такое охлаждение позволяет повысить интенсивность и равномерность теплоотвода, значительно снизить расход теплоносителя. Но полученные к настоящему времени результаты показывают, что использование традиционных подходов (применение элементов систем охлаждения, изготовленных из стали, меди, алюминия и их сплавов, обработанных шлифовкой или полировкой) не позволяют решить задачу интенсивного охлаждения поверхностей, нагретых до высоких температур. Лазерные методы обработки теплопередающих поверхностей – один из наиболее эффективных способов интенсификации процессов испарения и кипения.

Использование на практике модифицированных лазерным излучением теплопередающих поверхностей систем охлаждения может решить ряд проблем, связанных с удовлетворением растущего глобального спроса на энергетические ресурсы, в частности, при интенсификации процессов отвода тепловых потоков высокой плотности от элементов энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур.

4. Из анализа информации в международных авторитетных периодических изданиях следует, что до настоящего времени не проводилось экспериментальных исследований тепломассопереноса и гидромеханики в термосифонах с внутренними поверхностями модифицированными лазерным излучением наносекундной длительности в условиях тепловых потоков, характерных для элементов конструкции ядерных энергетических установок в аварийных режимах. Не известно влияние текстуры (шероховатости) внутренних поверхностей нижней и верхней крышек термосифона и свойств смачиваемости на условия возникновения процессов кипения и конденсации теплоносителя в термосифоне при тепловых потоках, характерных для элементов конструкции ядерных энергетических установок в аварийных режимах.

ГЛАВА 2. ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В главе приведено описание разработанных экспериментальных стендов, полученных результатов и выводы по влиянию конфигурации текстуры в виде микроканалов на характеристики зажигания и горения капель композиционного топлива, эмульсии и масла в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме запуска (смешанный подвод теплоты к капле (конвекцией, излучением и кондукцией)) и в режиме номинальной работы оборудования (преимущественно кондуктивный прогрев капли топлива при ее взаимодействии с поверхностью).

2.1 Экспериментальные установки и методы исследования

2.1.1 Методика формирования текстур на поверхности стали

Известно [162], что основным широко распространенным материалом для изготовления внутренних поверхностей нагрева энергогенерирующего оборудования (двигателей внутреннего сгорания, топок котлов) являются жаропрочные, жаростойкие стали. По этой причине в качестве материала для изготовления экспериментальных образцов поверхностей нагрева выбрана сталь стандарта DIN марки X16CrNi25-20. Эта сталь характеризуется высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью и жаростойкостью, устойчива к межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур. Пластины стали X16CrNi25-20 шириной 30 мм, длиной 30 мм и толщиной 2 мм использовались в экспериментах по зажиганию топлив в условиях смешанного подвода теплоты. Пластины шириной 10 мм, длиной 10 мм и толщиной 2 мм использовались в экспериментах по зажиганию топлив в условиях индукционного подвода теплоты.

В проведенных экспериментальных исследованиях на поверхностях стали X16CrNi25-20 формировались четыре различных вида текстуры. Из них одна

серия поверхностей с условным обозначением Р обрабатывалась механическим способом – полировкой абразивными материалами до зеркального блеска. Процедура полировки выполнялась в рамках методики [163,164]. Хорошо апробированным методом модификации текстур лазерным излучением наносекундной длительности на поверхностях стали X16CrNi25-20 с условным обозначением АВ, А2В, 2АВ формировалась уникальная конфигурация текстур в виде параллельных микроканалов. Лазерная обработка поверхностей стали проводилась при постоянных значениях следующих параметров: длина волны 1064 нм, длительность 120 нс, частота 110 кГц, энергия в импульсе 0,43 мДж, скорость перемещения луча 180 мм/с, десятикратное прохождение луча по поверхности. Импульс в моде TEM_{00} фокусировался на поверхностях стали в пятно диаметром 40 мкм.

Для создания текстуры с необходимыми характеристиками необходимо знать геометрические размеры абляционного кратера, формируемого в результате однократного воздействия лазерного импульса на поверхность металла. Размеры абляционного кратера, сформированного на поверхности металла, зависят от характеристик генерируемого лазерного луча, а также от оптических и теплофизических свойств металла [165]. По результатам специально проведенных экспериментов установлено, что при вышеприведенных характеристиках лазерного импульса на полированной до зеркального блеска поверхности стали марки X16CrNi25-20 формируется абляционный кратер диаметром $65,3 \pm 0,4$ мкм (рис. 2.1). Случайная погрешность определения диаметра кратера не превышала 0,5%.

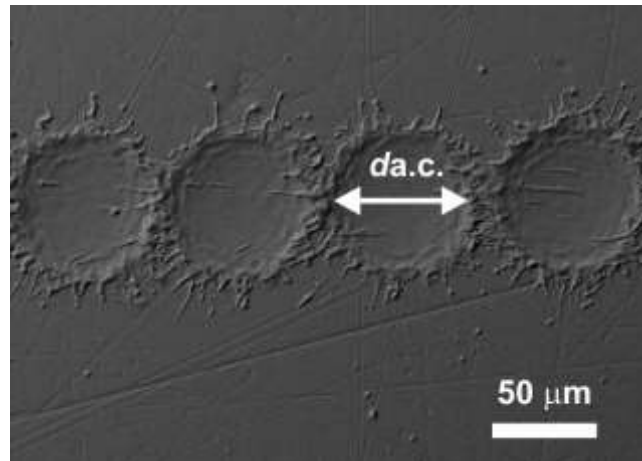
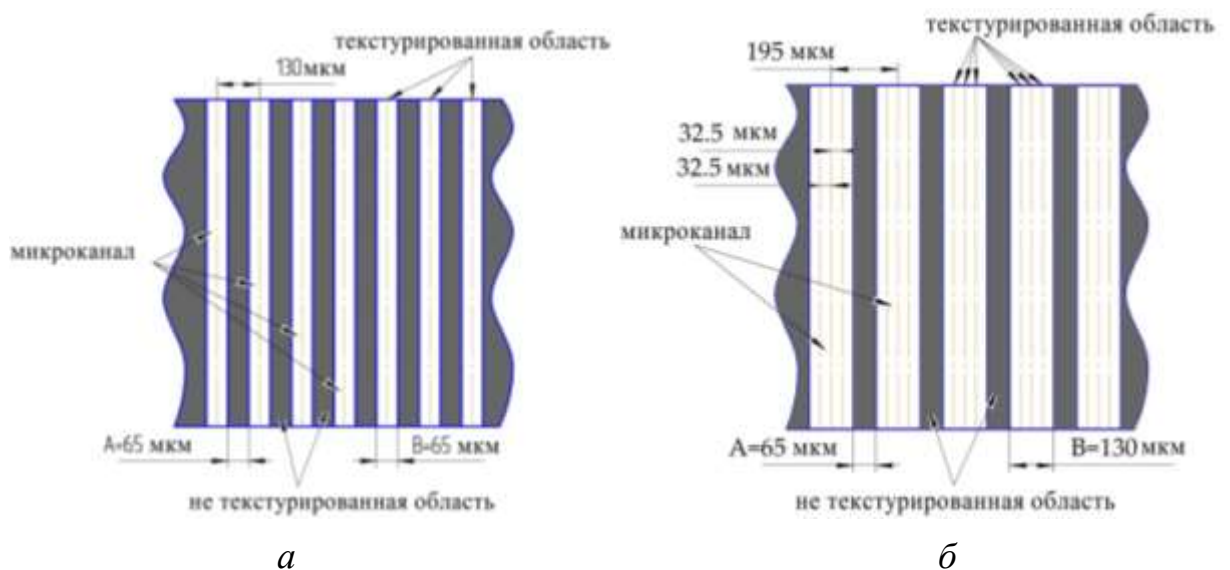
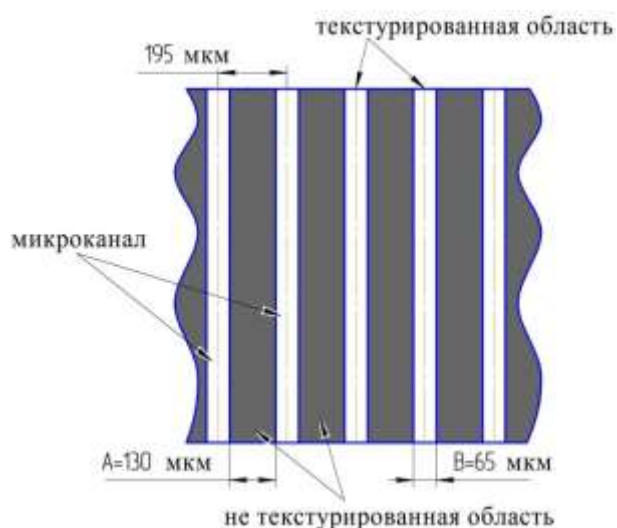


Рисунок 2.1 – SEM-изображение абляционных кратеров, сформированных в результате однократного воздействия лазерного импульса на поверхность стали марки X16CrNi25-20. Параметры лазерного импульса: длина волны 1064 нм, длительность 120 нс, частота 110 кГц, энергия в импульсе 0,43 мДж [166]

На рисунке 2.2 представлены схематично изображения конфигурации текстур в виде параллельных микроканалов, принятые на стадии планирования экспериментов. В условных обозначениях поверхностей АВ, А2В и 2АВ (рис. 2.2) под А понимается ширина локальной области поверхности, не обработанной лазерным излучением. Под В понимается ширина локальной области поверхности, обработанной лазерным излучением.





в

$a - AB$, $b - A2B$, $в - 2AB$, A – ширина локальной области поверхности, не обработанная лазерным излучением, B – ширина локальной области поверхности, обработанной лазерным излучением

Рисунок 2.2 – Схематичные изображения конфигурации текстуры поверхностей

На поверхностях AB (рис. 2.2а) принято расстояние между траекториями движения лазерного луча 130 мкм. При частоте генерируемого импульса 110 кГц, скорости перемещения луча по поверхности 180 мм/с и формировании абляционного кратера диаметром $d_{a.c.} = 65,3 \pm 0,4$ мкм наложение абляционных кратеров, формируемых по траектории движения луча, составляет $k_{a.c.} \approx 97,5\%$ ($k_{a.c.} = (1 - x) \cdot 100\%$; где x – относительное расстояние между центрами абляционных кратеров. $x = v/(v \cdot d_{a.c.})$). В таких условиях обработки лазерным излучением на поверхности стали марки X16CrNi25-20 по траектории движения луча формируется микроканал шириной, равной диаметру абляционного кратера (около 65 мкм).

На поверхностях $A2B$ (рис. 2.2б) ширина текстурированной локальной области поверхности (130 мкм) принята в два раза больше ширины нетекстурированной части поверхности (65 мкм). Для получения микроканала шириной 130 мкм в локальной области текстурированной части поверхности

предусмотрено прохождение луча по трем параллельным траекториями с расстоянием между траекториями луча $\approx 32,5$ мкм.

Текстура поверхностей 2AB (рис. 1в) принята с расстоянием между траекториями движения луча 195 мкм. В таких условиях обработки лазерным излучением ширина микроканала составляет 65 мкм, а ширина нетекстурированной части 130 мкм.

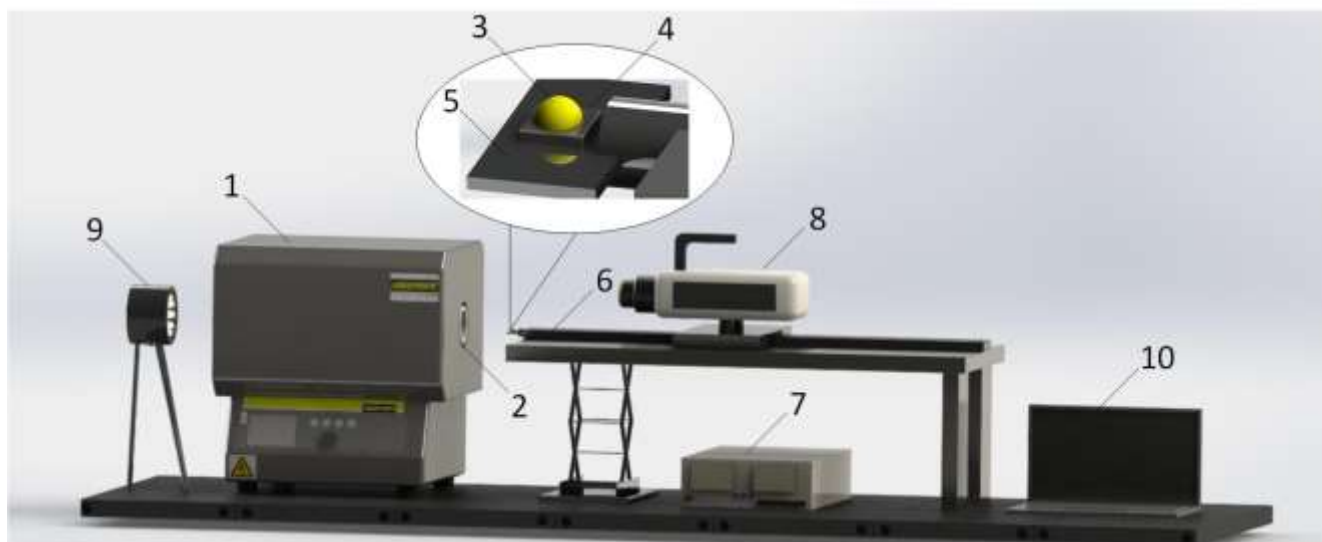
После процедуры модификации текстуры механическим (полировка) и бесконтактным способом (лазерным излучением) поверхности пластин стали очищались в ультразвуковой ванне последовательно в среде C_3H_8O и в ультрачистой воде.

2.1.2 Методы и оборудование для исследования конфигурации текстур поверхностей стали

SEM-изображения текстур, модифицированных механическим способом и лазерным излучением, получены с помощью микроскопа Hitachi S-3400N (Hitachi, Япония). Геометрические характеристики текстур определены методом профилометрии с использованием оборудования Micro Measure 3D station (STIL, Франция). На поверхности стали произвольно выбиралось три участка. Сканирование проводилось на области 800×800 мкм с шагом сканирования 0,1 мкм. По результатам усредненных по трем измерениям полученных данных определялись геометрические характеристики микроканалов, а также трехмерные параметры шероховатости на отдельных локальных участках поверхности. Согласно рекомендациям [167] анализ шероховатости поверхностей стали проводился на основе оценки амплитудных параметров S_a и S_z и гибридного- S_{dr} . Погрешность определения геометрических характеристик микроканалов и 3D-параметров шероховатости не превышала 10,5%.

2.1.3 Экспериментальный стенд для исследования процессов зажигания и горения капель композиционных топлив на текстурированных поверхностях

На рисунке 2,3 приведена схема экспериментального стенда, воспроизводящего условия смешанного механизма подвода теплоты от поверхности нагрева энергогенерирующего оборудования к капле топлива. Смешанный механизм подвода теплоты (конвективный, лучистый и кондуктивный) реализовывался в трубчатой муфельной печи 1. Температура воздушной среды $T_e = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в полости керамической трубки печи 2 соответствовала температуре в топке современного энергогенерирующего оборудования.



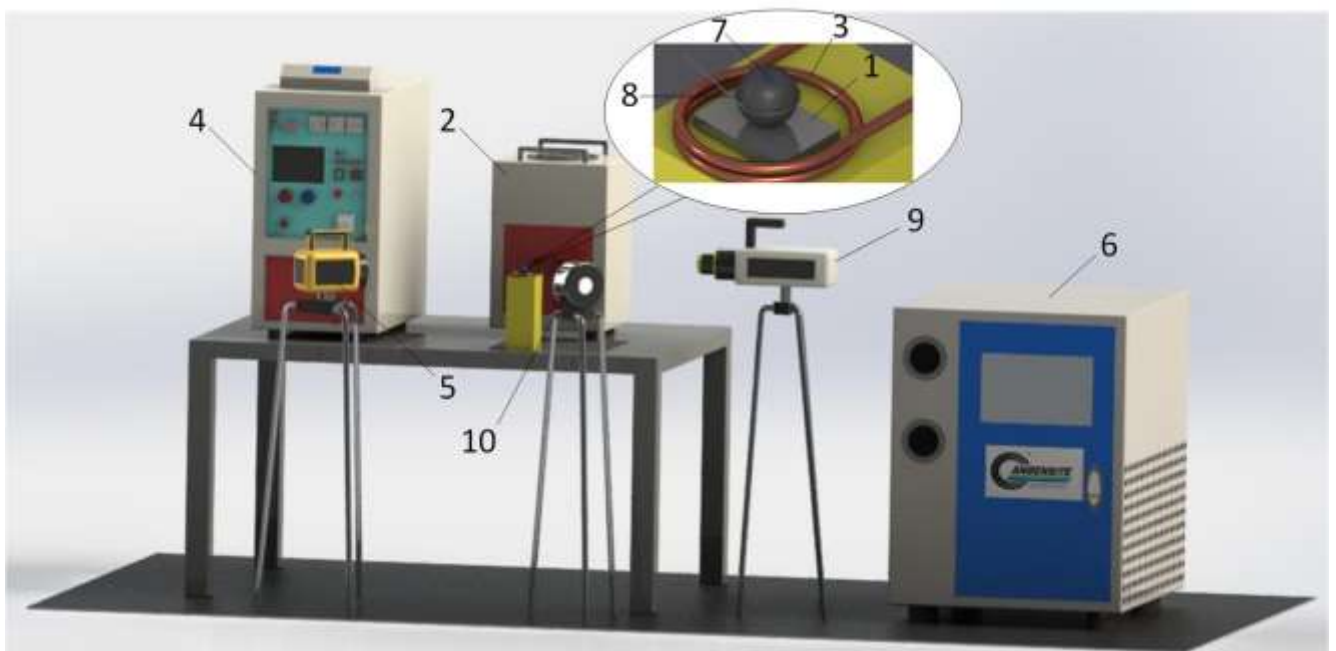
1 – трубчатая муфельная печь, 2 – керамическая трубка, 3 – капля топлива, 4 – поверхность стали, 5 – штатив, 6 – координатный механизм, 7 – блок управления координатным механизмом, 8 – высокоскоростная камера, 9 – прожектор, 10 – персональный компьютер

Рисунок 2.3 – Схема экспериментального стенда смешанного подвода теплоты к капле топлива [166]

Капля топлива 3 (эмульсии, суспензии или масла) объемом 10 мкл дозировалась на поверхность пластины стали 4 марки X16CrNi25-20, размещенной на штативе 5 высокоточного координатного механизма 6 с

автоматическим блоком управления 7. Температура топлива и поверхности соответствовали температуре окружающей среды в лаборатории ($22 - 24\text{ }^{\circ}\text{C}$). После дозирования капли топлива на поверхность стали они вводилась координатным механизмом в полость предварительно прогретой муфельной печи. Процессы зажигания и горения капли топлива регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры 8. Для обеспечения контрастности регистрируемого изображения использовался прожектор 9. Полученные видеокadres обрабатывались в программном обеспечении Tema Automotive и Phantom Camera Control на персональном компьютере 10.

На рисунке 2.4 приведена модель экспериментального стенда, воспроизводящего условия кондуктивного механизма подвода теплоты от поверхности нагрева энергогенерирующего оборудования к капле топлива.



1 – модифицированная поверхность стали, 2 – электромагнитный индуктор, 3 – индукционная спираль, 4 – блок управления индуктором, 5 – тепловизионная видеокамера, 6 – чиллер, 7 – капля топлива, 8 – держатель, 9 – высокоскоростная видеокамера, 10 – прожектор

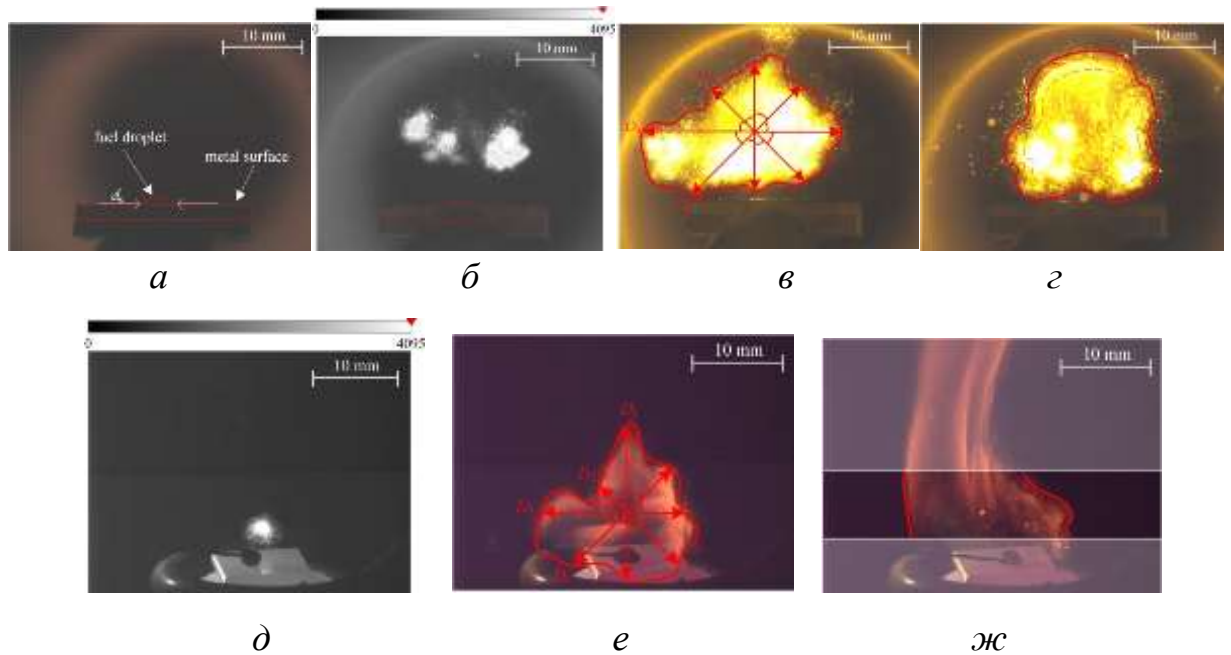
Рисунок 2.4 – Схема экспериментального стенда кондуктивного подвода теплоты к капле топлива

Пластина стали 1 марки X16CrNi25-20 с модифицированной поверхностью помещалась в рабочую область нагрева электромагнитного индуктора 2. Нагрев металла осуществлялся за счет токов Фуко, генерируемых переменным электромагнитным полем медной индукционной спирали 3 диаметром 8 мм. Электронный блок управления индуктором 4 позволял задавать характеристики генерируемого электромагнитного поля для нагрева металла, в частности поверхности стали, до температуры 950 °С. Ее контроль осуществлялся с помощью тепловизионной видеокамеры 5. Медная индукционная спираль охлаждалась водой с температурой около 10°С, охлаждаемой чиллером 6. Капля топлива 7 (эмульсии, суспензии или масла в обычном жидком состоянии) объемом 5 мкл размещалась на специальном держателе 8. Он использовался для предотвращения неконтролируемого движения капли вследствие образования парового зазора между каплей и поверхностью нагрева. Капля топлива на специальном держателе помещалась на нагретую поверхность стали. Видеорегистрация исследуемых процессов выполнялась высокоскоростной видеокамерой 9. Рабочая область нагрева освещалась прожектором 10. Эксперименты выполнены в условиях окружающей среды, соответствующим лабораторным.

2.1.4 Методики определения характеристик процессов зажигания и горения капель топлив

В условиях смешанного и кондуктивного механизма подвода теплоты от поверхности нагрева к капле топлива каждый эксперимент проводился при идентичных начальных условиях не менее пяти раз. Полученные видеозаписи исследуемых процессов зажигания и горения капель топлив обрабатывались в соответствии с ранее разработанными алгоритмами [168] с помощью программных обеспечений Tema Automotive и Phantom Camera Control. На рис. 2.5 приведены типичные кадры алгоритмов обработки видеозаписей. В экспериментах определялись основные характеристики зажигания и выгорания капель топлив: время задержки зажигания (τ_d) (рис. 2.5б, рис. 2.5д), максимальный

размер области выгорания топлива (D_{\max}) (рис. 2.5в, рис. 2.5е), число инициаций паффинга (N) (рис. 2.5г, рис. 2.5ж), время выгорания (τ_{burn}). В экспериментальных исследованиях при смешанном подводе теплоты дополнительно определялся контактный диаметр растекания капель топлив (d_s) (рис. 2.5а).



Характеристики в условиях смешанного механизма подвода теплоты: $а - d_s$, $б - \tau_d$, $в - D_{\max}$, $г - N$. Характеристики в условиях кондуктивного механизма подвода теплоты: $д - \tau_d$, $е - D_{\max}$, $ж - N$

Рисунок 2.5 – Типичные кадры видеозаписей алгоритмов обработки видеозаписей по определению характеристик зажигания и выгорания капель топлив [166]

Регистрация контактного диаметра растекания капель топлив (d_s) (рис. 2.5а) проводилась по прошествии 5 – 6 секунд после дозирования капли топлива на поверхность в условиях, соответствующих лабораторным. Такого промежутка времени было достаточно для достижения квазиравновесного состояния капли топлива на поверхности (уравновешивания суммы сил, действующих на каплю). Систематическая погрешность определения контактного диаметра растекания капель топлив, обусловленная разрешающей способностью высокоскоростной видеокамеры, не превышала 4%.

Время задержки зажигания (рис. 2.5б, рис. 2.5д) определялось по кадрам видеogramм в монохромной цветовой гамме. За момент начала отсчета времени зажигания принят момент помещения поверхности пластины стали с каплей топлива в заданную точку керамической трубки печи (в условиях смещенного механизма подвода теплоты (рис. 2.5б)) или помещения специального держателя с размещенной на ней каплей на поверхность пластины стали, предварительно нагретой до заданной температуры (в условиях кондуктивного механизма подвода теплоты (рис. 2.5д)). Момент зажигания считался окончанием отсчета времени, регистрировался по достижению значений яркости изображения более 220 единиц. Время выгорания топлив определялось по монохромным изображениям от начала зажигания до достижения значений яркости изображения менее 219 единиц по цветовой гамме. Случайная погрешность определения τ_d и τ_{burn} не превышала 10,5%.

Максимальный размер области выгорания топлива (рис. 2.5в, рис. 2.5е) определялся по цветным видеозаписям. На кадрах высокоскоростной видеозаписи автоматически контролировалась область выгорания (по контрасту изображения). По азимуту с шагом 45 градусов определялось значение ширины области выгорания. Максимальный размер области выгорания топлива определялся как среднеарифметическое значение четырех измерений ширины области выгорания. Случайная погрешность определения D_{max} не превышала 10,5%.

Число инициаций паффинга (рис. 2.5г, рис. 2.5ж) определялось по статистическим данным отделения фрагментов «дочерних» капель от «родительской» капли путем определения изменения характерного размера области выгорания. За число инициаций паффинга принималось значение положительных пиков изменения характерного размера области выгорания. Случайная погрешность определения N не превышала 7%.

2.1.5 Композиционное топливо

В проведенных экспериментах использовалось два состава композиционного топлива и отработанное машинное масло, входящее в состав

этих композиционных топлив. По классификации относительно агрегатного состояния один состав композиционного топлива относится к эмульсии, второй – к суспензии. Массовое содержание компонентов в топливных составах выбраны согласно известным рекомендациям [11], сформулированным на основе исследования антропогенного воздействия продуктов горения на окружающую среду. В частности, в [11] показано, что при расчетах антропогенных выбросов (CO_2 , NO_x , SO_x) на единицу выделившейся энергии композиционные топлива более экологичны по сравнению с отдельными горючими компонентами, входящими в их состав.

Состав топливной эмульсии: отработанное моторное масло (48% масс.), вода (48% масс.), эмульгатор TWIN 80 (4% масс.).

Состав топливной суспензии: отработанное моторное масло (35% масс.), вода (35% масс.), отход (фильтр-кек) обогащения каменного угля марки К (30% масс.).

В таблице 2.1 приведены основные характеристики компонентов топлив, установленные по стандартным методикам [169–171].

Таблица 2.1 – Характеристики компонентов композиционных топлив.

Компонент	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг
Моторное масло	0,28	0,78	10,2	44,00
Отход (фильтр-кек) обогащения каменного угля марки К	–	35,00	40,5	20,24

Топливная масляная эмульсия приготовлена по методике [172] в следующем порядке перемешивания компонентов (вода + масло) + эмульгатор. Вода и масло смешивались в условиях, соответствующих лабораторным (температура окружающей среды и компонентов 22 °С, атмосферное давление, относительная влажность 50 – 55%) с помощью магнитной мешалки AIBOTE ZNCLBS-2500 (Aibote Henan Science and Technology Development Company,

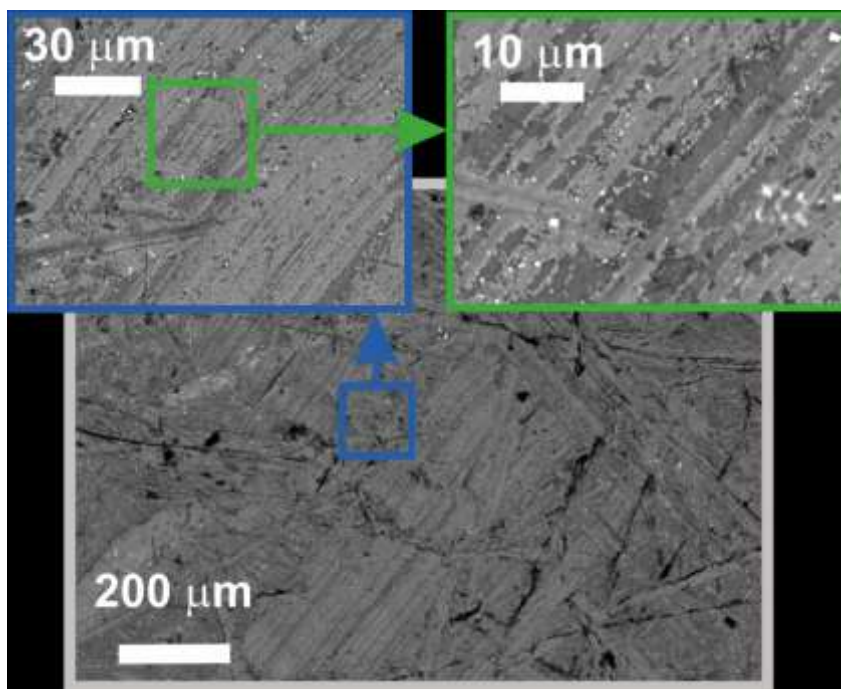
Сингапур). Смешение осуществлялась в течение 1 часа, при скорости вращения магнитного якоря 900 об/мин. Далее в полученную эмульсию через каждые 10 минут добавлялся эмульгатор (ПАВ) Tween® 80 (1% по массе) до достижения 4% от массы масляной эмульсии. При этом осуществлялось перемешивание смеси в магнитной мешалке со скоростью вращения магнитного якоря 900 об/мин. По окончании процедуры смешения трех компонентов эмульсия характеризовалась высокой седиментационной стабильностью.

Топливная суспензия приготавливалась по методике [79]. Последовательность основных этапов следующая. Отход (фильтр-кек) обогащения каменного угля марки К высушивался в инертной атмосфере при 103 °С в течение суток. Высушенный фильтр-кек просеивался через сито с размером ячеек 80 мкм. Таким образом размер частиц фильтр-кека (не более 80 мкм) соответствует типичным размерам частиц твердых натуральных топлив, сжигаемых в промышленных котлах. Суспензия получена путем перемешивания в условиях порционного добавления частиц фильтр-кека массой не более 0,1 мг к эмульсии отработанного моторного масла и воды. Эмульсия отработанного моторного масла и воды приготавливалась в соответствии с методикой описанной выше. Процедура перемешивания фильтр-кека и эмульсии осуществлялась в условиях, соответствующих лабораторным, в магнитной мешалке AIBOTE ZNCLBS-2500 в течение 1 часа при скорости вращения якоря 900 об/мин. Полученная топливная суспензия, как и эмульсия, характеризовалась относительно высокой седиментационной стабильностью. При проведении экспериментов визуально контролировалось отсутствие границы разделения компонентов топливной эмульсии и топливной суспензии.

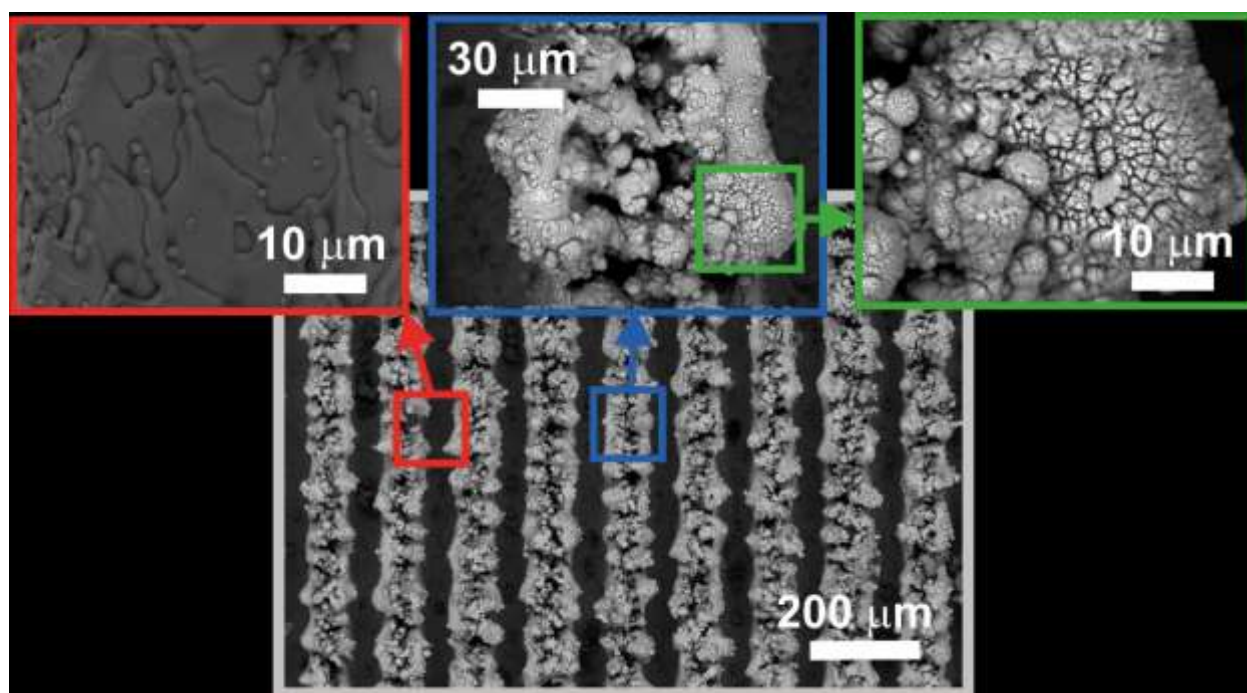
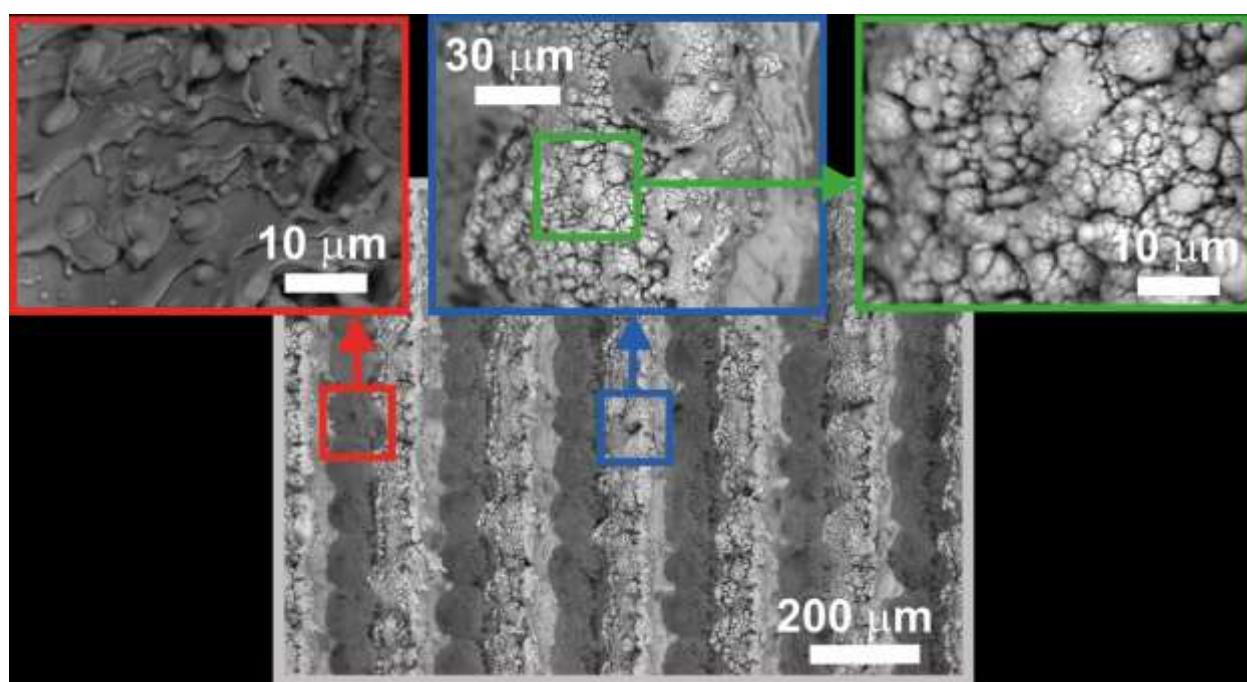
2.2 Результаты и обсуждение

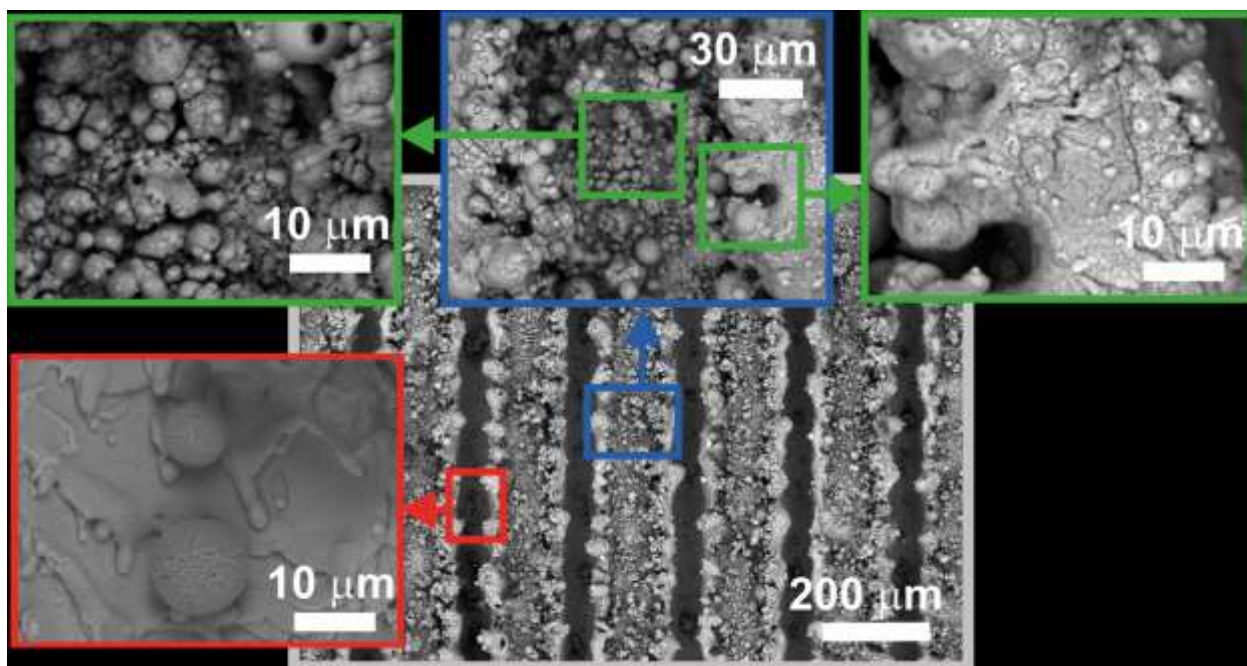
2.2.1 Анализ геометрических характеристик микроканалов и трехмерных параметров шероховатости

На рисунке 2.6 приведены типичные SEM-изображения поверхности стали марки X16CrNi25-20 после проведения экспериментов по исследованию процессов зажигания и горения капель суспензии. Необходимо отметить, что SEM-изображения на рис. 2.6 приведены после очистки поверхностей воздухом с давлением 10 бар. Такой способ очистки поверхностей нагрева энергогенерирующего оборудования часто применяется на практике.



a

*b**b*



г

а – полированная поверхность, *б* – конфигурация АВ, *в* – конфигурация А2В, *г* – конфигурация 2АВ

Рисунок 2.6 – Типичные СЭМ-изображения текстуры поверхностей стали марки X16CrNi25-20. В рамках серого цвета приведены СЭМ-изображения поверхностей среднего разрешения. В рамках красного цвета приведены СЭМ-изображения высокого разрешения локальных областей, обработанных лазерным излучением. В рамках синего и зеленого цветов приведены СЭМ-изображения высокого разрешения локальных областей, не обработанных лазерным излучением

В таблице 2.2 приведены значения 3D-параметров шероховатости, полученные методом оптической профилометрии. Для поверхностей АВ, А2В и 2АВ приведены значения 3D-параметров шероховатости, определенные в локальных областях, обработанных лазерным излучением (на рис. 2.6 эта область выделена рамкой красного цвета) и необработанных лазерным излучением (на рис. 2.6 эта область выделена рамкой синего цвета). Также в таблице 2.2 приведены значения 3D-параметров шероховатости поверхностей АВ, А2В и 2АВ, определенные на участках, содержащих области, обработанные и

необработанные лазерным излучением (на рис. 2.6 эта область выделена рамкой серого цвета).

Таблица 2.2 – Значения 3D-параметров шероховатости поверхностей стали.

Условное обозначение поверхности	Локальная область, не обработанная лазерным излучением			Локальная область, обработанная лазерным излучением		
	Sa, мкм	Sz, мкм	Sdr, %	Sa, мкм	Sz, мкм	Sdr, %
P	1,62	7	>1	-	-	-
AB	3,42	48	31	2,49	24	12
A2B	3,39	34	28	2,37	23	11
2AB	3,47	59	44	2,51	24	11
–	Усредненное значение 3D-параметров шероховатости на участках содержащих области, обработанные и не обработанные лазерным излучением					
	Sa, мкм		Sz, мкм		Sdr, %	
AB	8,28		171		104	
A2B	7,78		245		89	
2AB	8,05		172		127	

* На рис. 2.6 локальная область, обработанная лазерным излучением, выделена рамкой красного цвета; локальная область, не обработанная лазерным излучением, выделена рамкой синего цвета; усредненное значение 3D-параметров шероховатости на участках, содержащих области, обработанные и не обработанные лазерным излучением, выделены рамкой серого цвета.

По результатам анализа текстур (рис. 2.6) установлено, что дно микроканалов, сформированных лазерным излучением, состоит преимущественно из продуктов закристаллизовавшегося расплава металла в форме наложения пленок и капель. На дне микроканалов отсутствуют агломераты сконденсированных и закристаллизованных паров металла, образующихся после абляции, за исключением очень редко расположенных элементов в форме сфер размером 7 – 10 мкм (рис. 2.6г см. рамка красного цвета).

Сформулирована гипотеза о механизме формирования элементов в форме сфер на поверхностях металлов, обработанных лазерным излучением с энергией, достаточной для реализации процессов плавления и испарения. В условиях текстурирования поверхностей металлов лазерным излучением с энергией, достаточной для реализации процессов плавления и абляции материала, в области воздействия лазерного луча достигаются температуры около 3000 К [173]. В таких условиях в области воздействия лазерного луча выгорает весь кислород. При прекращении действия лазерного импульса кислород, содержащийся в окружающей среде, проникает внутрь расплава, незакристаллизовавшегося материала. Если расплав образуется в форме капель, то по мере насыщения капли расплава кислородом её размер увеличивается вследствие нагрева и реализации экзотермического теплового эффекта. Одновременно с этими процессами реализуется процесс кристаллизации с образованием элементов в форме сфер.

По результатам анализа текстур (рис. 2.6) также установлено, что текстура необработанных лазерным излучением участков поверхности вокруг зоны взаимодействия состоит из продуктов закристаллизованных паров металла. Последние образуются в результате абляции материала локальных областей, обработанных лазерным излучением. Сделан вывод о том, что при использовании лазерных методов формирования конфигурации текстуры на поверхностях стали марки X16CrNi25-20 в виде микроканалов шириной до 130 мкм и расстоянием между траекториями движения луча не более 195 мкм происходит модификация всей поверхности, в том числе обработанной её части за счет кристаллизации паров металла.

Известно [77,78], что характеристики процессов зажигания и горения капель топлив, взаимодействующих с поверхностью нагрева, зависят от площади межфазной поверхности “фрагмент (капля) топлива – поверхность нагрева”. Последняя тем больше, чем больше шероховатость. Для оценки прироста площади поверхности за счет текстуры используется 3D-параметр шероховатости S_{dr} . С ростом площади межфазной поверхности “топливо – поверхность нагрева” происходит интенсификация процессов теплообмена между каплями топлива и

поверхностью, что значительно влияет на процессы зажигания и горения топлив [77,78].

Из табл. 2.2 видно, что полировка абразивными материалами незначительно увеличивает площадь поверхности (параметр S_{dr} не превышает 1%). Формирование конфигурации текстуры лазерными методами обработки позволило увеличить площадь поверхности АВ на 104 % ($S_{dr} = 104$ (Табл. 2.2)), А2В на 89 % ($S_{dr} = 89\%$ (Табл. 2.2)) и 2АВ на 127 % ($S_{dr} = 127\%$ (Табл. 2.2)). Установлено (Табл. 2.2), что текстура дна микроканалов, сформированная закристаллизовавшимся расплавом металла, характеризуется незначительной шероховатостью по сравнению с текстурой, сформированной продуктами абляции. Значения параметров S_a и S_z , определённых на участках дна микроканалов, более чем в 1,3 – 1,4 (по оценке параметров S_a) и 1,5 – 2,5 раза меньше (по оценке параметров S_z) аналогичных характеристик текстур, сформированных продуктами абляции. Следовательно, значительный вклад в прирост площади поверхности на поверхностях АВ, А2В и 2АВ вносит текстура, образованная продуктами абляции на локальной необработанной лазером части поверхности. Значения параметров S_{dr} на этих областях составляют от 31 до 44 %.

В [77,78] установлено, что формирование текстуры на поверхностях металлов лазерными методами позволяет значительно уменьшить адгезию продуктов горения, несмотря на значительную шероховатость. По результатам анализа SEM-изображений поверхностей, предварительно прошедших процедуру очистки от загрязнений воздухом под давлением 10 бар, не зарегистрировано отложений продуктов горения на поверхностях после проведения экспериментов по горению топлив (ОВУТ, эмульсии на основе воды и отработанного масла, масла в обычном состоянии). Сделан вывод о том, что конфигурация текстуры в виде микроканалов, сформированных лазерным излучением, позволяет значительно увеличить стойкость поверхностей нагрева к адгезии продуктов горения топлив.

Каждый микроканал на поверхностях АВ и 2АВ был сформирован путем прохождения луча по одной траектории с идентичными энергетическими характеристиками при десятикратном повторе. Следовательно, на этих поверхностях формирование микроканалов в результате процессов плавления и абляции материала реализовано при идентичных условиях подвода теплоты. По этим причинам на образцах АВ (рис. 2.6б) и 2АВ (рис. 2.6г) высоты микроканалов ($h_{m.c.}$) близки по значениям $h_{m.c.} = 171 - 172$ мкм. Оценка последних проведена по значениям параметра Sz (табл. 2.2). Микроканалы на поверхностях А2В сформированы при прохождении луча по трем параллельным траекториями, т.е. каждый микроканал сформирован в результате действия трех лучей при десятикратном повторе каждого. Следовательно, микроканалы на поверхности А2В сформированы в результате большего подвода теплоты, чем микроканалы на поверхностях АВ и 2АВ. Т.е. на поверхностях А2В микроканалы формировались при более интенсивной абляции материала по сравнению с поверхностями АВ и 2АВ. По этим причинам высота микроканалов на поверхностях А2В ($h_{m.c.} = 245$ мкм, по оценке параметром Sz (табл. 2.2)) превышает более, чем в 1,4 раза высоту микроканалов на поверхностях АВ и 2АВ.

Из рис. 2.6 видно, что геометрические характеристики текстуры (ширина текстурированной локальной области поверхности (т.е. ширина микроканалов), а также площадь необработанной лазером части поверхностей достаточно хорошо соответствуют заданным текстурам (аналогичным характеристикам) на стадии планирования с использованием в расчетах диаметра абляционного кратера (раздел 2.2). Отклонения от заданных параметров текстуры (ширины микроканалов и ширины зоны нетекстурированной части) не превышают 6 мкм (рис. 2.6), что составляет не более 10%. Отклонения связаны с процессами формирования продуктами абляции кромки по краям микроканалов. Можно сделать вывод о том, что предложенная методика прогнозирования геометрических характеристик текстур в виде параллельных микроканалов, сформированных наносекундными импульсами лазерного излучения, базирующаяся на использовании в расчетах диаметра абляционного кратера

обладает достаточно хорошей надежностью (отклонения от заданных геометрических размеров элементов текстур в виде микроканалов не превышают 10%).

2.2.2 Анализ характеристик процессов зажигания и горения топлив

Ранее было установлено, что лазерная модификация поверхностей позволяет интенсифицировать процессы, протекающие при контакте с ними. Среди таких процессов не только течение жидкостей [174], испарение [175], кипение [176], конденсация [177], но и зажигание и горение топлив [79]. Однако до настоящего времени не установлено как конфигурация текстуры, сформированной лазерным излучением, влияет на эти процессы, а также какая именно конфигурация обеспечивает наиболее интенсивное протекание процессов зажигания и горения жидких топлив в условиях кондуктивного или смешанного механизмов подвода теплоты.

Анализ характеристик процессов зажигания и горения капель топлив в условиях смешанного подвода теплоты.

При исследовании процессов зажигания и горения жидких топлив при смешанном подводе теплоты температура капли топлива и поверхности стали, на которую она размещалась, соответствовали лабораторным условиям. В таких условиях, на характеристики зажигания и горения значительно влияют площади межфазных границ “капля топлива – поверхность нагрева” и “капля топлива – высокотемпературная окружающая среда”. Последние определяются параметром межфазного взаимодействия жидкости с твердым телом – контактным диаметром (d_s) растекания капли топлива по поверхности.

В табл. 2.3 приведены значения контактных диаметров капель топлив (масла в обычном жидком состоянии, эмульсии и суспензии) при их растекании по поверхностям Р, АВ, А2В, 2АВ. Поскольку на поверхностях стали АВ, А2В, 2АВ сформирована текстура в виде параллельных микроканалов, значения контактных диаметров определялись в двух направлениях: параллельно и

перпендикулярно микроканалам (т.е. при продольном и поперечном растекании капли по направлению микроканалов).

Таблица 2.3 – Значения контактных диаметров капель топлив, зарегистрированных при продольном ($d\downarrow$) и поперечном растекании ($d\leftrightarrow$) по направлению микроканалов, на поверхностях стали.

Топливо Поверхность	Масло		Эмульсия		Суспензия	
	$d\downarrow$, мм	$d\leftrightarrow$, мм	$d\downarrow$, мм	$d\leftrightarrow$, мм	$d\downarrow$, мм	$d\leftrightarrow$, мм
Р	10,2±0,2		9,2±0,1		7,6±0,1	
AB	24,0±0,2	7,3±0,1	19,5±0,1	6,5±0,1	12,0±0,1	5,8±0,1
A2B	24,5±0,2	7,4±0,1	19,8±0,1	6,6±0,1	12,6±0,1	5,9±0,1
2AB	24,7±0,2	7,7±0,1	21,0±0,1	6,8±0,1	13,0±0,1	6,4±0,1

Установлено (табл. 2.3), что из трех используемых в экспериментах топлив (масла в обычном жидком состоянии, эмульсии и суспензии) при идентичном объеме капли, масло растекается по поверхностям стали с наибольшим контактным диаметром, а суспензия с наименьшим. Последнее обусловлено агрегатным состоянием дисперсионной среды и дисперсной фазы топлив.

Из таблицы 2.3 видно, что контактный диаметр топлив в продольном направлении растекания в 1,5 – 2,5 раза больше аналогичной характеристики при поперечном растекании на поверхностях стали AB, A2B, 2AB. Последнее связано с тем, что при поперечном растекании микроканалы выступают в качестве энергетических барьеров, препятствующих движению контактной линии по поверхности. В результате капля принимает вытянутую в направлении микроканалов форму. По этой же причине диаметр растекания в продольном направлении больше на поверхностях AB, A2B, 2AB, чем на полированной поверхности Р. Но по поперечному направлению диаметр растекания топлив на поверхностях AB, A2B, 2AB меньше, чем на полированной поверхности Р несмотря на то, что модифицированные лазерным излучением поверхности стали характеризуются супергидрофильными и суперолеофильными свойствами. Изменения поверхностной энергии и свойств смачивания (до экстремальных

супергидрофильности и суперолеофильности) связаны с разрушением существующих связей лазерным излучением, формированием оксидов на поверхности, которые являются сильнополярными [178].

Как уже отмечалось выше, капли топлив, используемые в проведенных исследованиях, принимают форму близкую к эллипсоиду при растекании по поверхностям стали с текстурой в виде параллельных микроканалов (AB, A2B, 2AB). Поэтому в случае поверхностей AB, A2B, 2AB некорректным представляется определение зависимостей $\tau_d = f(d_s)$. Полученные экспериментально контактные диаметры растекания капель топлив использовались при расчете значений площадей проекции межфазной поверхности “капля топлива – поверхность нагрева” (S). Капли топлив на полированной поверхности (P) принимали форму сферического сегмента, площадь их основания близка к окружности, поэтому $S = \pi \cdot d_s^2 / 4$, где d_s – контактный диаметр капли топлива. На поверхностях AB, A2B и 2AB основание капли топлив по форме близко к эллипсу. Поэтому площадь проекции определялась по формуле: $S = \pi \cdot (d_{\updownarrow}) / 2 \cdot (d_{\leftrightarrow}) / 2$, где (d_{\updownarrow}) и (d_{\leftrightarrow}) – контактные диаметры в продольном и поперечном направлениях растекания капли по отношению к микроканалам на поверхности. Из зависимостей $\tau_d = f(S)$ (рис. 2.7) видно, что чем больше площадь проекции межфазной поверхности “капля топлива – поверхность нагрева”, тем меньше время задержки зажигания капель топлив (масла в обычном жидком состоянии, эмульсии и суспензии). Последнее обусловлено тем, что чем больше S , тем больше площадь контакта капли с поверхностью нагрева. Следовательно, интенсивность передачи теплоты от поверхности нагрева к капле выше. Поэтому капля прогревается быстрее, выше интенсивность испарения горючих компонентов, входящих в состав топлива. Следовательно, за меньшее время происходит достижение необходимой концентрации горючих веществ вблизи поверхности капли топлива (условия реализации газофазного зажигания).

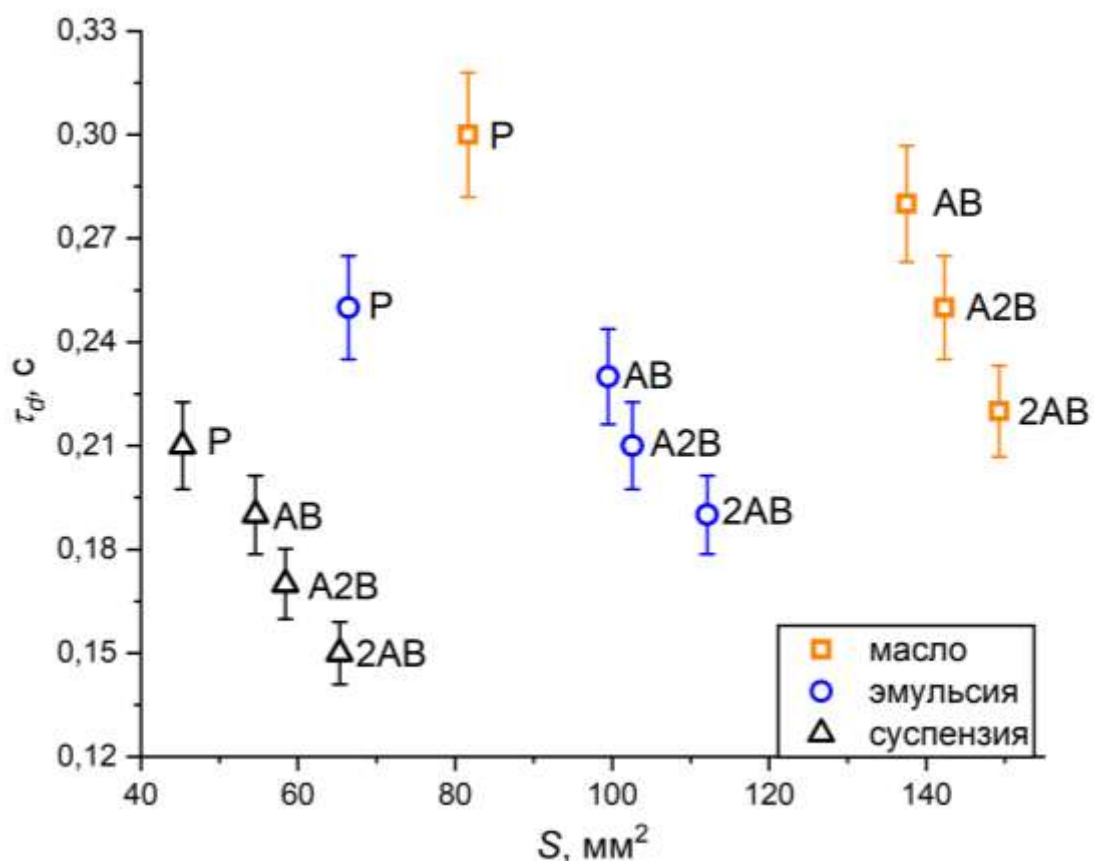


Рисунок 2.7 – Зависимости времен задержки зажигания капле топлив от площади проекции межфазной поверхности “капля топлива – поверхность нагрева” в условиях смешанного подвода теплоты

По результатам проведенного анализа экспериментальных данных (рис. 2.7) установлено, что времена задержки зажигания капле топлив, расположенных на поверхностях, текстурированных лазерным излучением, меньше, чем на полированной поверхности для всех используемых в экспериментах видов топлив (масло, эмульсия, суспензия) при всех прочих равных условиях. Так, например, отличие во временах задержки зажигания капле топлив, расположенных на поверхностях 2AB (зарегистрированы наименьшие значения τ_d) и P (зарегистрированы наибольшие значения τ_d), в случае масла составляет 25%, эмульсии 28%, суспензии 55%. Стоит отметить, что среди сформированных текстур AB, A2B, 2AB наилучший результат по интенсификации процесса зажигания достигнут на поверхностях с текстурой 2AB. Например, различие в значениях τ_d , зарегистрированных на поверхностях

2AB и AB, в случае зажигания каплей масла составляет 18%, эмульсии 17%, суспензии 36%. Как уже отмечалось выше, уменьшение времен задержек зажигания обусловлено большей площадью контакта между каплями топлива и поверхностью нагрева.

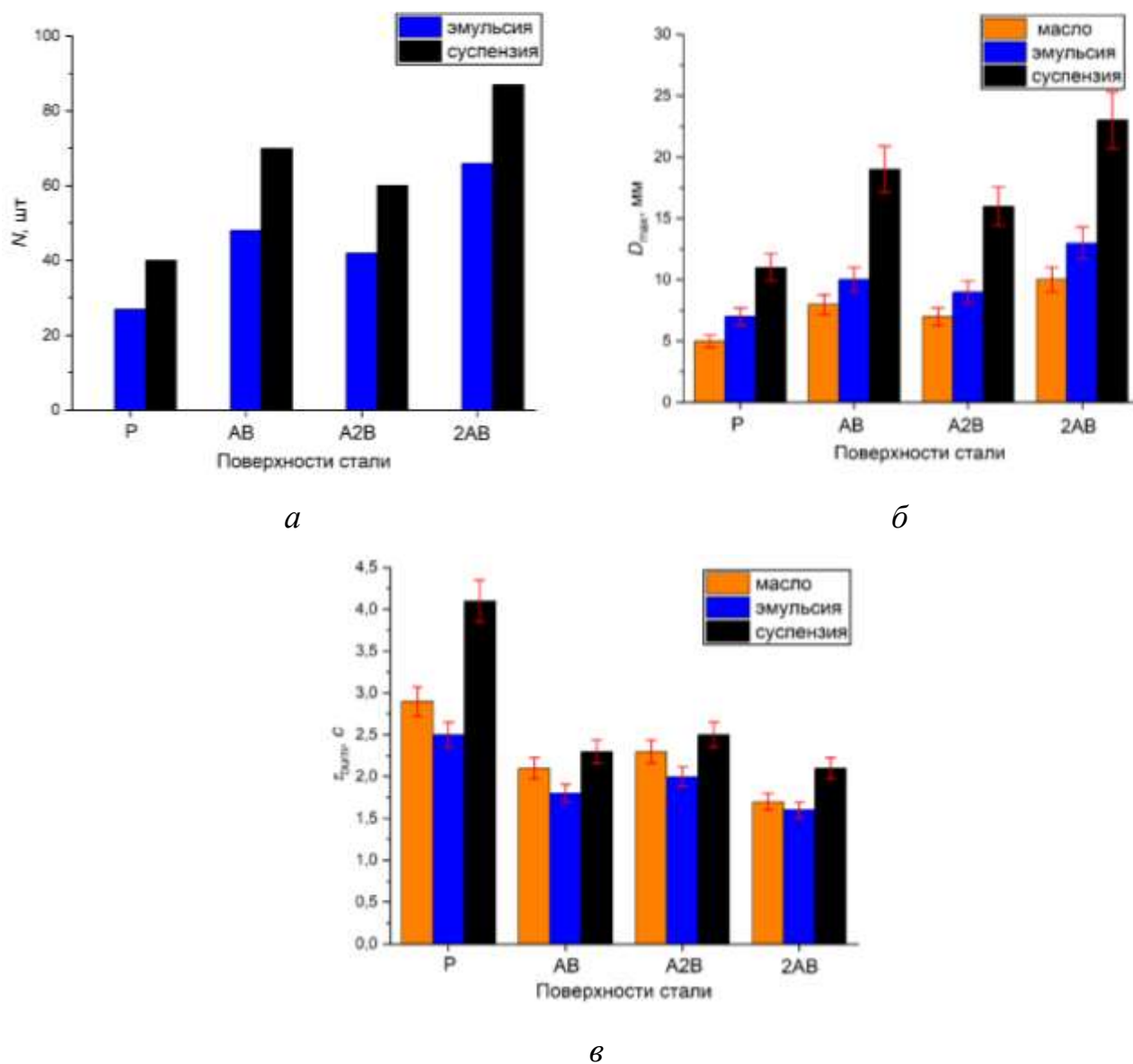
Из рис. 2.7 видно, что при прочих равных условиях площадь контакта между каплями топлива и поверхностью нагрева увеличивается в последовательности P-AB-2BA-2AB. Последнее обусловлено тем, что в этой же последовательности (P-AB-2BA-2AB) капли топлив лучше растекаются по поверхностям. Очевидно, что лучшему растеканию на поверхностях AB, A2B, 2AB способствовало то, что после обработки лазерным излучением поверхности стали характеризовались супергидрофильными и суперолиофильными свойствами смачиваемости. Инверсия свойств смачиваемости поверхностей металлов (формирование супергидрофильных свойств) после их обработки лазерным излучением достаточно хорошо изучена [179]. Стоит отметить, что конфигурация текстуры на поверхности 2AB способствовала большему растеканию по сравнению с текстурами поверхностей AB, A2B. Наиболее вероятно последнее обусловлено тем, что на поверхности 2AB большая часть текстуры состоит из микро- и наноразмерных элементов, образованных в результате процесса абляции и дальнейшей кристаллизации металла.

Стоит отметить, что площадь межфазной поверхности “капля топлива – поверхность нагрева”, через которую осуществляется теплопередача от поверхности нагрева к капле, зависит не только от площади растекания капли топлива, но и от шероховатости поверхности. Очевидно, что с ростом шероховатости увеличивается площадь поверхности, через которую осуществляется теплопередача от поверхности нагрева к капле. Как отмечалось в выше, оценить прирост площади поверхности за счет шероховатости можно используя 3D-параметр шероховатости S_{dr} . По значениям S_{dr} (табл. 2.2) видно, что прирост площади поверхности за счет шероховатости растет в последовательности поверхностей P-AB-2BA-2AB. Т.е. в той же последовательности, в которой капли топлива лучше растекаются. Можно сделать

вывод о том, что из используемых в экспериментах конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов наибольший положительный эффект на время задержки зажигания (рис. 2.7) оказывает текстура поверхности 2AB не только по причине лучшего растекания капель топлива по ней, но и за счет наибольшего прироста площади поверхности, обусловленной развитой шероховатостью.

Известно, что капли топлив могут зажигаться и выгорать в одном из следующих условно выделенных режимов: испарение, кипение, паффинг и микровзрыв [32,180]. Масло в обычном жидком состоянии не диспергирует при подводе теплоты к капле, а физико-химические процессы при зажигании реализуются в условиях испарения и кипения капли масла. Режимы паффинга и микровзрыва характерны только для многокомпонентных топлив. На рисунке 2.8а представлено число инициаций паффинга капель эмульсии и суспензии в условиях смешанного подвода теплоты. Интенсивность протекания паффинга, как и размер области выгорания, в которой формируется горючая парогазовая смесь при протекании физико-химических процессов перед зажиганием, в значительной степени влияет на интенсивность горения многокомпонентных топлив. Чем больше число инициаций паффинга (рис. 2.8а) и больше область выгорания (рис. 2.8б), тем быстрее будут выгорать капли многокомпонентных топлив (рис. 2.8с). В порядке увеличения времен полного выгорания капель жидких топлив поверхности стали располагаются в следующей последовательности: 2AB, AB, A2B, P. Из рисунка 2.8 видно, что наименьшие значения числа инициаций паффинга и максимального размера области выгорания зарегистрированы при зажигании и горении капель топлив на полированной поверхности. В таких условиях время полного выгорания капель будет больше, чем на текстурированных поверхностях нагрева. Наибольшие же значения N , D_{\max} и наименьшие τ_{burn} зарегистрированы на текстурированной поверхности 2AB для используемых в экспериментах топлив при прочих равных условиях. Так, например, для капли суспензии характерное время выгорания на текстуре 2AB в 2 раза меньше τ_{burn} на полированной поверхности стали. Таким образом, можно сделать вывод, что на текстуре 2AB физико-химические процессы, происходящие в условиях зажигания и горения топлив, реализуются намного

интенсивнее по сравнению с использованием полированной, АВ и А2В текстур в качестве поверхностей нагрева.



а – число инициаций паффинга, *б* – максимальный размер области выгорания, *в* – времена полного выгорания капель топлив в условиях смешанного подвода теплоты

Рисунок 2.8 – Характеристики зажигания и горения капель жидких топлив

Стоит отметить, что значения характеристик процесса горения (N , D_{\max} , τ_{burn}), представленных на рисунке 2.8, для условий подвода теплоты к поверхностям АВ и А2В, отличаются незначительно и лежат в диапазоне

доверительного интервала. Также необходимо пояснить, что сравнение характеристик зажигания и горения трех видов топлив между собой некорректно в связи с различным составом, а следовательно, и разными физическими и химическими свойствами. Кроме того, в экспериментах использовались одинаковые объемы капель масла, эмульсии и суспензии. Однако, из-за разного компонентного состава, их массы отличались друг от друга. Поэтому на одной и той же поверхности, например 2AB, времена полного выгорания капли эмульсии меньше τ_{burn} капли суспензии, несмотря на более интенсивный паффинг последней.

Анализ характеристик процессов зажигания и горения капель топлив в условиях кондуктивного подвода теплоты.

В проведенных экспериментах по зажиганию и горению капель топлив при кондуктивном подводе теплоты от поверхности нагрева воспроизводились условия номинального режима работы котлоагрегатов, в топочных камерах которых происходит столкновение капель топлив с нагретыми до высоких температур внутренними поверхностями. По результатам проведенных экспериментов выполнен анализ влияния конфигурации текстуры поверхностей стали X16CrNi25-20 на характеристики процессов зажигания (τ_d) (рис. 2.9) и горения (N , D_{max} , τ_{burn}) (рис. 2.10) капель топлив (масла, эмульсии и суспензии).

Из рисунка 2.9 видно, что, как и в случае смешанного подвода теплоты, при кондуктивном нагреве лазерная обработка поверхностей стали способствует уменьшению времени задержки зажигания. Например, τ_d капли суспензии на поверхности 2AB на 40% меньше аналогичной характеристики, установленной на полированной поверхности Р (рис. 2.9). Установлено (рис. 2.9), что конфигурация текстуры оказывает значительное влияние на характеристики зажигания и горения. Из используемых текстур в экспериментах наименьшее время задержки зажигания капель масла, эмульсии и суспензии зарегистрировано на поверхностях 2AB при всех прочих равных условиях. На поверхности 2AB площадь участков, необработанных лазерным излучением, в два раза больше площади участков, обработанных лазерным излучением. Поскольку осаждение паров металлов и кристаллизация расплава происходит на необработанные участки (рис. 2.6г), то

именно поэтому эти участки характеризуются значительной шероховатостью и развитой иерархической многомодальной текстурой. Последнее является причинной значительного увеличения площади поверхности участков, необработанных лазерным излучением, за счет шероховатости (сформированной текстуры).

В проведенных условиях экспериментов между каплей топлива и поверхностью стали X16CrNi25-20, нагретой до температуры 950 °С, образовывался паровой зазор из продуктов испарения, входящих в состав топлива. Несмотря на то, что процесс переноса теплоты от поверхности нагрева к капле топлива осуществляется через паровой зазор, интенсивность передачи теплоты от поверхности 2AB к капле была выше, чем от поверхностей P, AB и A2B. Последнее обусловлено тем, что поверхности 2AB характеризуется наибольшей площадью из используемых поверхностей в эксперименте. Чем выше интенсивность передачи теплоты от поверхности к капле топлива, тем выше интенсивность испарения горючих компонентов, входящих в состав топлива. Вследствие этого за более короткий срок вблизи капли достигается необходимая концентрация горючих веществ для реализации газофазного зажигания. По этим причинам времена задержки зажигания топлив на поверхностях 2AB характеризуются меньшими значениями. Особо заметно влияние увеличения площади поверхности на характеристики зажигания при сравнении полученных результатов с использованием поверхностей AB и A2B. В отличие от условий смешанного подвода теплоты (рис. 2.7) при кондуктивном подводе на поверхности с текстурой AB капли топлив зажигались быстрее, чем на поверхности с текстурой A2B при прочих равных условиях. Причиной последнего может являться только больший прирост площади контакта за счет шероховатости на поверхности A2B (таблица 2), так как контактный диаметр капель во всех экспериментах с кондуктивным подводом теплоты был постоянен (ограничен размерами специального держателя).

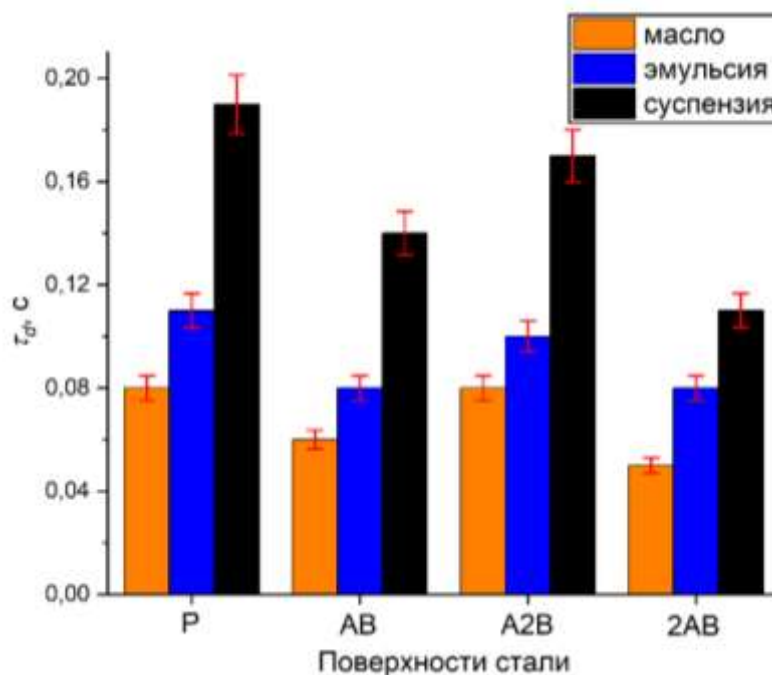
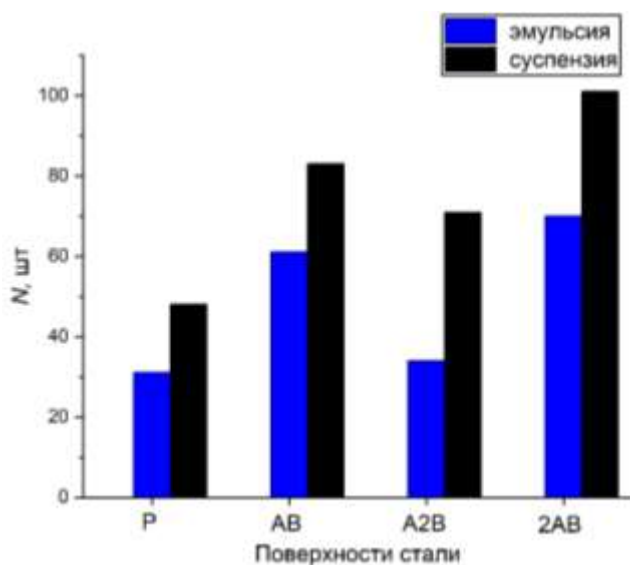


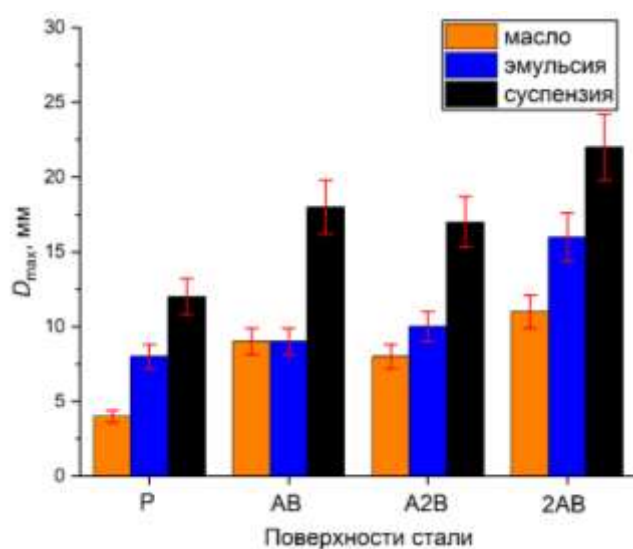
Рисунок 2.9 – Времена задержки зажигания капле топлива (масла в жидком состоянии, эмульсии и суспензии) в условиях кондуктивного подвода теплоты

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что в условиях работы энергогенерирующего оборудования в номинальном режиме для уменьшения времен зажигания капле масла в жидком состоянии, эмульсии и суспензии целесообразно на поверхностях нагрева создавать развитую многомодальную шероховатость, характеризующуюся наибольшим проростом площади поверхности возможного контакта. Лазерная технология обработки поверхностей нагрева из стали марки X16CrNi25-20 позволяет создавать текстуру из элементов в виде микроканалов с заданными геометрическими размерами и контролировать шероховатость в достаточно широких диапазонах изменения ее 3D-параметров. При этом можно увеличить площадь поверхностей нагрева более чем в два раза за счет создания микроканалов и развитой многомодальной шероховатости из элементов закристаллизовавшегося расплава металла. Рост площади поверхности за счет шероховатости позволяет до 40% уменьшить время задержки зажигания капле композиционных топлив (ОВУТ и эмульсии), а также жидких в условиях работы энергогенерирующего оборудования в номинальном режиме.

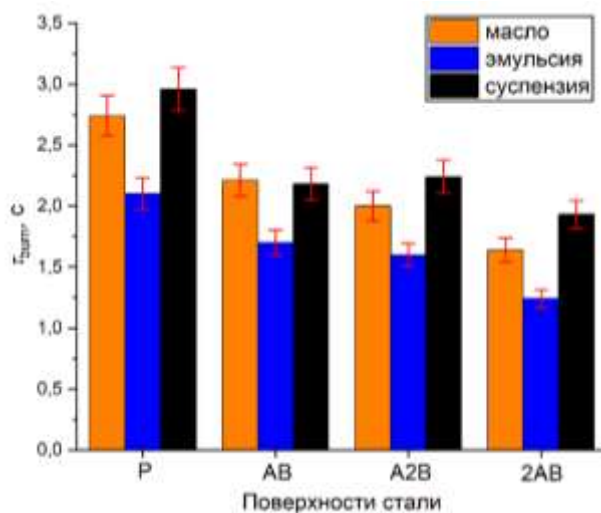
На рисунке 2.10 представлены характеристики процесса горения жидких топлив на поверхностях стали: число инициаций паффинга (рис. 2.10а), максимальный размер области выгорания (рис. 2.10б), и время полного выгорания капель топлив (рис. 2.10в).



а



б



в

а – число инициаций паффинга, б – максимальный размер области выгорания; в – времена полного выгорания капель топлив в условиях кондуктивного подвода теплоты

Рисунок 2.10 – Характеристики зажигания и горения капель жидких топлив

Из рис. 2.10в видно, что из используемых текстур в экспериментах наименьшее время выгорания капель топлив масла, эмульсии и суспензии зарегистрировано на поверхностях с текстурой 2AB при всех прочих равных условиях. Полученный результат, также как и выше установленные, объясняется более развитой поверхностью за счет выбранной конфигурации текстуры. Так уменьшение времен выгорания на поверхностях 2AB по сравнению с полированной поверхностью Р в случае горения капель топлив масла составляет более 40%, в случае эмульсии 40%, а в случае суспензии 34%.

Также из рис. 2.10 видно, что при прочих равных условиях конфигурация текстуры влияет и на другие основные характеристики горения такие как, максимальный размер области выгорания (рис. 2.10а). А в случае горения капель эмульсий и суспензий, в состав которых помимо горючих компонентов входит вода, текстура влияет и на число инициаций паффинга (рис. 2.10б). Достаточно хорошо известно [24,27,36], что причинами инициаций паффинга является многокомпонентность топлива, в состав которого обязательно входит вода. Из рассматриваемых текстур поверхность 2AB характеризуется наиболее развитой шероховатостью (табл. 2.2). Чем выше шероховатость поверхности, тем больше на ней стабильных центров образования паровых пузырьков. По этой причине число инициаций паффинга при горении капель эмульсии и суспензии на поверхности 2AB больше, чем на поверхностях АВ и А2В. Капли масла в обычном состоянии не диспергируют при горении. По этой причине отсутствуют их значения N на рис. 2.10а.

Рост числа инициаций паффинга интенсифицирует процесс горения за счет увеличения области выгорания. Последнее хорошо иллюстрируют установленные зависимости на рис. 2.10б. Также зависимости рис. 2.10б иллюстрируют влияние развитой текстуры на увеличение максимального размера области выгорания капель топлива (масла в обычном жидком состоянии), горящего без вторичного диспергирования вследствие реализации паффинга. Установлено, что за счет развитой текстуры можно увеличить размер области выгорания капель топлив на 65% (наибольшее увеличение D_{\max} зарегистрировано в случае горения капель

масла на поверхности 2AB в сравнении с горением на поверхности Р). На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что для интенсификации процесса выгорания топлив как жидких, так и композитных (эмульсии и суспензии), в условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, предпочтительно использовать на практике поверхности нагрева с более развитой текстурой. Из используемых конфигураций текстур, сформированных лазерным способом обработки, наилучшие результаты по оценке характеристик зажигания (τ_d) и горения (τ_{burn} , N , D_{max}) капель топлив, в том числе и композитных топлив, в условиях, воспроизводящих пуск и номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, продемонстрировала текстура 2AB. Последняя характеризуется параллельными микроканалами шириной около 65 мкм с расстоянием между осями микроканалов равным 195 мкм, развитой текстурой на необработанной лазерным излучением части поверхности, но сформированной закристаллизовавшимся расплавом.

Выводы по главе 2

1. Разработан графоаналитический способ прогнозирования формирования текстур лазерным методом обработки поверхностей металлов в виде упорядоченных микроканалов с заданными геометрическими характеристиками и контролируемой шероховатостью в широких диапазонах изменения ее 3D-параметров. Графоаналитический способ базируется на использовании в расчетах экспериментально установленного диаметра абляционного кратера, обладает достаточно хорошей достоверностью (отклонения от заданных геометрических размеров элементов текстур в виде микроканалов не превышают 10%).

2. Экспериментально доказано, что на поверхностях стали марки X16CrNi25-20 конфигурация текстуры в виде микроканалов, сформированных лазерным излучением наносекундной длительности, позволяет значительно

увеличить стойкость поверхностей к адгезии продуктов горения жидких и композиционных топлив.

3. Также экспериментально установлено, что за счет формирования конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов лазерными методами обработки поверхностей металлов можно уменьшить время зажигания капель топлив объемом 10 мкл (масла до 25%, эмульсии до 28%, суспензии до 55%) в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования. Последнее обусловлено лучшим растеканием капель топлива по модифицированным лазерным излучением поверхностям нагрева и наибольшим приростом площади поверхности, обусловленным развитой шероховатостью.

4. Также установлено, что использование на практике поверхностей нагрева с текстурой в виде микроканалов в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования, способствует интенсификации физико-химических процессов, происходящих при горении капель композиционных топлив (эмульсии и суспензии), а также масла. Последнее характеризуется увеличением максимального размера области выгорания капель свыше 50%, а в случае горения композиционных топлив увеличением числа инициаций паффинга, что в итоге снижает время выгорания капель топлив.

5. В условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, использование поверхностей нагрева с текстурой в виде микроканалов, позволяет до 40% уменьшить время задержки зажигания капель композиционных видов топлива (например, ОВУТ), а также широко используемых на практике жидких топлив.

6. Из используемых текстур в экспериментах, воспроизводящих номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, наименьшее время выгорания капель композиционных топлив (эмульсии и суспензии), а также масла зарегистрировано на поверхностях с текстурой 2AB при всех прочих равных условиях. Полученный результат объясняется более развитой поверхностью за счет выбранной конфигурации текстуры. Так уменьшение времен выгорания на поверхностях 2AB по сравнению с полированной

поверхностью Р в случае горения капле топлив масла составляет более 40%, в случае эмульсии 40%, а в случае суспензии 34%.

7. Для интенсификации процесса выгорания капле топлив в условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, предпочтительно использовать на практике поверхности нагрева с более развитой текстурой. Из используемых конфигураций текстур, сформированных лазерным способом обработки, наилучшие результаты по оценке характеристик зажигания (τ_d) и горения (τ_{burn} , N , D_{max}) капле топлив, в том числе и комpositных топлив, в условиях, воспроизводящих пуск и номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, продемонстрировала текстура 2АВ. Последняя характеризуется параллельными микроканалами шириной около 65 мкм с расстоянием между осями микроканалов равным 195 мкм, развитой текстурой на необработанной лазерным излучением части поверхности, сформированной закристаллизовавшимся расплавом.

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО РАСПЫЛЕНИЯ (ПАФФИНГА И МИКРОВЗРЫВА) ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ СМАЧИВАНИЯ И ТЕОРИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕЩЕСТВ

В главе приведено описание разработанных экспериментальных стендов, полученных результатов и выводы с целью обоснования сформулированной гипотезы, объясняющей причину реализации паффинга и микровзрыва капель в условиях высокотемпературного нагрева, достаточного для стабильного зажигания многокомпонентных топлив. Гипотеза основана на предположении о том, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель композиционных топлив является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Оценка растворимости многокомпонентных составов выполнена на основе широко известного подхода «подобное растворяет подобное» [71]. Последний базируется на сопоставлении дисперсной и полярной составляющих поверхностного натяжения компонентов, входящих в состав композиционных топлив. Поверхностное натяжение связано с энергией взаимодействия молекул в объеме конденсированной фазы, мерой которой является энергия адгезии. Работа адгезии – это работа, которую нужно совершить в изотермических условиях для разделения молекул конденсированной фазы, т.е. разрыва межфазной поверхности компонентов, входящих в состав многокомпонентной смеси. Слабые связи (ван-дер-ваальсовых взаимодействий) характеризуются дисперсной составляющей. Полярная составляющая поверхностного натяжения характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные).

Практически все известные исследования по паффингу и микровзрыву проводятся на смесях, в состав которых входит вода, являющаяся наиболее распространенным сильно полярным веществом. Как правило, вода смешивается с углеродосодержащими горючими компонентами, которые являются

неполярными (дисперсными) веществами. При смешении полярного вещества с неполярным согласно подходу «подобное растворяет подобное» образуется смесь с взаимонерастворимыми компонентами. При нагревании малых объемов жидкостей (капель) этих смесей до высоких температур происходит диспергирование (вторичное распыление). Т.е. паффинг или микровзрыв реализуются только при интенсивном высокотемпературном нагреве многокомпонентной капли если в поверхностном натяжении одного компонента преобладает полярная составляющая (жидкость должна быть сильно полярной $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$), а в поверхностном натяжении другого компонента преобладает дисперсная составляющая (жидкость должна быть сильно дисперсной $\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,1$).

3.1 Экспериментальная установка и методы исследования

3.1.1 Компонентный состав жидких смесей

С целью обоснования гипотезы, сформулированной во введении, для экспериментальных исследований выбраны жидкости, приведенные в табл. 3.1. В таблице 3.1 приведена химическая формула жидкости, производитель, температура кипения (t_b) [168,181,182], поверхностное натяжение (σ_L) и её составляющие полярная (σ_L^P) и дисперсная (σ_L^D).

Таблица 3.1 – Жидкости, используемые в исследовании

Жидкость	Химическая формула / температура кипения, °C	Производитель	Литературные данные			
			σ_L , мН/м	σ_L^P , мН/м	σ_L^D , мН/м	Литературный источник
Вода	H ₂ O/100,0	Mill-Q water treatment system, Sigma-Aldrich, США	72,8	51,0	21,8	[183]
Моноэтанол	C ₂ H ₇ NO/170	ЭКОС-1, РФ	48,2	29,4	18,8	[184]

амин	,0					
Глицерол	$C_3H_8O_3/290,0$	Тульская Фарм Фабрик, РФ	63,4	26,4	37,0	[183]
Этиленгликоль	$C_2H_6O_2/197,3$	ЭКОС-1, РФ	47,7	16,8	30,9	[183]
Ацетон	$C_3H_6O/56,0$	ЭКОС-1, РФ	25,2	3,1	22,1	[185]
Этиловый спирт 95%	$C_2H_6O/78,3$	Росбию, РФ	22,1	4,6	17,5	[186]
Дийодметан	$CH_2I_2/182,1$	Alfa Aesar, Англия	50,8	0,0	50,8	[183]
Додекан	$C_{12}H_{26}/216,3$	ЭКОС-1, РФ	25,4	0,0	25,4	[187]
Синтетическое машинное масло	– /190,4	Газпромнефть, РФ	33,4	1,4	32,0	[168]
Компрессорное масло	– /190,5	Газпромнефть, РФ	28,01	0,01	28,0	[168]
Масло TEDEX TU 32	– /208,0	Газпромнефть, РФ	36,1	1,1	35,0	[168]

3.1.2 Аналитические исследования

Незначительные примеси в жидкостях и состояние окружающей среды достаточно существенно влияют на поверхностное натяжение и её составляющие (полярную и дисперсную) [188]. По этой причине проведено измерение поверхностного натяжения жидкостей и её составляющих.

Измерение поверхностного натяжения жидкостей, используемых в исследованиях, осуществлялось с помощью тензиометра K20 (KRUSS, Германия) по методам Дью Нуи и Вильгельми при температуре жидкостей и окружающей среды 22 °С. Погрешность определения поверхностного натяжения не превышала 0,5%, что составляло несколько десятых долей мН/м.

По методу ОВРК [189] определялись полярные (σ_L^P) и дисперсные (σ_L^D) составляющие поверхностного натяжения ($\sigma_L = \sigma_L^P + \sigma_L^D$) жидкостей, представленных в таблице 3.1, с использованием системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_L(\cos \theta_1 + 1)}{2\sqrt{\sigma_L^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_{S1}^P} \cdot \sqrt{\sigma_L^P}}{\sqrt{\sigma_L^D}} + \sqrt{\sigma_{S1}^D} \\ \frac{\sigma_L(\cos \theta_2 + 1)}{2\sqrt{\sigma_L^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_{S2}^P} \cdot \sqrt{\sigma_L^P}}{\sqrt{\sigma_L^D}} + \sqrt{\sigma_{S2}^D} \end{cases} \quad (3.1)$$

где σ_L , σ_L^P , σ_L^D – поверхностное натяжение, его полярная и дисперсная составляющие (искомые величины из системы уравнений 1), мН/м; θ_1 , θ_2 – статические контактные углы на тестовых поверхностях #1 и #2 (определяются экспериментально), °; σ_{S1}^P , σ_{S1}^D и σ_{S2}^P , σ_{S2}^D – полярная, дисперсная составляющие поверхностной энергии тестовых поверхностей #1 и #2 (данные определены по уравнению 3.2), мН/м.

В качестве тестовых поверхностей #1 и #2 выбраны алюминиево-магниевый сплав АМГ-6 (РОСТЕХКОМ, РФ) и фторполимер PTFE (PTFE, РФ), соответственно. Поверхности #1 и #2 изготовлены в форме диска диаметром 50 мм и толщиной 4 мм, характеризуются очень малой шероховатостью близкой к молекулярно-гладкой. С использованием известных поверхностных натяжений тестовых жидкостей (табл. 3.2) определены σ_{S1}^P , σ_{S1}^D и σ_{S2}^P , σ_{S2}^D путем решения системы:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{L1}(\cos \theta_1 + 1)}{2\sqrt{\sigma_{L1}^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_S^P} \cdot \sqrt{\sigma_{L1}^P}}{\sqrt{\sigma_{L1}^D}} + \sqrt{\sigma_S^D}; \\ \frac{\sigma_{L2}(\cos \theta_2 + 1)}{2\sqrt{\sigma_{L2}^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_S^P} \cdot \sqrt{\sigma_{L2}^P}}{\sqrt{\sigma_{L2}^D}} + \sqrt{\sigma_S^D}. \end{cases} \quad (3.2)$$

где σ_{L1} , σ_{L1}^P , σ_{L1}^D – поверхностное натяжение первой тестовой жидкости, её полярная и дисперсная составляющие, мН/м (известные данные табл. 3.1), мН/м; σ_{L2} , σ_{L2}^P , σ_{L2}^D – поверхностное натяжение второй тестовой жидкости, её полярная и дисперсная составляющие, мН/м (известные данные табл. 3.1), мН/м; θ_1 , θ_2 – статические контактные углы, измеренные в условиях смачивания PTFE / АМГ-6 тестовой жидкостью #1 и #2 (определяются экспериментально), °; σ_S^P и σ_S^D –

полярная и дисперсная составляющие поверхностной энергии PTFE / АМГ-6 (искомые величины), мН/м.

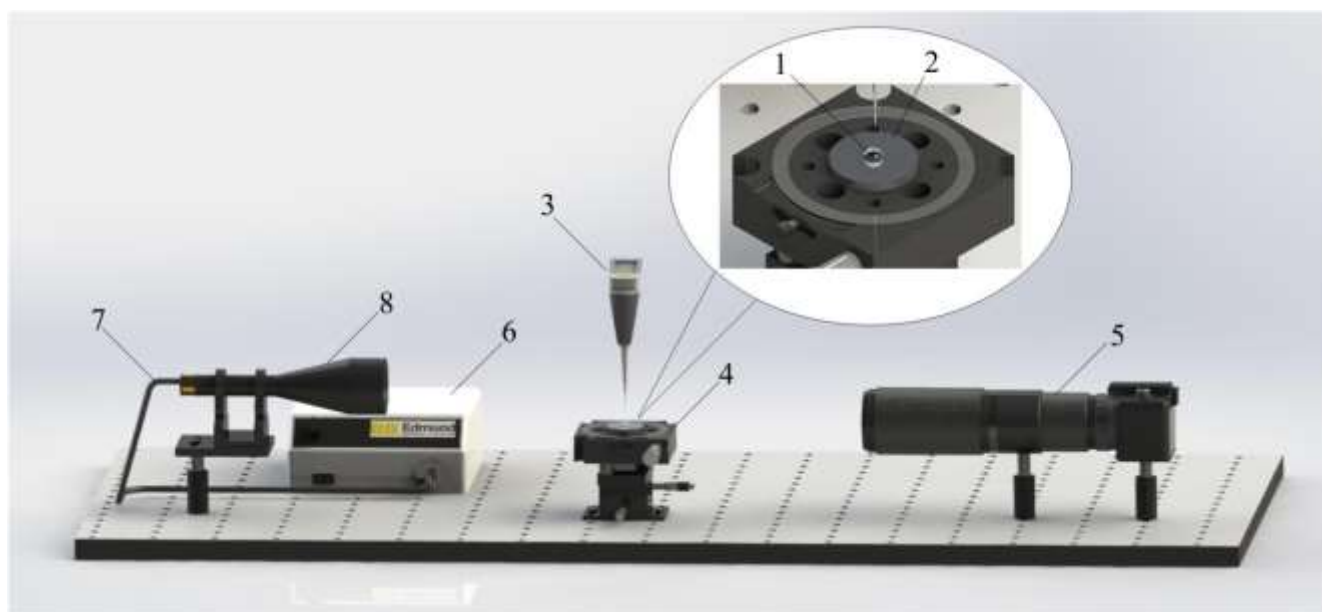
В качестве тестовых жидкостей использовались жидкости с известными значениями полярных и дисперсных составляющих поверхностного натяжения [183] (табл. 3.1). Вода выбрана в качестве первой тестовой (полярной) жидкости, дийодметан в качестве второй тестовой (неполярной) жидкости.

В таблице 3.2 приведены значения поверхностной энергии, ее полярной и дисперсной составляющих тестовых поверхностей #1 (АМГ-6) и #2 (PTFE), установленные экспериментально с использованием системы уравнений (3.2).

Таблица 3.2 – Поверхностная энергия, ее полярная и дисперсная составляющие поверхностей АМГ-6 и PTFE.

Поверхность	σ_s , мН/м	σ_s^P , мН/м	σ_s^D , мН/м
АМГ-6	29,8	3,5	26,3
PTFE	19,5	0,9	18,6

Статические контактные углы, образованные каплями жидкостей (табл. 3.1) на поверхностях АМГ-6 и PTFE, определены с использованием установки, в которой реализована теневая оптическая методика (рис. 3.1) [163].



1 – капля жидкости, 2 – диск АМГ-6 или PTFE, 3 – электронный дозатор, 4 – гониометр, 5 – фотоаппарат, 6 – источник света, 7 – оптоволоконный кабель, 8 – телецентрическая трубка

Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка для измерения статических контактных углов, образованных каплями жидкостей и поверхностью твердого тела (PTFE, АМГ-6) [190]

Капля жидкости *1* объемом 5 мкл помещалась на поверхность диска 2 АМГ-6 или PTFE высокоточным электронным дозатором 3 Ленпипет Степпер (Thermo Scientific, США). Диск АМГ-6 или PTFE располагался на гониометре 4 GNL18/M (ThorLabs, США), который позволял контролировать положение диска в плоскости XY. Фотоаппарат 5 Nikon D7100 (Nikon, Япония) с макрообъективом macro lens Sigma (105 mm f/2.8 G IF-ED AF-S 9) и система генерации света использовались для получения теневых изображений капель жидкостей. Система генерации плоскопараллельного света состоит из источника света 6 (MI-150 Edmund Optics, США), оптоволоконного кабеля 7 (BX4 Dolan-Jenner, США) и телецентрической трубки 8 (62-760 Edmund Optics, США). Полученные теневые изображения капель жидкостей обрабатывались методами гониометрии: LB-ADSA [191] и tangential 1 [192]. Погрешность определения контактных углов не превышала 5%.

3.1.3 Экспериментальная установка для создания условий высокотемпературного нагрева жидких веществ

На основании результатов анализа известных работ [23,24,33–37,25–32] по исследованию диспергирования (вторичного) многокомпонентных капель выбраны следующие основные условия высокотемпературного нагрева капель жидких веществ:

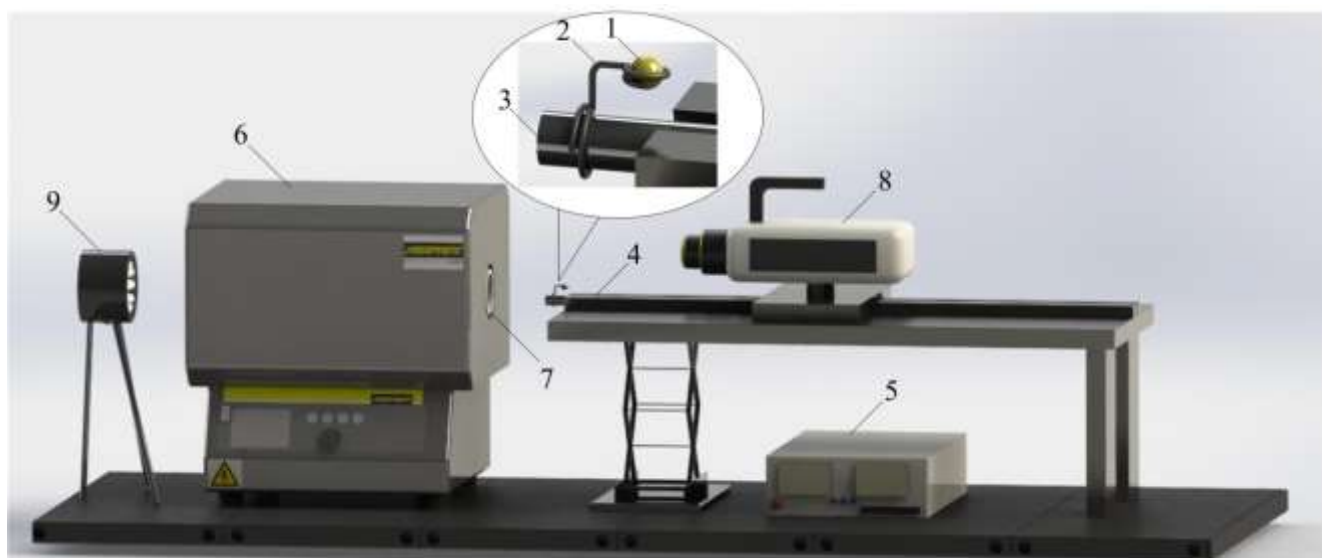
- 1) механизм подвода теплоты – смешанный (кондуктивный, конвективный, радиационный);
- 2) температура среды – 900 °С;

3) число компонентов в составе капли и их концентрация – два компонента концентрацией 50% x 50% (по объему);

4) условия формирования капли – интенсивное перемешивание компонентов при температуре, соответствующей лабораторным условиям (от 20 °С до 24 °С), в течении не менее 20 минут со скоростью вращения магнитного якоря не менее 1200 об/мин;

5) расположение капли – на подвеске.

Вышеперечисленные условия проведения экспериментальных исследований диспергирования капель смесей реализованы с помощью установки, схема которой приведена на рис. 3.2.



1 – капля жидкости, 2 – держатель, 3 – трубка из стали, 4 – координатный механизм, 5 – блок управления координатным механизмом, 6 – муфельная печь, 7 – керамическая трубка, 8 – высокоскоростная видеокамера, 9 – LED-светильник

Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка [190]

Капля бинарной жидкости 1, состоящей из компонентов, перечисленных в табл. 3.1, объемом 10 мкл размещалась на специальном держателе 2. Последний изготовлен из жаропрочной, жаростойкой стальной проволоки диаметром 50 мкм. Держатель закреплен на трубке 3, выполненной из стали. При помощи высокоточного координатного механизма 4 (ЗАО “Завод мехатронных изделий”,

РФ), управляемого электронным блоком 5, трубка 3 с держателем и каплей перемещалась в центр трубчатой муфельной печи 6 (Nabertherm GmbH, Германия). Температура 900 °С внутри керамической трубки 7 поддерживалась постоянной во время проведения экспериментов, задавалась и контролировалось встроенным контролером печи 6. Процесс высокотемпературного нагрева капель регистрировался по методике [78], с помощью высокоскоростной видеокамеры 8 V411 (Vision Research, США), размещенной на координатном механизме 4. Для обеспечения необходимого уровня освещения и создания контрастного изображения исследуемого процесса использовался 5-дюймовый LED-светильник 9 (Edmund, США). Видеозапись исследуемого процесса высокотемпературного нагрева капли на держателе осуществлялась со скоростью не менее 2000 fps разрешением 800×600 пикселей. Полученные видеофайлы обрабатывались с помощью программных обеспечений Tema Automotive (Image Systems AB, Швеция) и Phantom Camera Control (Vision Research, США) по хорошо апробированной методике [78]. Критерием реализации одного из четырех возможных механизмов протекания физико-химических процессов (испарения, кипения, паффинга или микровзрыва) при высокотемпературном нагреве капель бинарных составов являлось устойчивое его повторение не менее, чем в 70% экспериментов из проведенной серии в идентичных условиях. Каждая серия экспериментов состояла из 10 повторов в идентичных и хорошо воспроизводимых условиях.

3.2 Результаты и обсуждение

В таблице 3.3 приведены экспериментально установленные значения поверхностного натяжения, определённого методами Дью Нуи и Вильгельми при температуре жидкостей и окружающей среды 22 °С, а также определенные по методу ОВРК полярные и дисперсные составляющие поверхностного натяжения и их сумма. В добавочном материале S1 приведены значения статических

контактных углов, определенных при смачивании поверхностей АМГ-6 и РТФЕ жидкостями, использовавшимся в исследовании (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Поверхностные натяжения жидкостей, определённые методами Дью Нуи и Вильгельми, а также полярные и дисперсные составляющие поверхностного натяжения жидкостей и их сумма, определенные по методу ОВРК.

Жидкость	По методу ОВРК		σ_L (по методу Дью Нуи) / (по методу Вильгельми), мН/м
	σ_L^P / σ_L^D , мН/м	$\sigma_L = \sigma_L^P + \sigma_L^D$, мН/м	
1 группа (полярные жидкости)			
Вода*	51,0/21,8	72,80	72,56±0,03/72,78±0,01
Моноэтаноламин	28,8/18,0	46,80	45,77±0,02/46,00±0,01
2 группа (дисперсные жидкости с высоким значением полярной составляющей)			
Глицерол	26,0/35,0	61,00	59,92±0,06/60,88±0,15
Этиленгликоль	17,6/26,4	44,00	43,52±0,02/43,49±0,01
3 группа (дисперсные жидкости с низким значением полярной составляющей)			
Ацетон	2,4/24,1	26,50	26,12±0,09/25,88±0,02
Этиловый спирт 95%	3,4/19,0	22,40	22,08±0,04/22,40±0,01
4 группа (дисперсные жидкости)			
Дийодметан*	0,0/50,8	50,80	49,71±0,02/49,79±0,01
Додекан	0,01/26,8	26,81	25,78±0,03/26,10±0,02
Синтетическое машинное масло	1,2/30,2	31,40	30,78±0,05/31,50±0,06
Компрессорное масло	0,01/29,5	29,51	28,12±0,19/29,7±0,09
Масло TEDEX TU 32	0,8/32,1	32,90	32,85±0,09/32,84±0,05

*Тестовые жидкости, значения σ_L^P, σ_L^D приняты по известным в литературе данным [183].

Из табл. 3.3 видно, что расхождение значений поверхностных натяжений, определенных по методам Дью Нуи, Вильгельми и ОВРК не превышает 3%. Также сравнение экспериментально установленных значений поверхностных натяжений и их составляющих σ_L^P , σ_L^D (табл. 3.3) с известными данными (табл. 3.1) показало достаточно высокую их сходимость, отклонения не превышают 3%. Отклонение от известных данных обусловлено незначительными примесями и отклонениями в характеристиках окружающей среды, в которой проводились измерения (главным образом, температура). Последнее свидетельствует о возможности применения метода ОВРК для определения полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения жидкостей, использовавшихся в исследовании.

Жидкости условно разделены на четыре группы по значениям отношения σ_L^P / σ_L^D (табл. 3.3). В первую группу “полярных жидкостей” включены вода и моноэтаноламин с преобладанием σ_L^P над σ_L^D , отношение $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1$. Во вторую группу “дисперсные жидкости с высоким значением полярной составляющей” включены глицерол и этиленгликоль с отношением $0,2 \leq \sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 1,0$. В третью группу “дисперсные жидкости с низким значением полярной составляющей” включены ацетон и 95% этиловый спирт, характеризующиеся отношением $0,1 \leq \sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,2$. В четвертую группу “дисперсные жидкости” включены дийодметан, додекан, синтетическое машинное масло, компрессорное масло, масло TEDEX TU 32, характеризующиеся отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,1$. Таким образом, мы используем безразмерный критерий оценки $(\sigma_L^P / \sigma_L^D)$, характеризующий преобладание связей между молекулами, по которому можно отнести любую жидкость к одной из четырех условно выделенных групп.

В таблице 3.4 приведены результаты экспериментальных исследований по регистрации одного из четырех возможных механизмов протекания физико-химических процессов (испарение, кипение, паффинг, микровзрыв (типичные кадры видеogramм приведены на рис. 3.3)) для капель бинарных смесей,

состоящих из компонентов (жидкостей), приведенных в табл. 3.3, в условиях их высокотемпературного нагрева.

Таблица 3.4 – Результаты экспериментальных исследований по определению реализации испарения, кипения, паффинга, микровзрыва бинарных смесей при их высокотемпературном нагреве.

Состав бинарной смеси		Зарегистрированный процесс фазового перехода (испарение / кипение / паффинг / микровзрыв)
Принадлежность к группе 1 – 4 (табл. 3.3) компонента #1	Принадлежность к группе 1 – 4 (табл. 3.3) компонента #2	
Группа 1	Группа 1	Кипение
Группа 2	Группа 2	Кипение
Группа 3	Группа 3	Испарение / кипение ^{**}
Группа 4	Группа 4	Кипение
Группа 1	Группа 2	Кипение / паффинг ^{**}
Группа 1	Группа 3	Кипение
Группа 1	Группа 4	Микровзрыв / паффинг ^{**}
Группа 2	Группа 3	Кипение
Группа 2	Группа 4	Паффинг / кипение ^{**}
Группа 3	Группа 4	Кипение

* Под компонентом принята жидкость из табл. 3.3.

** Кипение или паффинг зарегистрирован не менее чем в двух и не более чем в трех экспериментах из серии, состоящей из 10 экспериментов, проведенных в идентичных условиях.



$t=0,000$ с



0,696 с



1,662 с



1,954 с



2,486 c



2,881 c



3,897 c



5,309 c

a $t=0,000$ c

0,374 c



0,844 c



1,263 c



1,856 c



2,272 c



3,813 c



5,856 c

b $t=0,000$ c

0,427 c



0,643 c



0,771 c



1,156 c



1,392 c

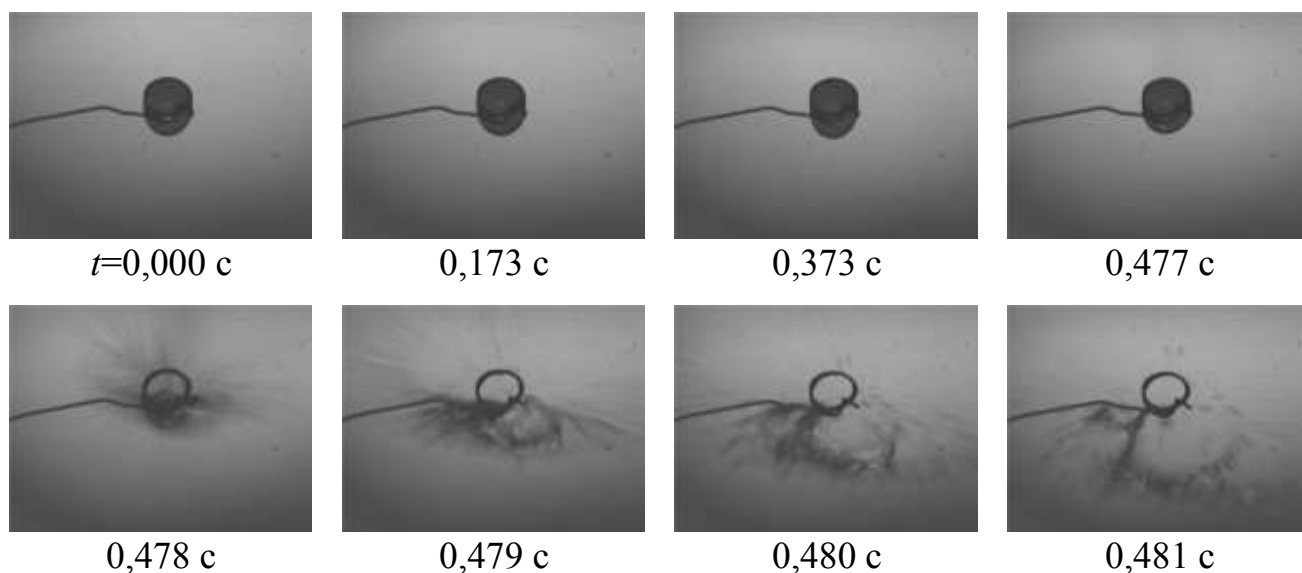


1,769 c



2,127 c

c



г

а – испарение (ацетон – 95% этиловый спирт), *б* – кипение (вода – ацетон), *в* – паффинг (этиленгликоль – компрессорное масло), *г* – микровзрыв (моноэталомин – дийодметан)

Рисунок 3.3 – Типичные кадры видеогаммы, иллюстрирующие четыре механизма протекания физико-химических процессов при высокотемпературном нагреве бинарных жидкостей

Согласно принципу «подобное растворяет подобное» [71] жидкости, принадлежащие одной и той же условно выделенной выше группе, характеризуются взаимной растворимостью. Из таблицы 3.4 видно, что фазовый переход капель бинарных жидкостей, состоящих из компонентов, характеризующихся взаимной растворимостью, реализуется в режиме испарения или кипения. Фазовый переход в режиме испарения (без реализации кипения/паффинга/микровзрыва) зарегистрирован при нагреве капли бинарной смеси, состоящей из компонентов третьей условно выделенной группы (дисперсные жидкости с низким значением полярной составляющей). Последнее обусловлено тем, что жидкости, принадлежащие 3-ей группе, характеризуются низкими температурами кипения (табл. 3.1) и, следовательно, высокой скоростью испарения. В условиях проведенных экспериментов кипение капли бинарной смеси, состоящей из компонентов 3-ей группы, подавлялось за счет интенсивного

испарения и, как следствие, значительного отвода теплоты от капли, необходимой для прогрева капли до температуры кипения и образования центров парообразования. Также стоит отметить, что кипение бинарных жидкостей, в состав которых входят компоненты одной группы, реализовывалось без отрыва фрагментов от родительской капли при разрушении парового пузыря. Т.е. не зарегистрирован паффинг при разрушении паровых пузырей, образующихся при кипении. Последнее свидетельствует о том, что причины зарождения паровых пузырей, их дальнейшая деградация, разрушение, а также характеристики паровых пузырей, образующихся при кипении, паффинге и микровзрыве различны, обусловлены компонентным составом капель (взаимной растворимостью/нерастворимостью компонентов).

Устойчивый (не менее 7 из 10 экспериментов) паффинг зарегистрирован при высокотемпературном нагреве капель смеси из компонентов группы 2 и 4. Паффинг также зарегистрирован при нагреве капель, состоящих из компонентов групп 1 и 2, 1 и 4, но для этих смесей паффинг не устойчив. Последнее свидетельствует о том, что при высокотемпературном нагреве капель бинарных жидкостей, состоящих из компонентов групп 1 и 2, 1 и 4 может реализовываться паффинг.

Микровзрыв капель зарегистрирован только в условиях смешения компонентов групп 1 и 4, при всех возможных комбинациях компонентов (вода – дийодметан / додекан / синтетическое машинное масло / компрессорное масло /масло TEDEX TU 32 или моноэтаноламин – дийодметан / додекан / синтетическое машинное масло / компрессорное масло /масло TEDEX). Т.е. только при смешении двух компонентов, характеризующихся высокой взаимной нерастворимостью, обусловленной преобладанием в поверхностном натяжении полярной составляющей ($\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$) в одном компоненте и дисперсной составляющей ($\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,1$) в другом компоненте.

Стоит отметить, что при высокотемпературном нагреве капель, состоящих из компонентов групп 1 и 3, 2 и 3, а также 3 и 4 при всех возможных комбинациях,

реализуется кипение, несмотря на то, что компоненты данных бинарных смесей, входят в разные группы (т.е. характеризуются частичной взаимной нерастворимостью). Реализация кипения объясняется тем, что в их компонентный состав входит жидкость из группы 3, характеризующаяся низкими температурами кипения и высокими скоростями испарения, по сравнению с аналогичными характеристиками жидкостей из групп 1, 2 и 4. В условиях высокотемпературного нагрева преимущественно испарялись легколетучие жидкости группы 3. Поэтому зарождение паровых пузырей, характерных для процесса кипения, осуществлялось в условиях, когда практически полностью испарился компонент группы 3. Последнее свидетельствует о том, что помимо значительного различия в σ_L^P , σ_L^D у компонентов, для реализации паффинга или микровзрыва должно соблюдаться еще одно условие. Таким условием является обеспечение температур на поверхности раздела “жидкость-жидкость” при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю. При таких условиях, подводимая к капле теплота, будет обеспечивать рост центров парообразования на межкомпонентной поверхности раздела, разрушение (схлопывание) которых при выполнении предельных условий приведет к паффингу или микровзрыву. Стоит отметить, что согласно сформулированной гипотезе смешение компонентов третьей группы с компонентами из других групп может привести к паффингу, но в условиях подвода тепловых потоков сверхвысокой плотности к капле бинарной жидкости за очень короткий промежуток времени, например, путем нагрева капли лазерным излучением.

По результатам экспериментальных исследований сформулирована гипотеза о причинах микровзрывного диспергирования капель бинарных смесей в условиях интенсивного нагрева, базирующиеся на термодинамике смачивания, а также теории двухкомпонентной поверхностной энергии. Свободная поверхностная энергия образования поверхности раздела “жидкость-жидкость” в общем случае может быть определена как [190]:

$$\Delta G_{1,2} = \sigma_{1,2} - \sigma_{L1} - \sigma_{L2} = -2 \left[\left(\sigma_{L1}^D \cdot \sigma_{L2}^D \right)^{1/2} + \left(\sigma_{L1}^P \cdot \sigma_{L2}^P \right)^{1/2} \right], \text{ Дж/м}^2,$$

где $\sigma_{1,2}$ – межфазное натяжение на поверхности раздела “жидкость-жидкость”, Дж/м²; σ_{L1} , σ_{L2} – поверхностное натяжение жидкости (компонента) №1 и (компонента) №2 соответственно, Дж/м².

Свободная поверхностная энергия образования поверхности раздела “жидкость-жидкость” является отрицательной величиной в подавляющем большинстве случаев смешения двух жидкостей [193]. Образование границы раздела “жидкость-жидкость” является менее энергозатратным, чем образование границы раздела “жидкость-газ” с точки зрения термодинамических процессов [193]. Последнее обусловлено тем, что жидкости имеют когезионные взаимодействия между своими молекулами на поверхности раздела “жидкость-газ”. Когезионные взаимодействия между молекулами газа отсутствуют. Молекулы на поверхности жидкости стремятся к взаимодействию с любой другой жидкостью, а не с молекулами газа. Последнее утверждение справедливо и в случае взаимно нерастворимых жидкостей при смешении компонентов из группы 1 “полярные жидкости” и группы 4 “дисперсные жидкости”. Рассмотрим более подробно смешение компонентов этих групп.

Молекулы жидкостей, принадлежащих к четвертой группе, способны только к относительно слабому взаимодействию типа Ван-дер-Ваальса с другими молекулами. Молекулы жидкостей группы 1 также способны к Ван-дер-ваальсовым взаимодействиям, кроме того, они способны к гораздо более сильным взаимодействиям водородных связей. Следовательно, молекулы жидкостей группы 1 предпочли бы взаимодействовать друг с другом, чем с молекулами жидкостей группы 4. Однако молекулы жидкостей группы 1 на поверхности раздела “жидкость – газ” вынуждены взаимодействовать с газом (окружающей средой, в условиях проведенных экспериментов с воздухом). Молекулы жидкостей группы 1 под действием когезионных сил стремятся понизить поверхностную энергию, в таких условиях при контакте с любой другой жидкостью происходит инверсия взаимодействия “жидкость – газ” на

“жидкость – жидкость”. Это верно даже тогда, когда взаимодействие осуществляется преимущественно только силами Ван-дер-Ваальса, как в случае с жидкостями группы 4. Следовательно, свободная энергия образования поверхности раздела “жидкость – жидкость” при смешении компонентов группы 1 и 4 будет всегда отрицательна. Необходимо отметить, что свободная энергия образования поверхности раздела “жидкость – жидкость” принимает большие отрицательные значения, если две жидкости взаиморастворимы (способны к аналогичным когезионным взаимодействиям), например, компоненты, входящих в одну группу или компоненты группы 1 и 2. Т.е. $\Delta G_{1,2}$ стремится к наименьшим значениям в условиях, когда жидкости характеризуются близкими по значениям σ_L^P и σ_L^D .

В условиях высокотемпературного нагрева теплота, подведенная к капле бинарной жидкости, затрачивается на ее прогрев и испарение. При прогреве капли растет ее температура. С ростом температуры поверхностное натяжение компонентов, входящих в состав смеси, уменьшается. Следовательно, уменьшается свободная поверхностная энергия образования поверхности раздела “жидкость – жидкость”. Условием образования парового пузыря на поверхности раздела “жидкость – жидкость” является уменьшение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость” (в идеальных условиях $\Delta G_{1,2} = 0$). Последнее произойдет в том случае, когда теплота, аккумулированная в капле, превысит значения теплоты, затраченной на прогрев капли до температуры кипения легкокипящего компонента и компенсирует теплоту, затраченную на испарение компонентов, входящих в состав капли.

Ниже сформулированы основные положения по прогностической оценке вероятности реализации одного из четырех возможных механизмов протекания физико-химических процессов при высокотемпературном нагреве капель бинарных жидкостей:

I. Монотонное испарение реализуется, если ни один из компонентов, входящих в состав бинарной жидкости, не достигает температуры кипения.

II. Кипение бинарных жидкостей реализуется, если в процессе прогрева только легкокипящий компонент, входящий в компонентный состав смеси, достигает температуры кипения. Реализуется при смешении жидких компонентов в пределах одной условно выделенной группы, при взаимной растворимости компонентов: полярные; дисперсные с высоким значением полярной составляющей; дисперсные с низким значением полярной составляющей; дисперсные. Также реализуется при смешении жидких компонентов с частичной растворимостью в пределах разных групп, выделенных выше: группа 1 + группа 2; группа 1 + группа 3; группа 2 + группа 3; группа 2 + группа 4; группа 3 + группа 4.

III. Паффинг реализуется при смешении нерастворимых (или плохо растворимых) жидких компонентов, характеризующихся значительным отличием полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения, и при обязательном обеспечении температур на поверхности раздела “жидкость-жидкость” при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю. Паффинг может быть реализован при смешении компонентов в следующих комбинациях групп: группа 1 + группа 4; группа 1 + группа 2; группа 2 + группа 4.

IV. Микровзрыв реализуется только при смешении взаимно нерастворимых компонентов, причем один компонент должен характеризоваться отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1$ (должен быть сильно полярным), а второй отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D < 0,1$ (должен быть сильно дисперсным). Кроме того, необходимо обеспечение внешних условий нагрева, при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю.

Необходимо отметить, что согласно сформулированной гипотезе о причинах паффинга или микровзрыва такие факторы как способ подвода теплоты к капле, температура среды, концентрация компонентов и их соотношение в составе капли, размеры капель, условия их формирования, расположение капли не

являются причинами паффинга или микровзрыва, а являются лишь факторами, влияющими на реализацию условия обеспечения температур на поверхности раздела “жидкость-жидкость” при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю. Также выше перечисленные факторы, влияют на размер площади поверхности раздела “жидкость-жидкость”, от которой зависит интенсивность паффинга или микровзрыва. Состав многокомпонентных топливных смесей может изменяться в достаточно широком перечне компонентов. Не проводя дорогостоящие, трудоемкие экспериментальные исследования по паффингу и микровзрыву оценить влияние компонентов на возможную реализацию паффинга или микровзрыва можно по значениям полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения жидкостей.

Выводы по главе 3

Экспериментально обосновано, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Паффинг реализуется при смешении нерастворимых (или плохо растворимых) жидких компонентов, характеризующихся значительным отличием полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения. Микровзрыв реализуется только при смешении взаимно нерастворимых компонентов, причем один компонент должен характеризоваться отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1$, а второй отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D < 0,1$. Кроме того, необходимо обеспечение внешних условий нагрева, при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю.

Полученные в настоящей работе результаты способствуют не только развитию фундаментальной науки в области процессов диспергирования (вторичного распыления) капель, но и разработки перспективных промышленных

технологий основанных на процессах вторичного распыления капель. К таким технологиям относятся: 1) в промышленной теплоэнергетике – энергоэффективные способы сжигания в условиях микровзрывного диспергирования капель композиционных топлив; 2) в металлургии – способ отвода тепловых потоков высокой плотности от поверхностей непрерывнолитой заготовки в условиях микровзрывного диспергирования капель негорючих эмульсий и суспензий при орошении ими поверхности сляба в зоне вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок; 3) в цифровых, интеллектуальных производственных технологиях – способ охлаждения, базирующийся на микровзрывном диспергировании капель теплоносителей для микроэлектронных устройств, поверхности которых выделяют тепловые потоки высокой плотности (до 1000 Вт/см^2).

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ВТОРОГО РОДА

В главе представлены результаты анализа возможности смещения кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева лазерным излучением наносекундной длительности.

4.1 Методы исследования и используемое экспериментальное оборудование

Исследования проводились на образцах в форме пластин из нержавеющей стали марки ASTM A 240/A 240M 430 и алюминия АМГ-3 размерами 50,0×50,0×0,5 мм и 50,0×50,0×1,0 мм, соответственно. Перед модификацией лазерным излучением поверхности образцов полировались по хорошо апробированной методике [164] с целью минимизации неконтролируемого влияния поверхностных электромагнитных волн.

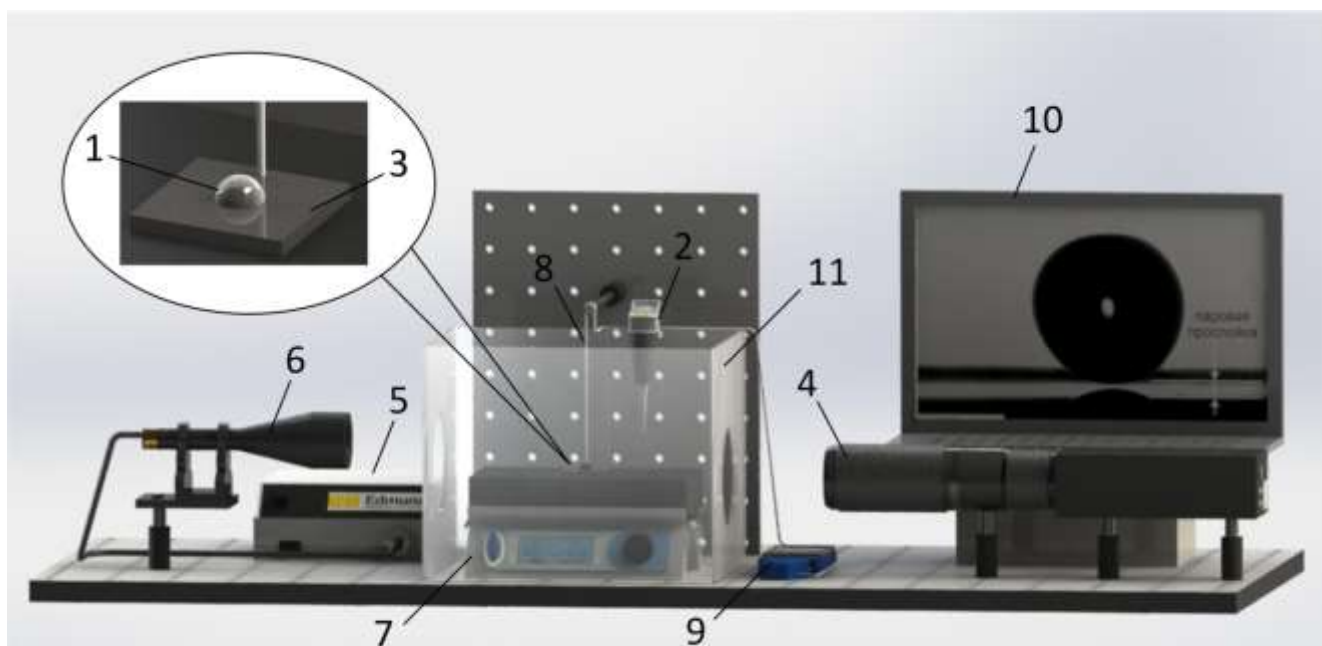
Формирование элементов текстуры в виде абляционных кратеров и создание заданной конфигурации текстуры на поверхностях металлов осуществлялось системой, работающей на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера (IPG Photonics, Россия). В табл. 1 приведены основные технические характеристики использовавшейся лазерной системы. Модификация образцов металла лазерным излучением проводилась в воздушной среде при температуре 20 – 22 °С, атмосферном давлении, относительной влажности 43 – 48%. Энергия импульса определялась с помощью измерителя мощности и энергии импульсов лазерного излучения Ophir Juno (Ophir Optronics, Израиль), оснащённого пирозлектрическим датчиком Ophir PE-50-BF-DIF-C (Ophir Optronics, Израиль). Относительная погрешность измерения энергии импульса не превышала 5%.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики лазерной системы

Характеристика	Значение
Длина волны основного излучения, мкм	1,064
Режим работы	импульсный
Длительность импульсов (дискретные значения) (τ_u), нс	1, 2, 4, 8, 16, 30, 50, 120
Частота импульсов (ν), кГц	2 – 5000
Максимальная выходная мощность (N), Вт	50
Максимальная энергия в импульсе (E_u), мДж	1,0
Скорость перемещения луча (ϑ), м/с	до 10
Диаметр лазерного пятна в фокусе ($d_{л.п.}$), мкм	45

Процессы испарения капель на модифицированных поверхностях металлов исследовались на установке, схема которой представлена на рисунке 4.1.

Капля 1 дистиллированной деаэрированной воды помещалась одноканальным высокоточным электронным дозатором (Thermo Fisher Scientific, США) 2 на поверхность образца 3, нагретого до заданной температуры. Объем капли 5 мкл соответствовал типичному объему капель, генерируемых системами охлаждения, при капельном орошении. Исследуемые процессы регистрировались теневым оптическим методом с использованием оборудования высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов 4 (Fast video, Россия). Плоскопараллельный свет генерировался с помощью источника света (Edmund optics, США) 5 и телецентрической оптической трубы (Edmund optics, США) 6. Теневые изображения получены путем обработки видеозаписей, выполненных при скорости съемки 500 к/с разрешением 1280×1024 , 8 бит. Анализ изображений выполнен с использованием программного обеспечения Fast Video Lab (ООО "НПО АСТЕК", Россия). Нагрев образцов осуществлялся при помощи стеклокерамической плиты (Томь Аналит, Россия) 7 от 80 °С до 400 °С с шагом 1 °С.



1 – капля, 2 – дозатор, 3 – образец, 4 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная макрообъективом, 5 – источник света, 6 – телецентрическая оптическая труба, 7 – стеклокерамическая плита, 8 – термопара, 9 – контроллер, 10 – персональный компьютер, 11 – бокс

Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка [194]

Температура поверхности образца металла контролировалась малоинерционной термопарой хромель-алюмель (Omega, США) 8, подключенной к контроллеру температуры 9 (National instruments, США). Контроллер подключен к персональному компьютеру 10. Погрешность измерения температуры не превышала $\pm 0,1$ °C. Крепление спая термопары к поверхности образца, а также образца к стеклокерамической плите осуществлялось при помощи высокотемпературной термопасты (GRIPCOTT, Франция). Температура Лейденфроста определялась по хорошо известному [99] условию формирования стабильной “паровой подушки” между каплей и поверхностью образца. На мониторе персонального компьютера 10 (рис. 4.1) приводилось типичное изображение капли, зарегистрированное в проведенных исследованиях в условиях возникновения эффекта Лейденфроста. Случайная погрешность определения температуры Лейденфроста при проведении двенадцати экспериментов в

идентичных условиях не превышала 7%, систематическая погрешность, обусловленная характеристиками объектива и настройками видеокамеры, не превышала 2%.

Исключительная сверхвысокая подвижность капель при реализации эффекта Лейденфроста создает проблемы для экспериментального наблюдения. Быстрое самопроизвольное движение капли объясняется [99] внешними воздействиями, например, конвекцией окружающей среды или незначительным наклоном поверхности, в сочетании с низким трением из-за формирования паровой подушки. С целью уменьшения влияния внешних факторов на исследуемые процессы использовался бокс 11, изготовленный из стекла толщиной 5 мм. Все эксперименты проводились в воздушной среде при температуре 20 – 22 °С, атмосферном давлении, относительной влажности 43 – 48%.

Свойства смачивания полированных и модифицированных лазерным излучением образцов определялись по хорошо апробированной методике [195], используя метод Юнга-Лапласа и Тангенциальный 1. Относительная погрешность определения статического контактного угла (θ) не превышала 5%.

Анализ текстуры проводился методом электронной микроскопии по фотоизображениям высокого разрешения, полученных с помощью сканирующего микроскопа (Hitachi, Япония). Геометрические размеры элементов текстур в форме абляционных кратеров определялись по СЭМ-изображениям с известным коэффициентом масштабирования. Случайная погрешность определения диаметра абляционного кратера не превышала 4%, что составляло не более 3 мкм. Трехмерные параметры шероховатости текстуры определены методом конфокальной микроскопии с помощью программного комплекса MountainsLab. В каждой серии из двенадцати экспериментов, проводимых при идентичных начальных условиях, конфокальным датчиком (Micro-Epsilon, Германия) измерялись значения высот и впадин. Разница этих двух величин соответствует параметру шероховатости S_z , характеризующему высоту неровностей. Случайная погрешность определения параметра S_z не превышала 6,0%, систематическая погрешность – 0,5%. Помимо S_z согласно рекомендациям [196,197] для

математического описания текстуры поверхностей металлов использовались 3D-параметры шероховатости: среднее арифметическое высоты (S_a) характеризует среднюю шероховатость поверхности; эксцесс (S_{ku}) характеризует форму выступов (плосковершинность); приращение относительной площади (S_{dr}) характеризует прирост площади поверхности за счет шероховатости относительно молекулярно-гладкой поверхности; плотность выступов (S_{pd}) характеризует число выступов на единице площади поверхности. Параметры S_a , S_{ku} , S_{dr} и S_{pd} определены по фотоизображениям текстуры высокого разрешения, полученным в режимах сканирования «Compo» (композиционный контраст), «Топо» (топографический контраст), «Shadow» (стереоскопическое изображение) с последующей обработкой в программном комплексе MountainsLab по известным значениям высот неровностей (S_z). Погрешность определения параметров S_a , S_{ku} , S_{dr} и S_{pd} не превышала 8,0%.

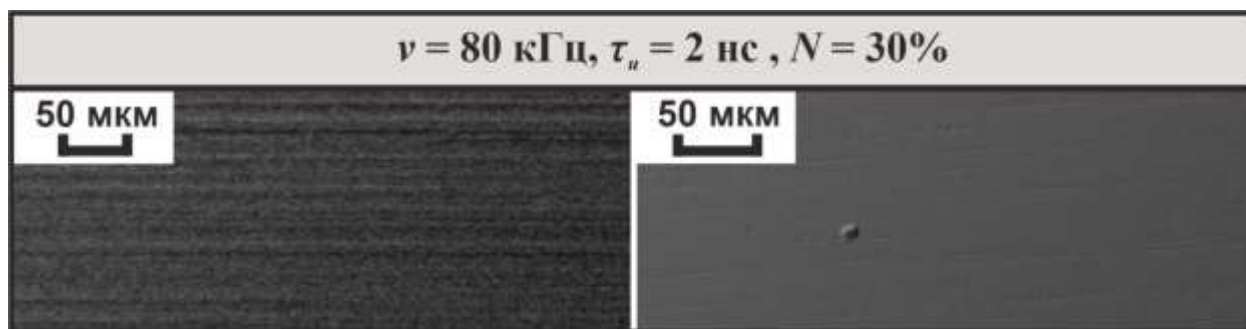
4.2 Результаты и обсуждение

Известно [164], что для прогнозирования текстуры, образованной импульсным лазерным излучением наносекундной длительности, необходимо знать геометрическую форму и размеры элемента текстуры, образованного одиночным лазерным импульсом на поверхности материала, а также скорость движения луча, число линий прохода на 1 мм.

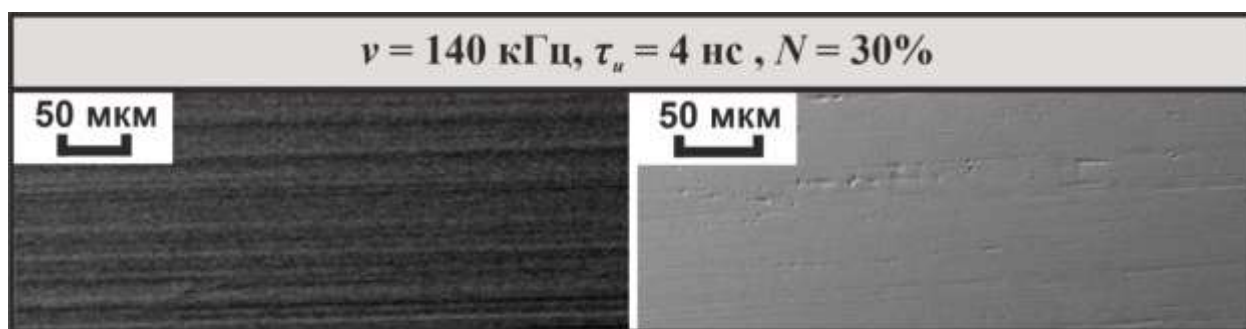
Проведены специальные эксперименты по определению геометрической формы и размеров элементов текстуры, формирующейся при воздействии однократного лазерного импульса с заданными характеристиками на поверхностях нержавеющей стали марки ASTM A 240/A 240M 430 и алюминия АМГ-3. По результатам проведённых экспериментов в условиях варьирования характеристик (выходной мощности от 10 до 100%, длительности от 1 до 120 нс, частоты от 1 до 120 кГц) условно выделено шесть возможных режимов воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность нержавеющей стали и алюминия: 1) режим нагрева без модификации поверхности (рис. 4.2а); 2)

умеренное плавление (рис. 4.2б); 3) интенсивное плавление (рис. 4.2в); 4) формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки) (рис. 4.2г); 5) формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности (рис. 4.2д); 6) формирование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла (рис. 4.2е).

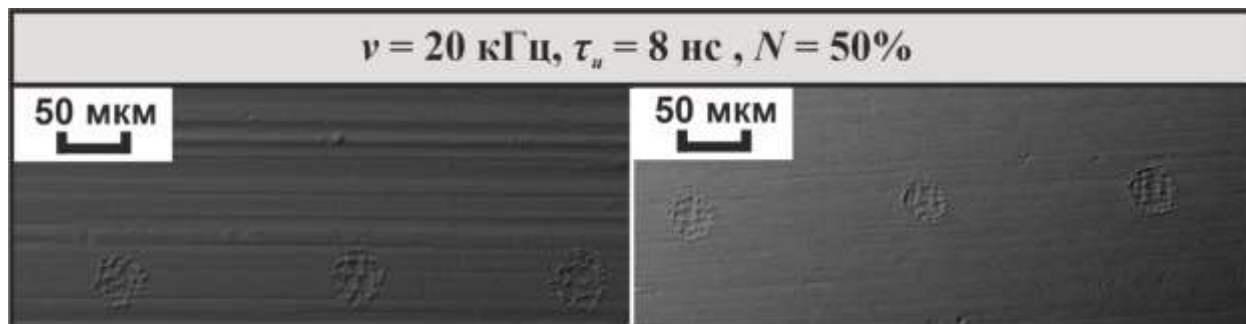
Из условно выделенных шести режимов воздействия абляционный кратер формируется в трех. Характеристики лазерного излучения в этих трех режимах могут быть использованы для формирования текстуры с заданными геометрическими характеристиками.



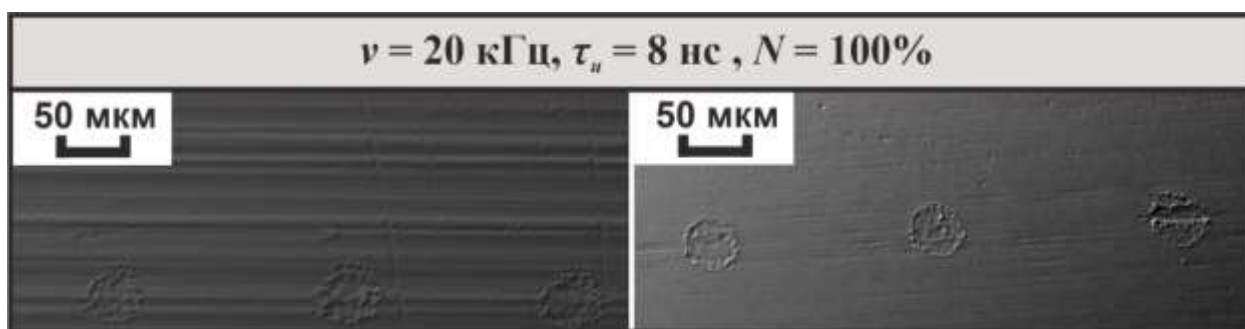
а



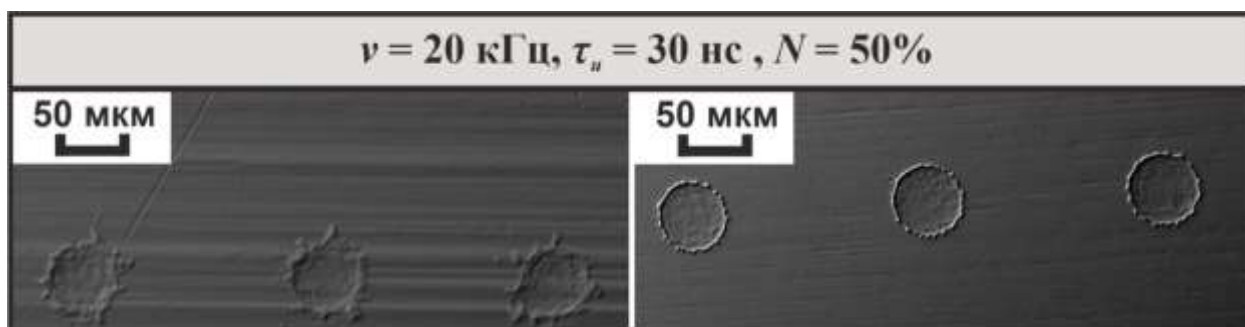
б



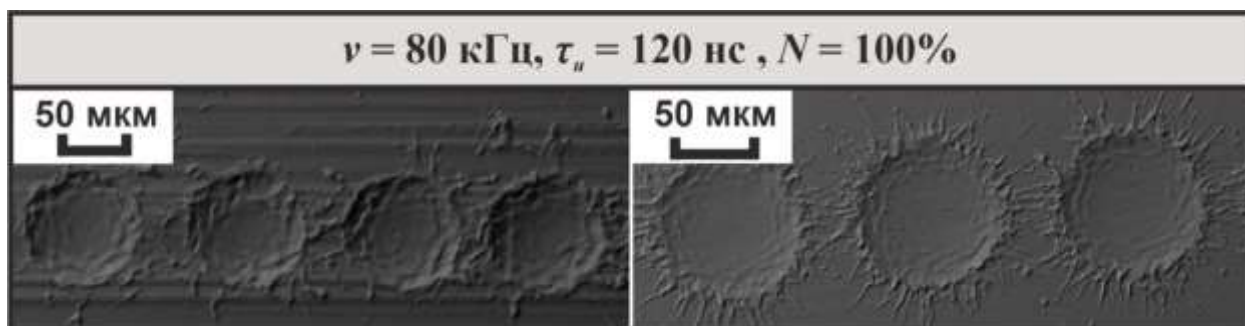
в



з



д

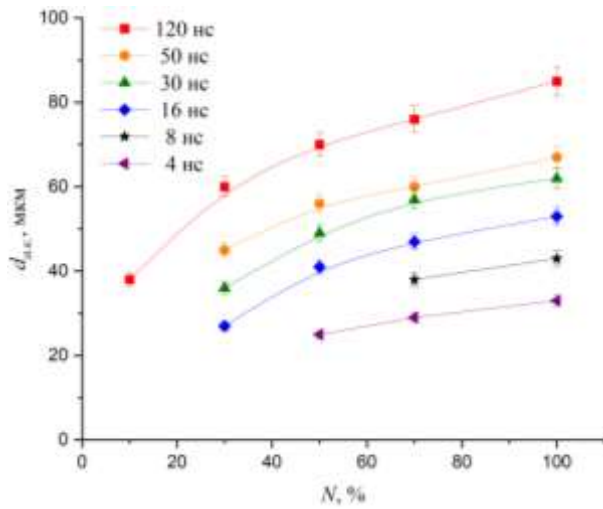


е

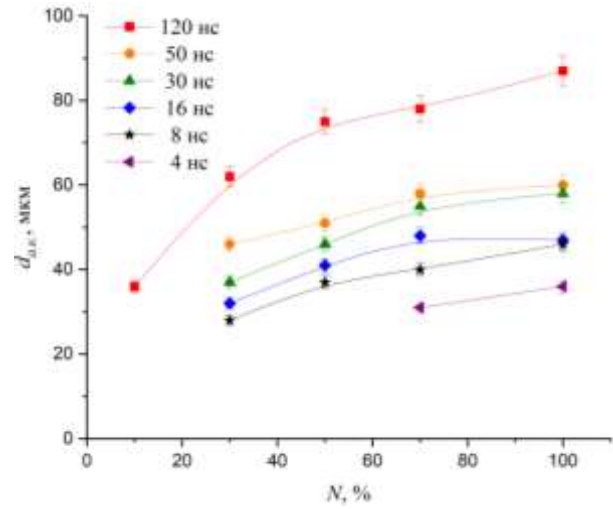
а – Режимы воздействия: нагрев без модификации поверхности, *б* – умеренное плавление, *в* – интенсивное плавление, *з* – формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки), *д* – формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности, *е* – формирование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла

Рисунок 4.2 – Типичные СЭМ-изображения элементов текстур, сформированных с воздействием одиночного лазерного импульса на поверхность алюминия (левое изображение) и нержавеющей стали (правое изображение)

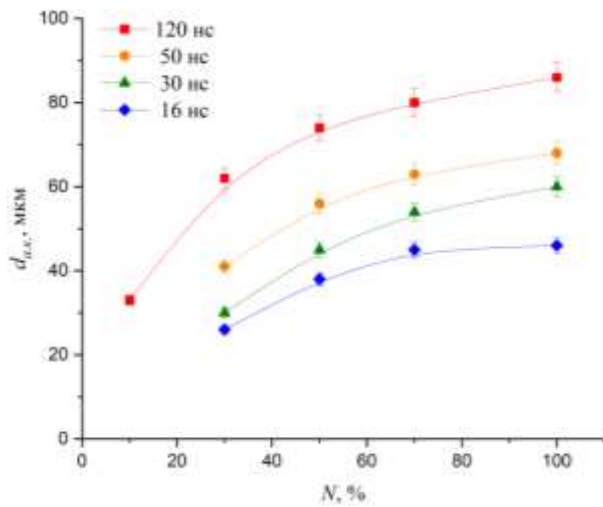
По результатам анализа диаметров абляционных кратеров построены зависимости $d_{a.к.} = f(N, \tau_u, \nu)$ (рис. 4.3 – рис. 4.4), где N – выходная мощность, Вт; τ_u – длительность импульсов, нс; ν – частота импульсов, кГц.



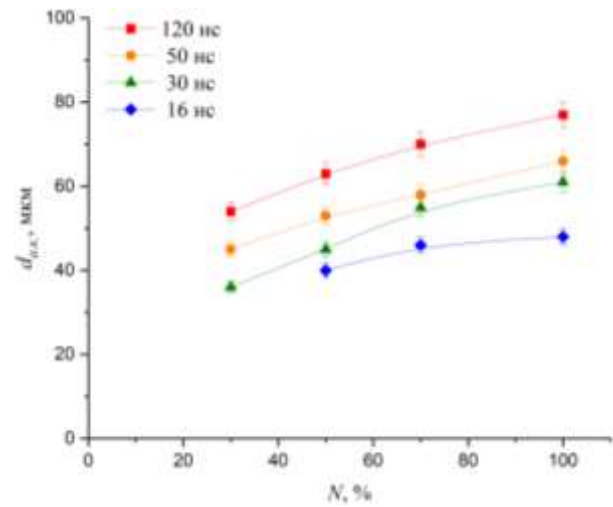
а



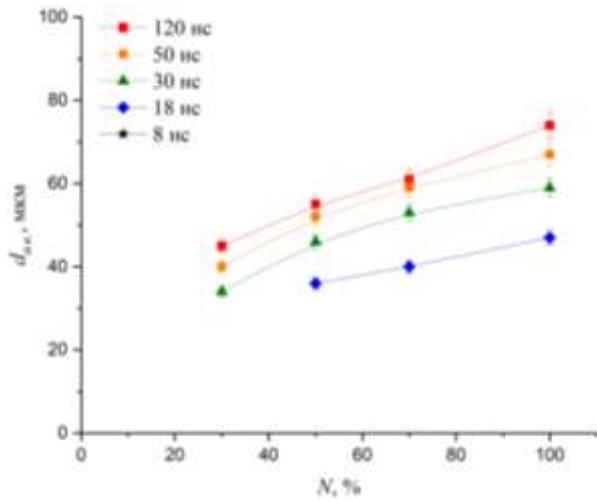
б



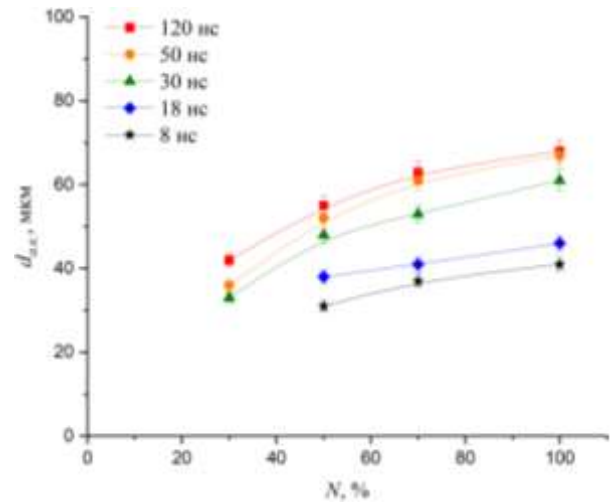
в



г



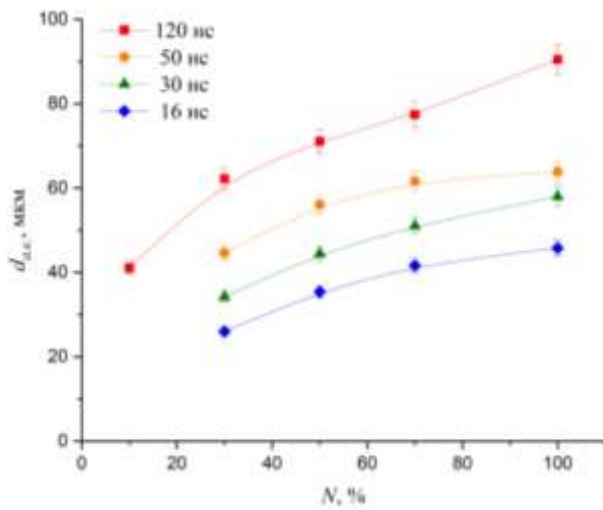
д



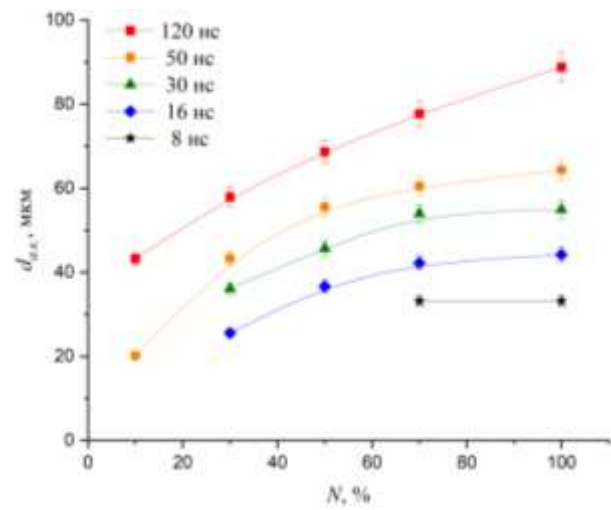
е

Частота импульсов, кГц: $a - 2$, $б - 20$, $в - 50$, $г - 80$, $д - 110$, $е - 140$

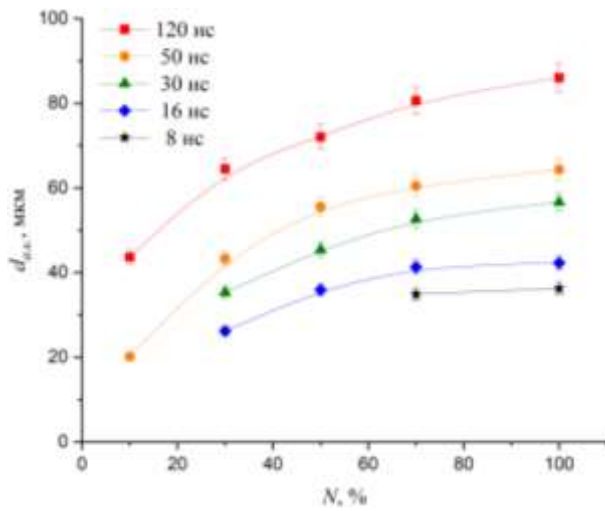
Рисунок 4.3 – Зависимости диаметра абляционного кратера от выходной мощности, длительности и частоты импульса в условиях воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность алюминия



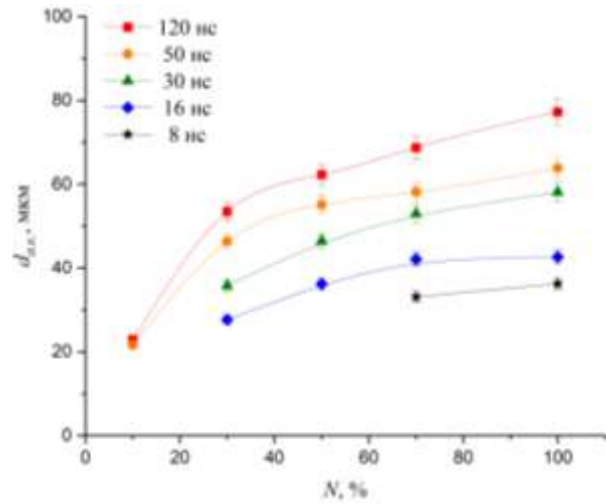
а



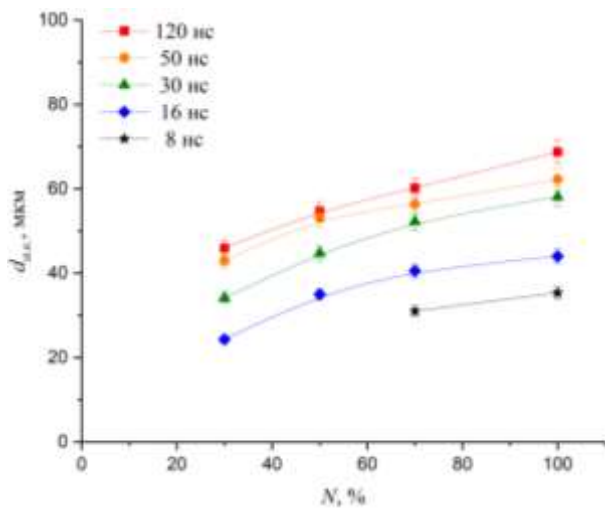
б



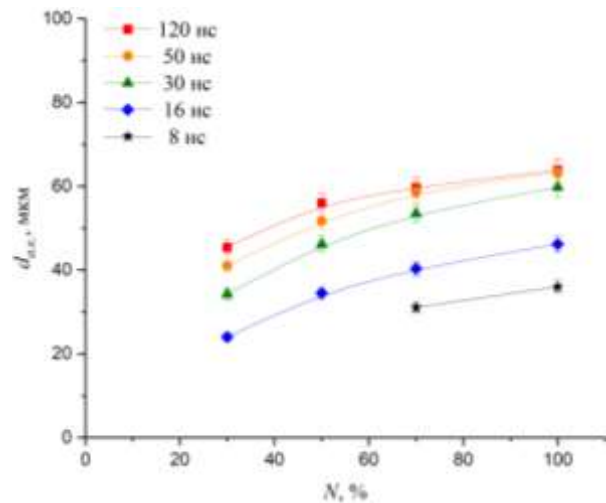
б



г



д



е

Частота импульсов, кГц: а – 2, б – 20, в – 50, г – 80, д – 110, е – 140

Рисунок 4.4 – Зависимости диаметра абляционного кратера от выходной мощности, длительности и частоты импульса в условиях воздействия одиночного лазерного импульса на поверхность нержавеющей стали

Из сравнения зависимостей рис. 4.3 – рис. 4.4 видно, что при длительности $\tau_u = 120$ нс и частоте импульсов $\nu > 50$ кГц диаметр абляционного кратера уменьшается по сравнению с аналогичными зависимостями при $\tau_u \leq 120$ и $\nu > 50$ кГц. Последнее обусловлено техническими характеристиками работы лазерной системы, в частности накачкой лазера.

Также по результатам анализа рис. 4.3 – рис. 4.4 установлено, что диаметр абляционного кратера зависит от выходной мощности и длительности импульса, т.е. от плотности энергии в импульсе, которая определяется как [198]:

$$E_{\rho u} = \frac{4 \cdot E_u}{\pi \cdot d_{л.п.}^2},$$

где E_u – энергия импульса, Дж; $d_{л.п.}$ – диаметр лазерного пятна, мкм.

Распределение энергии в луче лазера (т.е. $E_{\rho u}$) по поперечным координатам неравномерно, близко гауссову (от периферии к центру). Последнее является одной из причин того, что диаметр абляционного кратера не равен диаметру лазерного пятна. Кроме того, помимо характеристик лазерного импульса формирование абляционного кратера и его геометрические размеры зависят от оптических и теплофизических свойств материала. В настоящее время теоретические основы воздействия лазерного излучения на вещество не развиты на уровне, позволяющем прогнозировать аналитически или численным моделированием формирование абляционного кратера, тем более заданной текстуры. На сегодняшний день единственным широко известным возможным способом прогнозирования текстуры является использование графоаналитической методики [164]. Для использования последней необходимо знать размеры и форму абляционного кратера, которые могут быть достоверно установлены только экспериментальным путем.

По результатам проведенных исследований установлено, что варьируя характеристики лазерного излучения в диапазонах длительности импульса от 1 до 120 нс, частоты от 1 до 140 кГц, выходной мощности от 10 до 100% (что соответствует энергии импульса до 1 мДж в условиях воздействия однократного импульса с диаметром пятна 45 мкм), на поверхностях алюминия АМГ-3 формируются абляционные кратеры размером от 25 до 87 мкм (рис. 4.3), а на поверхностях стали от 20 до 91 мкм (рис. 4.4).

Согласно проведённому анализу отдельных элементов текстуры (абляционных кратеров) (рис. 4.3 – рис. 4.4) для создания четырех видов текстур (1 – общие точки границ абляционных кратеров (далее по тексту

“соприкосновение абляционных кратеров”[199]); 2 – микроканалы; 3 – микростолбики; 4 – развитая многомодальная, разноуровневая шероховатость (далее по тексту “цветная капуста”[200]) с заданными геометрическими характеристиками и шероховатостью, выбраны следующие параметры лазерного излучения:

1) для поверхности алюминия: $N = 50$ Вт, что соответствует 100% выходной мощности; $\tau_u = 50$ нс; $\nu = 2$ кГц; энергия в импульсе $E_u = 0,24$ мДж; плотность энергии $E_{pu} = 15,16$ Дж/см²;

2) для поверхности нержавеющей стали: $N = 50$ Вт, что соответствует 100% выходной мощности; $\tau_u = 120$ нс; $\nu = 2$ кГц; энергия в импульсе $E_u = 0,60$ мДж; плотность энергии равна $E_{pu} = 37,68$ Дж/см².

При таких характеристиках лазерного излучения диаметр абляционного кратера на поверхности алюминия составляет 66 мкм, на поверхности нержавеющей стали 89 мкм.

В табл. 4.2 приведены значения скорости линейного перемещения луча лазера (ϑ) и число линий прохода луча лазера на 1 мм (n) для каждого вида созданных текстур, определенных как:

$$\vartheta = r \cdot d_{a.k.} \cdot \nu, \text{ мм/с},$$

где r – относительное расстояние между центрами абляционных кратеров, используемое при расчете скорости линейного перемещения луча лазера ($r = l / d_{a.k.}$), l – расстояние между центрами абляционных кратеров, мкм; $d_{a.k.}$ – диаметр абляционного кратера, мкм; ν – частота лазера, кГц;

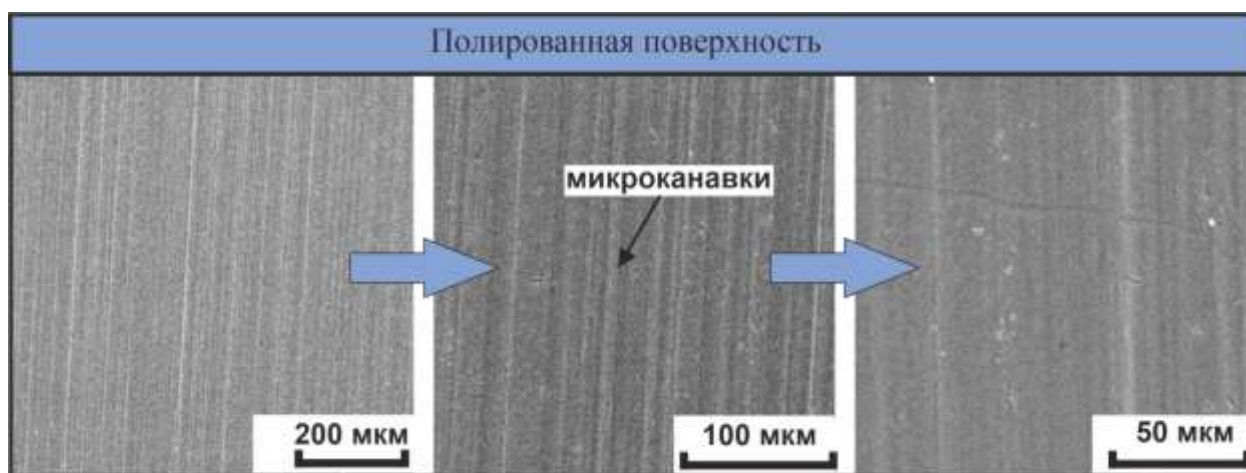
$$n = \frac{1}{r_m \cdot d_{a.k.}}, \text{ 1/мм}.$$

где r_m – относительное расстояние между центрами абляционных кратеров, используемое при расчете числа линий прохода луча лазера ($r = l / d_{a.k.}$).

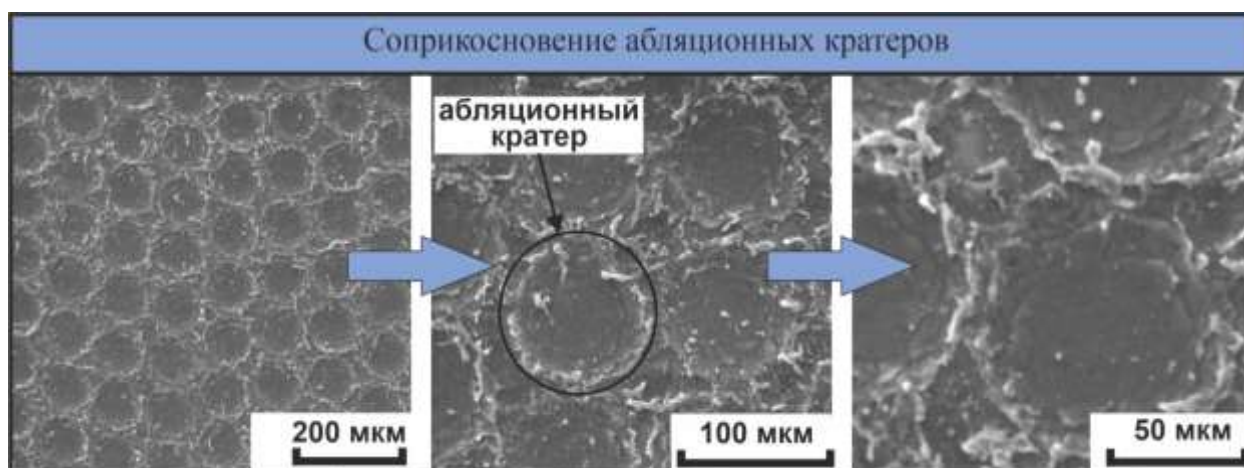
Таблица 4.2 – Значения скорости линейного перемещения луча лазера и числа линий прохода луча лазера

Вид текстуры	Алюминий			Нержавеющая сталь		
	v , мм/с	n , 1/мм	r / r_m	v , мм/с	n , 1/мм	r / r_m
Полированная	–	–	–	–	–	–
Соприкосновение абляционных кратеров	132	15,2	1 / 1	178	11,2	1 / 1
Микроканалы	13,2	15,2	0,1 / 1	17,8	11,2	0,1 / 1
Микростолбики	13,2	7,6	0,1 / 2	17,8	5,6	0,1 / 2
“Цветная капуста”	13,2	151,5	0,1 / 0,1	17,8	112,4	0,1 / 0,1

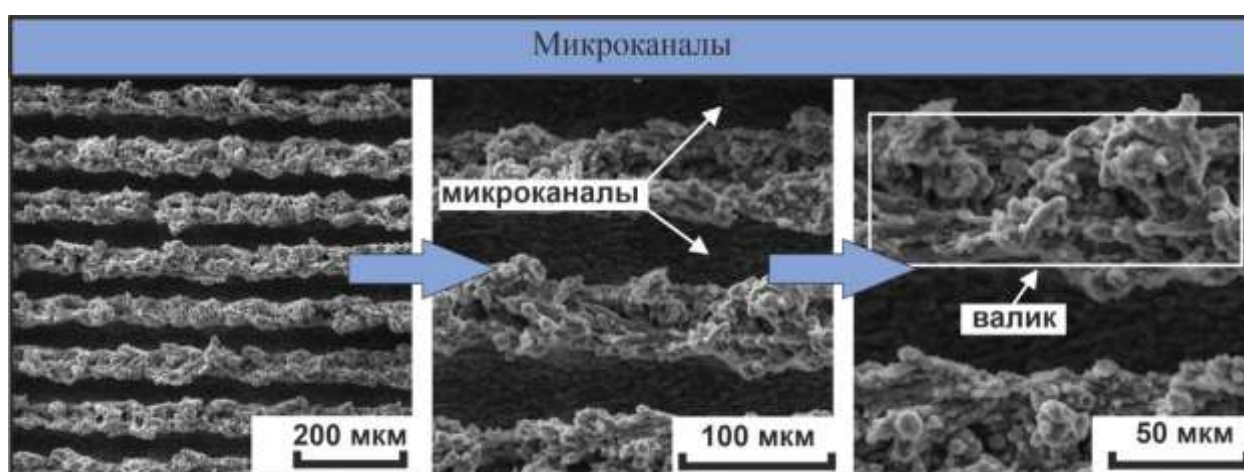
На рис. 4.5 – рис. 4.6 приведены СЭМ-изображения полированных поверхностей алюминия и нержавеющей стали, а также текстур, сформированных лазерным излучением.



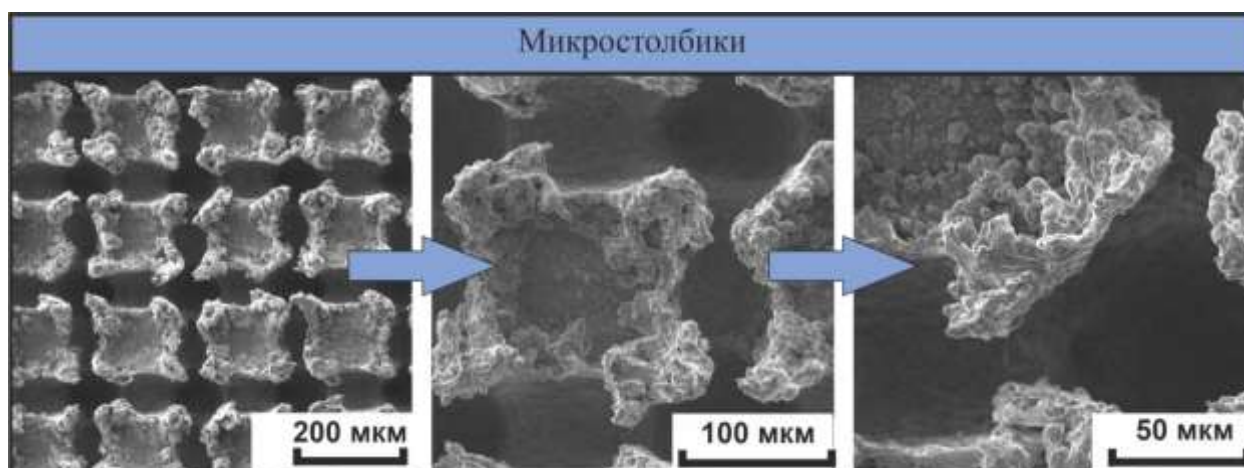
a



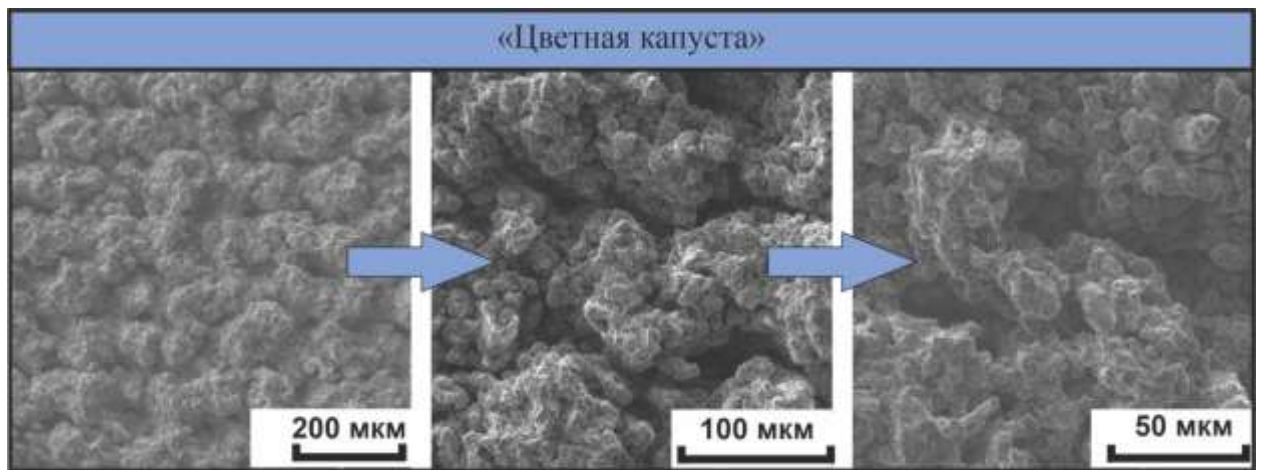
б



в



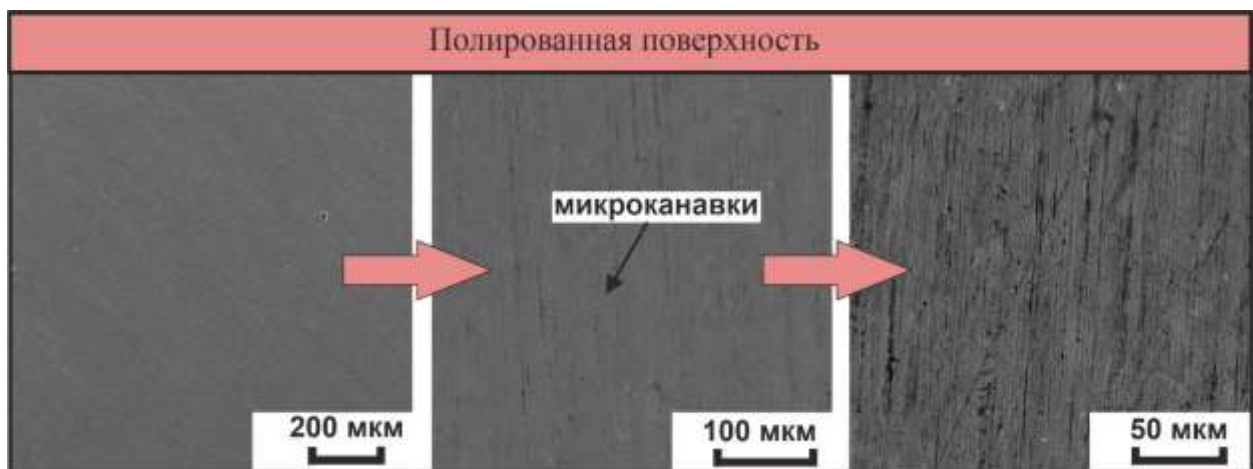
г



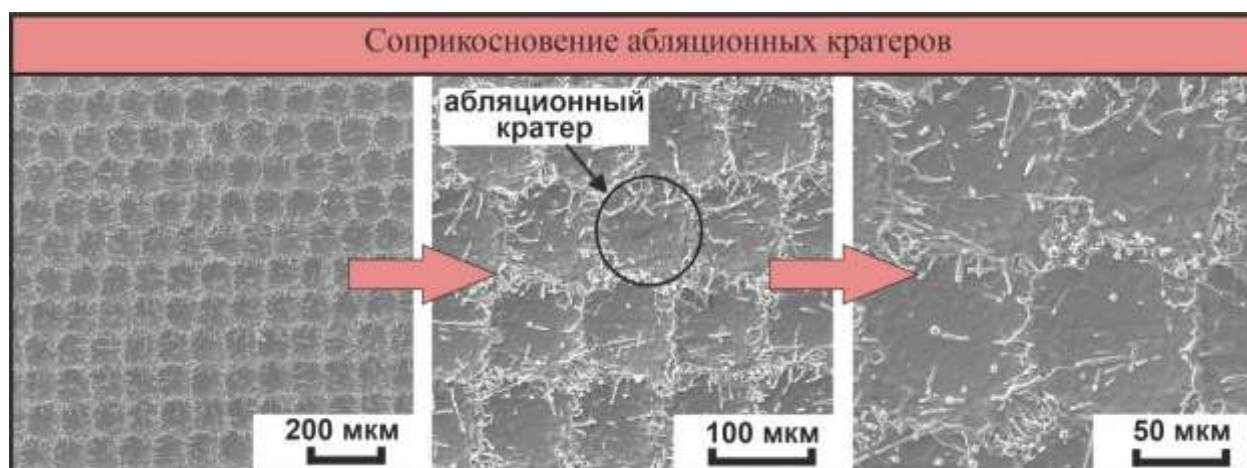
д

а – полированная поверхность, *б* – общие точки границ абляционных кратеров (соприкосновение абляционных кратеров), *в* – микроканалы, *г* – микростолбики, *д* – «цветная капуста». Увеличение изображений слева направо: низкое, среднее и высокое

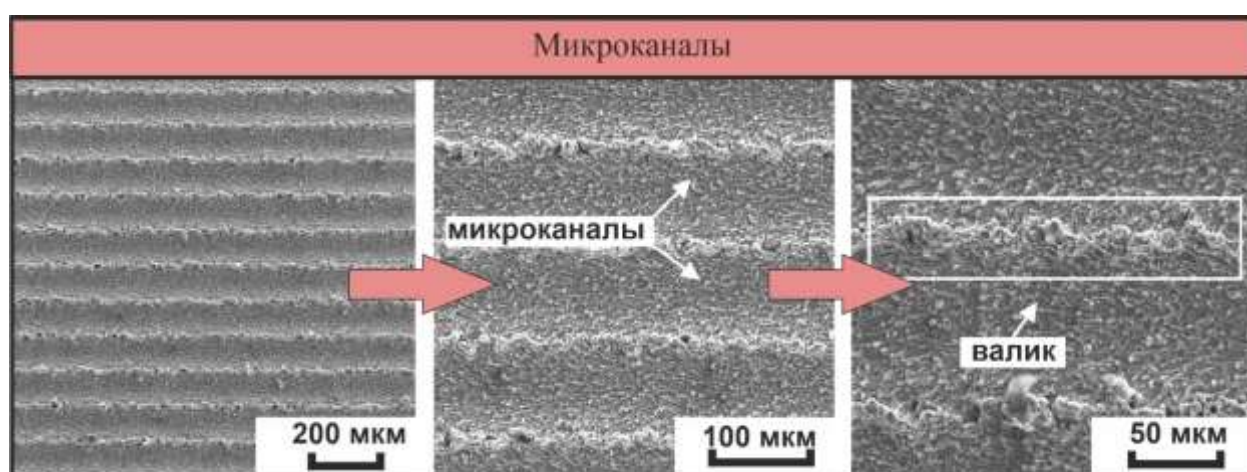
Рисунок 4.5 – СЭМ-изображения поверхностей алюминия [194]



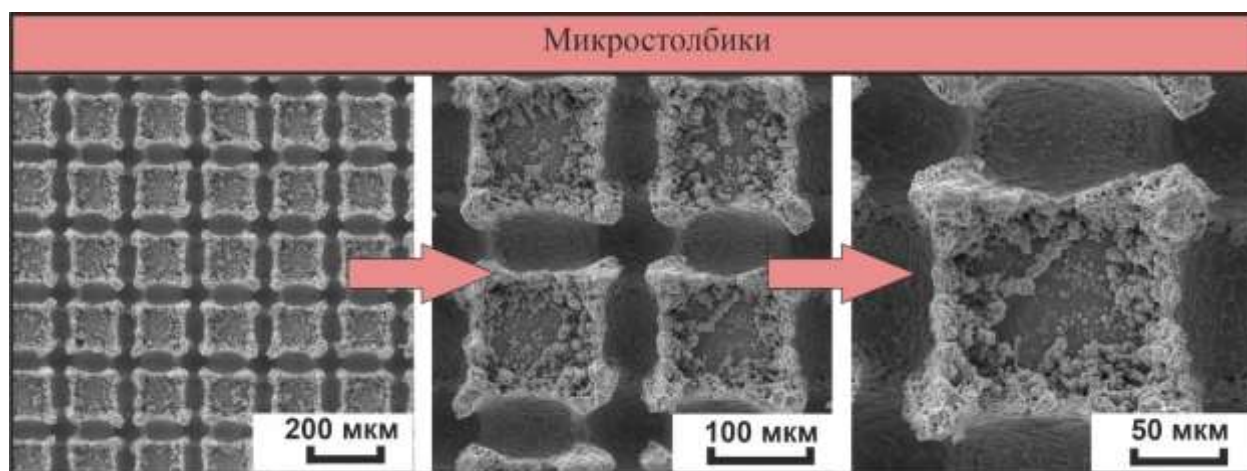
а



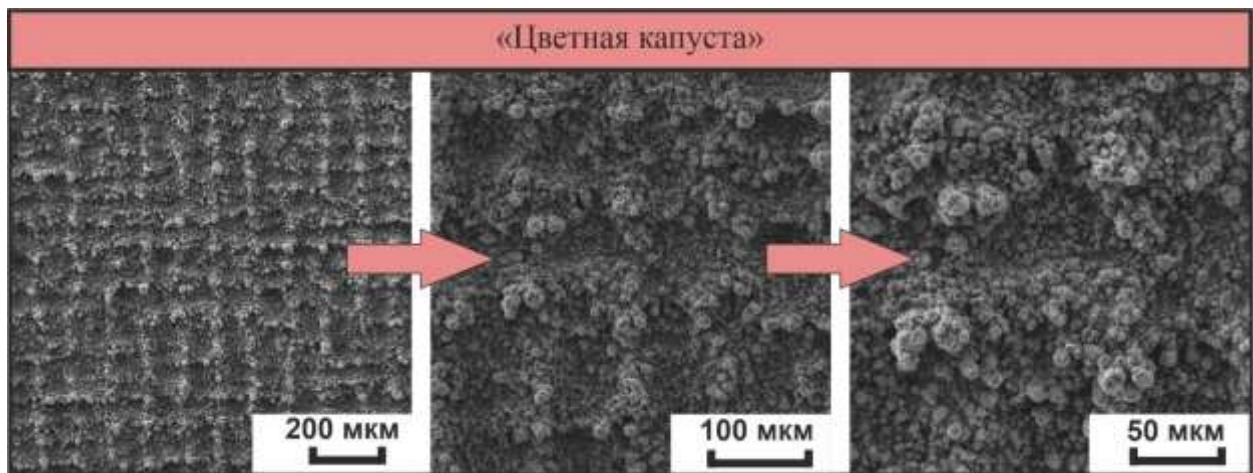
6



6



2



д

а – полированная поверхность, *б* – общие точки границ абляционных кратеров (соприкосновение абляционных кратеров), *в* – микроканалы, *г* – микростолбики, *д* – “цветная капуста”. Увеличение изображений слева направо: низкое, среднее и высокое

Рисунок 4.6 – СЭМ-изображения поверхностей нержавеющей стали [194]

Установлено, что после механической обработки абразивными материалами на полированной поверхности алюминия (рис. 4.5*а*) и нержавеющей стали (рис. 4.6*а*) формируется текстура, состоящая из произвольно расположенных микроканалов.

Из рис. 4.5 и рис. 4.6 видно, что в результате лазерной обработки поверхностей металлов сформировались все четыре вида прогнозируемых текстур с заданными геометрическими размерами. На поверхностях с текстурой в виде соприкасающихся кратеров (с общими точками границ абляционных кратеров) диаметры абляционных кратеров 66 мкм (рис. 4.5*б*) и 89 мкм (рис. 4.6*б*) равны заданным аналогичным характеристикам принятым по зависимостям $d_{a.к.} = f(N, \tau_u, \nu)$ для алюминия (рис. 4.3*а*) и для нержавеющей стали (рис. 4.4*а*). Текстура в виде микроканалов (рис. 4.5*в* и рис. 4.6*в*) сформировалась при наложении абляционных кратеров вдоль движения луча лазера. Расстояние между осями микроканалов соответствует заданному размеру, равному диаметру абляционных кратеров (рис. 4.5*в* и рис. 4.6*в*). При этом в точках общих границ микроканалов

сформировался валик (рис. 4.5в и рис. 4.6в). Поверхности металлов модифицировались лазерным лучом с гауссовым распределением энергии. Очевидно, что в центре луча плотность энергии выше, чем на его периферии, где кондуктивный теплоотвод в окружающую среду влияет на градиент температуры. Поэтому процессы плавления и абляции металла в области центра лазерного пятна (соответствует оси микроканала) происходят интенсивнее, чем на его периферии. Валик между микроканалами формировался в результате более интенсивного плавления и абляции материала по центру лазерного пятна, а также в результате действия ударной волны [201], инициированной лазерным лучом.

Аналогичный эффект зарегистрирован на поверхностях с текстурой в виде микростолбиков, сформированных в результате поочередного прохода луча лазера по осям, расположенных перпендикулярно друг к другу (рис. 4.5г и рис. 4.6г). Как и в случае с текстурой в виде микроканалов, на поверхностях с микростолбиками микроканалы сформировались по направлению движения луча. Как и ожидалось, в условиях 90%-го наложения абляционных кратеров в поперечном и продольном направлениях по ходу луча лазера сформировалась развитая многомодальная, разноуровневая шероховатость в виде “цветной капусты” (рис. 4.5д и рис. 4.6д).

По результатам анализа сформированных текстур методами конфокальной и электронной микроскопии определены трехмерные параметры шероховатости (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Значения трехмерных параметров шероховатости

Вид текстуры	Алюминий					Нержавеющая сталь				
	Sa, мкм	Sz, мкм	Sdr, %	Sku	Spd·10 ⁵ , 1/мм ²	Sa, мкм	Sz, мкм	Sdr, %	Sku	Spd·10 ⁵ , 1/мм ²
Полированная	0,31	0,8	0,7	5,53	1,44	0,11	0,4	0,3	4,65	1,22
Соприкосновение	3,37	17,0	5,3	5,33	7,89	1,43	7,0	3,2	4,56	4,22

абляционн ых кратеров										
Микрокана лы	24,03	190,0	106,6	3,69	8,69	9,76	53,0	45,9	3,44	5,11
Микростол бики	15,88	125,0	48,9	3,37	8,85	7,12	32,0	20,2	3,10	5,58
“Цветная капуста”	6,09	53,0	12,7	2,70	12,47	2,78	31,0	6,4	2,85	7,31

Из табл. 4.3 видно, что из сформированных текстур, текстура в виде микростолбиков характеризуется наиболее развитой средней шероховатостью (характеристика S_a), а также наибольшей высотой неровностей (разницей между выступами и углублениями по оценке параметра S_z). Как следствие, текстура в виде микростолбиков характеризуется наибольшим значением прироста площади поверхности за счет шероховатости (характеристика S_{dr}). Также из табл. 4.3 видно, что по анализу аналогичных параметров шероховатости сформированные текстуры можно расположить по уменьшению развитости шероховатости в последовательности микростолбики – микроканалы – “цветная капуста” – соприкосновение абляционных кратеров – полированная.

Параметр S_{ku} используется для оценки степени “плосковершинности” выступов. При значениях $S_{ku} \approx 3$ формируются выступы с симметричной гауссовой формой, плосковершинные выступы характеризуются $S_{ku} < 3$, а островершинные $S_{ku} > 3$. Из табл. 4.3 видно, что сформированные текстуры можно расположить по уменьшению островершинности в следующей последовательности полированная – соприкосновение абляционных кратеров – микростолбики – микроканалы – “цветная капуста”.

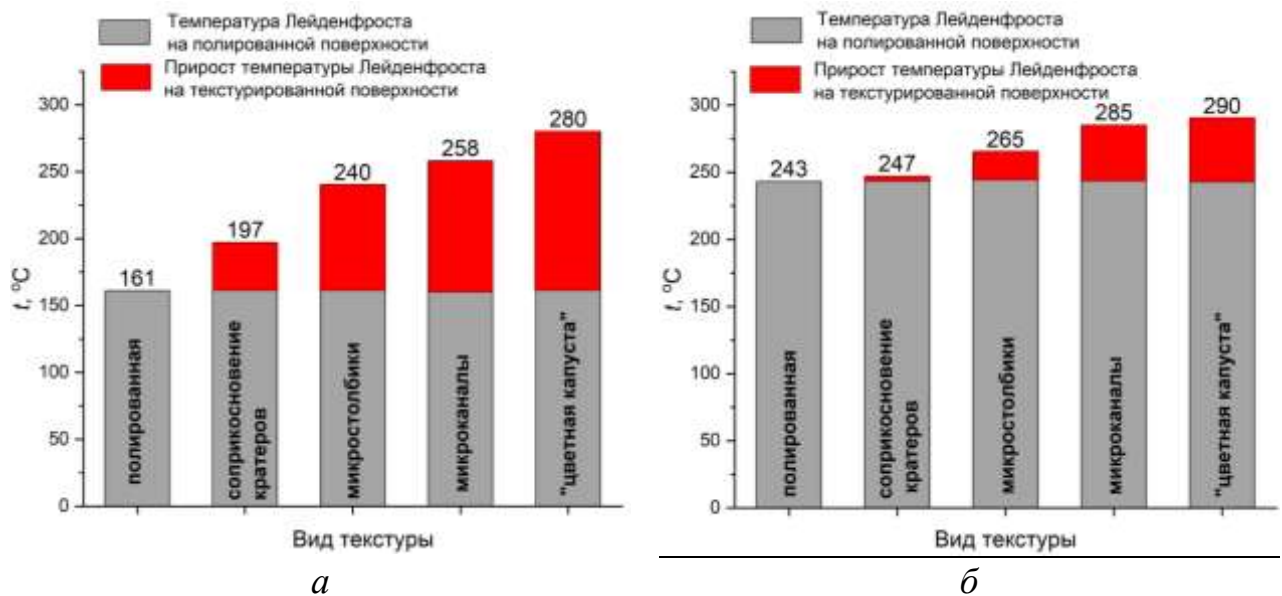
Параметр S_{pd} характеризует плотность выступов на единице площади. По увеличению значений этого параметра, сформированные текстуры можно расположить в последовательности полированная – соприкосновение абляционных кратеров – микростолбики – микроканалы – “цветная капуста”.

По результатам анализа контактных углов установлено, что полированные поверхности алюминия и нержавеющей стали характеризуются гидрофильными свойствами, с контактными углами $86,3 \pm 1,6^\circ$ и $80,0 \pm 2,0^\circ$, соответственно. Как и ожидалось после модификации лазерным излучением поверхности с текстурами в виде микростолбиков, микроканалов и “цветной капусты” характеризуются супергидрофильностью (капля растекается в тонкую пленку). Причины и механизм инверсии свойств смачиваемости (от гидрофильности к супергидрофильности) поверхностей металлов после их лазерной модификации в настоящее время достаточно хорошо изучены [202].

На поверхностях с текстурами в виде соприкасающихся абляционных кратеров также зарегистрировано улучшение свойств смачивания. Контактный угол на поверхности алюминия уменьшился до $5,0 \pm 1,0^\circ$, на поверхности нержавеющей стали до $8,3 \pm 1,0^\circ$. Механизм инверсии свойств смачивания на поверхностях с аналогичной текстурой в виде соприкасающихся абляционных кратеров, сформированных лазерным излучением, изучен в [203]. Так как поверхности с текстурами в виде микроканалов, микростолбиков и “цветной капусты” характеризуются аналогичными супергидрофильными свойствами, то основной вклад, влияющий на различие между значениями температур Лейденфроста на поверхностях металла одинакового элементного состава, оказывает шероховатость. Стоит отметить, что поверхности с текстурой в виде соприкасающихся кратеров близки по свойствам смачиваемости к супергидрофильным поверхностям. По этой причине можно сопоставить вклад влияния шероховатости (характеристик текстуры) данных поверхностей на смещение температуры Лейденфроста с поверхностями, демонстрирующими супергидрофильные свойства.

На рис. 4.7 приведены экспериментально установленные значения температур Лейденфроста (t , $^\circ\text{C}$) на поверхностях алюминия и нержавеющей стали. Из рис. 4.7 видно, что путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева типичных конструкционных металлов (алюминия и нержавеющей стали) лазерным излучением наносекундной длительности можно осуществить

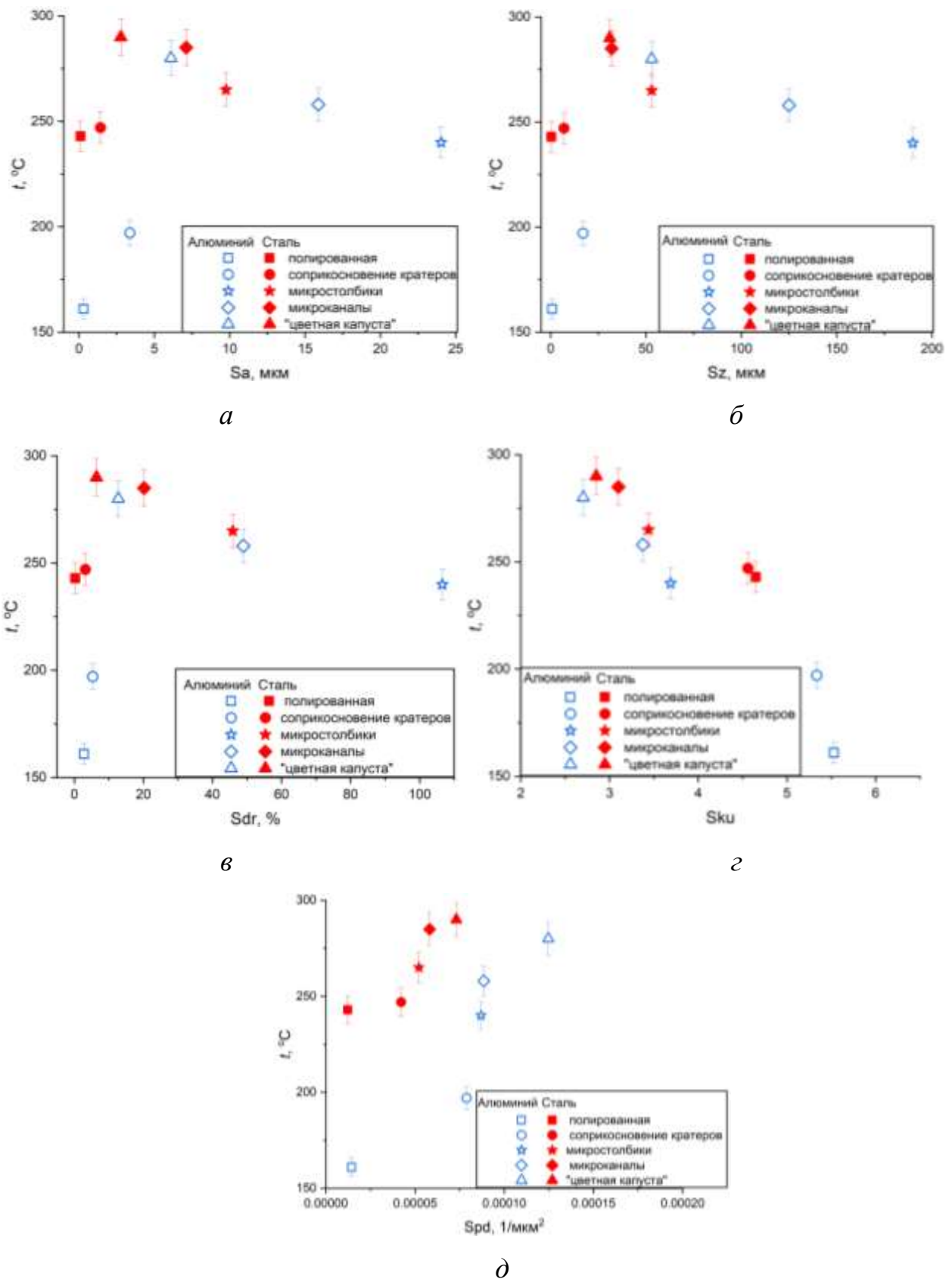
смещение кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур. Из рассматриваемых конфигураций текстур в виде соприкасающихся кратеров (с общими точками границ), микроканалов, микростолбиков и “цветной капусты” наибольшее смещение температуры возникновения кризиса теплообмена (точки Лейденфроста) в область больших температур зарегистрировано на поверхности с текстурой в виде “цветной капусты”. Для поверхности алюминия увеличение температуры составило 119 °С, для поверхности нержавеющей стали 47 °С. Очевидно, что рост температуры возникновения эффекта Лейденфроста обусловлен улучшением свойств смачиваемости и формирования развитой шероховатости. Большой прирост температуры на поверхностях алюминия по сравнению с нержавеющей сталью с одинаковым видом текстуры обусловлен тем, что на поверхности алюминия сформировалась более развитая шероховатость. Оценка последней проведена на основании анализа параметров шероховатости (табл. 4.3).



а – Поверхности: алюминия, *б* – нержавеющей стали

Рисунок 4.7 – Температура Лейденфроста

На рис. 4.8 приведены зависимости температуры Лейденфроста от трехмерных параметров шероховатости.



Параметры шероховатости: a – Sa , $б$ – Sz , $в$ – Sdr , $г$ – Sku , $д$ – Spd

Рисунок 4.8 – Зависимости температуры Лейденфроста от трехмерных параметров шероховатости поверхностей алюминия и нержавеющей стали

По результатам анализа рис. 4.8 установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью (рис. 4.8а), высотой между впадинами и вершинами (рис. 4.8б), а также приростом площади поверхности за счет шероховатости (рис. 4.8в). Из рис. 4.8г и рис. 4.8д видно, что температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности. Последнее можно объяснить тем, что формированию характерной для эффекта Лейденфроста шарообразной формы капли и стабильной “паровой подушки” между каплей и поверхностью препятствует высокая плотность плосковершинных выступов. Чем выше значение параметра Spd и меньше значение Sku тем выше вероятность разрушения капли. Но стоит отметить, что не установлено явной численной связи между значениями характеристик Spd и Sku и приростом температуры Лейденфроста на поверхностях алюминия и нержавеющей стали. Так, например, в случае поверхностей алюминия росту значений Spd более чем в 8,5 раза и уменьшению значений Sku более чем в 2 раза (отношение соответствующих параметров полированной поверхности и поверхности с текстурой в виде “цветной капусты” (табл. 4.3)) соответствует рост температуры Лейденфроста на $\approx 74\%$ (с $161\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.7а)). А в случае поверхностей нержавеющей стали росту значений Spd в 6 раз и уменьшению значений Sku более чем в 1,5 раза (отношение параметров Spd и Sku полированной поверхности и с текстурой в виде “цветной капусты”) соответствует рост температуры Лейденфроста на $\approx 19\%$ (с $243\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.7б)). Последнее обусловлено различием в элементном составе поверхностей и, следовательно, теплофизическими свойствами, влияющими на возникновение эффекта Лейденфроста.

По результатам анализа рис. 4.7 и рис. 4.8 установлено, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств, является наиболее перспективным по сравнению с механической

обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры в достаточно широких диапазонах значений управлять температурой Лейденфроста более чем 110 °С на поверхности алюминия и более чем на 45 °С на поверхности нержавеющей стали. Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развитую, многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее 3. Из исследованных видов текстур полированная, соприкосновение абляционных кратеров, микростолбики, микроканалы, “цветная капуста” наилучшие результаты достигнуты на текстуре в виде “цветной капусты”.

Выводы по главе 4

1. По результатам проведенных экспериментов условно выделено шесть возможных режимов воздействия одиночного лазерного импульса наносекундной длительности с энергией в импульсе до 1 мДж на поверхность нержавеющей стали и алюминия: 1) режим нагрева без модификации поверхности; 2) умеренное плавление; 3) интенсивное плавление; 4) формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки); 5) формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности; 6) формирование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла.

2. Экспериментально показана возможность применимости графоаналитической методики [164], разработанной для прогнозирования текстур на поверхностях керамики, базирующейся на знании геометрической формы и размеров элемента текстуры (абляционного кратера), для создания заданных

микротекстур на поверхностях алюминия и нержавеющей стали в виде абляционных кратеров, микроканавок, микростолбиков и “цветной капусты”.

3. Экспериментально установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью, высотой между впадинами и вершинами, а также приростом площади поверхности за счет шероховатости. Также установлено, что температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности.

4. Экспериментально доказано, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств, является наиболее перспективным по сравнению с механической обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры и создания экстремальных свойств смачивания (супергидрофильности) в достаточно широких диапазонах значений управлять характеристиками кризиса кипения 2 рода, а именно, температурой Лейденфроста более чем 110°C на поверхности алюминия и более чем на 45°C на поверхности нержавеющей стали. Зарегистрированные сдвиги температур Лейденфроста характерны для кризиса кипения в атмосферных условиях с использованием дистиллированной деаэрированной воды в качестве теплоносителя на сформированных лазерным излучением текстурах в условиях энергии в импульсе до 0,6 мДж.

Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развитую, многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее 3. Различия в величине сдвига температуры Лейденфроста на

разных металлах (алюминий, нержавеющая сталь) обусловлены, главным образом, формируемой текстурой и шероховатостью. По причине того, что после лазерного способа обработки поверхности алюминия и нержавеющей стали характеризуются подобными свойствами смачивания (супергидрофильностью / гидрофильностью). По результатам анализа параметров шероховатости на поверхностях алюминия сформирована более развитая шероховатость по сравнению с поверхностями стали. По этим причинам сдвиг температуры Лейденфроста на поверхностях алюминия превышает аналогичную характеристику на поверхностях нержавеющей стали.

Полученные результаты могут быть использованы при решении актуальных проблем теплофизики, направленных на повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем создания поверхности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) с целевыми функциональными свойствами после модификации поверхностей лазерным излучением наносекундной длительности. Примерами энергонасыщенного оборудования являются устройства связи пятого поколения 5G, атомные реакторы, микропроцессоры суперкомпьютеров и радиоэлектронные устройства авиа- и космических аппаратов.

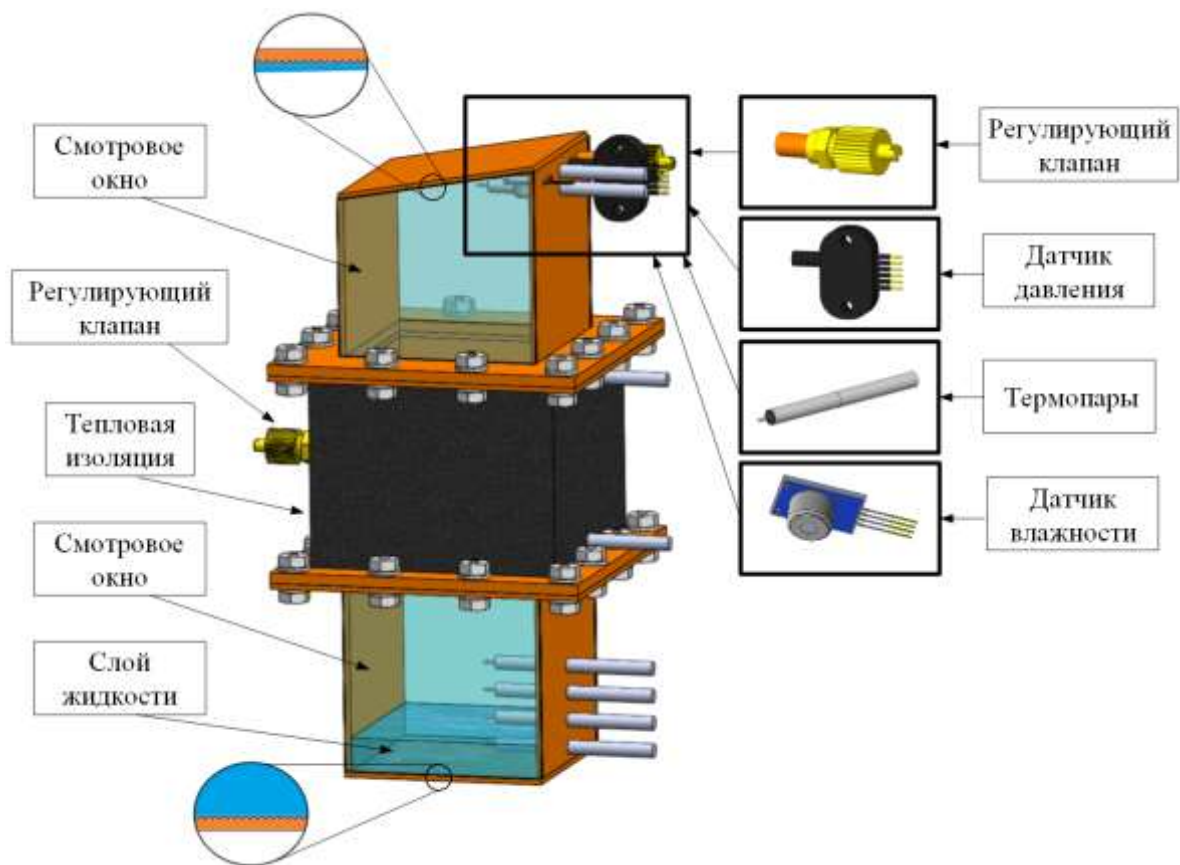
ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОСИФОНА

В главе представлены результаты исследования системы охлаждения на базе двухфазного термосифона.

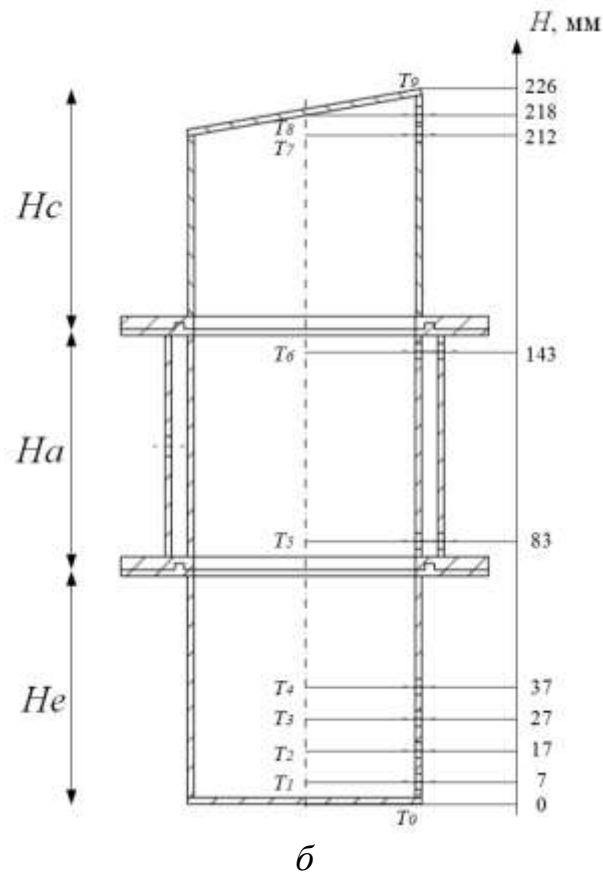
5.1 Экспериментальная установка и методика исследования

5.1.1 Экспериментальная установка

На рисунке 5.1 представлена модель закрытого двухфазного термосифона, оснащенная системами фото- и видеофиксации процессов испарения и кипения теплоносителя на верхней поверхности нижней крышки и образования конденсата на нижней поверхности верхней крышки. Модель также оснащена системами регистрации давления, влажности и температур в характерных сечениях устройства.



a



a – схема расположения регистрирующих устройств в термосифоне, *б* –
схема расположения термопар

Рисунок 5.1 – Экспериментальная установка – модель закрытого
двухфазного термосифона

Экспериментальная установка – модель термосифона (рисунок 5.1) высотой $H_{CT}=226$ мм изготовлена из меди М1 и условно разделена на три части (рис. 5.1б): испарительную ($H_e=75$ мм), адиабатную ($H_a=76$ мм) и конденсационную ($H_c=75$ мм). Согласно рекомендациям [204] термосифон изготовлен разборным (части соединены с помощью фланцев с резиновыми прокладками); толщина стенок $\delta_{s,w}=2$ мм. Геометрия корпуса установки выбиралась таким образом, чтобы выполнялось условие стесненности [204] $d_h/H_e \approx 1$ (d_h – гидравлический диаметр), при котором процесс кипения в термосифоне был подобен процессу кипения в условиях свободного движения жидкости, а предельные тепловые потоки в ТС не зависели бы от d_h .

Адиабатная часть ТС изготовлена в виде кожуха (трубы в трубе), из которого через регулирующий клапан откачан воздух, что обеспечивало высокую теплоизоляцию транспортной части ТС (рис. 5.1а). Внешняя поверхность стенок этого участка покрыта алюминиевой фольгой и вспененным каучуком с целью уменьшения теплопотерь в результате переноса теплоты теплопроводностью по вертикальным стенкам. Во время проведения экспериментов фланцевые соединения между частями термосифона покрывались алюминиевой фольгой с целью уменьшения теплоотвода от этих элементов конструкции в окружающую среду.

Верхняя крышка термосифона выполнена под углом 10° к горизонту. Такой наклон обеспечивал стекание конденсата преимущественно по одной стороне ТС. Верхняя поверхность нижней крышки и нижняя поверхность верхней крышки термосифона текстурированы лазерным излучением. Текстура сформированна в виде кратеров с общими границами. Известно [174,205], что за счет изменения текстуры и элементного состава можно изменить функциональные свойства поверхности. Две противоположные стенки испарительной и конденсационной частей термосифона выполнены из кварцевого стекла с целью визуализации процессов испарения, кипения и конденсации (рис. 5.1а).

В конденсационной части ТС расположен регулирующий клапан, через который с помощью вакуумного насоса BC-VP-215 (Becool, Россия) из термосифона откачивались неконденсирующиеся газы (воздух). Давление в термосифоне регистрировалось пьезорезистивным преобразователем MPX5700GP (Freescale, США). Влажность в ТС регистрировалась вблизи верхней крышки конденсатора цифровым модулем HYT 221 (Innovative Sensor Technology IST AG, Швейцария) с водонепроницаемым металлическим фильтром, обеспечивающим защиту датчика от капель жидкости. Тренды температур в характерных точках термосифона регистрировались термопарами ДТПК031-0.5/0.05/1.5 (ОВЕН, Россия). Спаи термопар располагались внутри термосифона на его оси симметрии (рис. 5.1б), регистрировали температуру: слоя жидкости в испарителе (T_1); пара в испарительной (T_2-T_4), адиабатной (T_5-T_6) и конденсационной (T_7) частях;

конденсата в конденсаторе (T_8). Температуры внешних поверхностей нижней и верхней крышек регистрировались термопарами T_0 и T_9 , соответственно.

Исследования проведены на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рисунке 5.2.

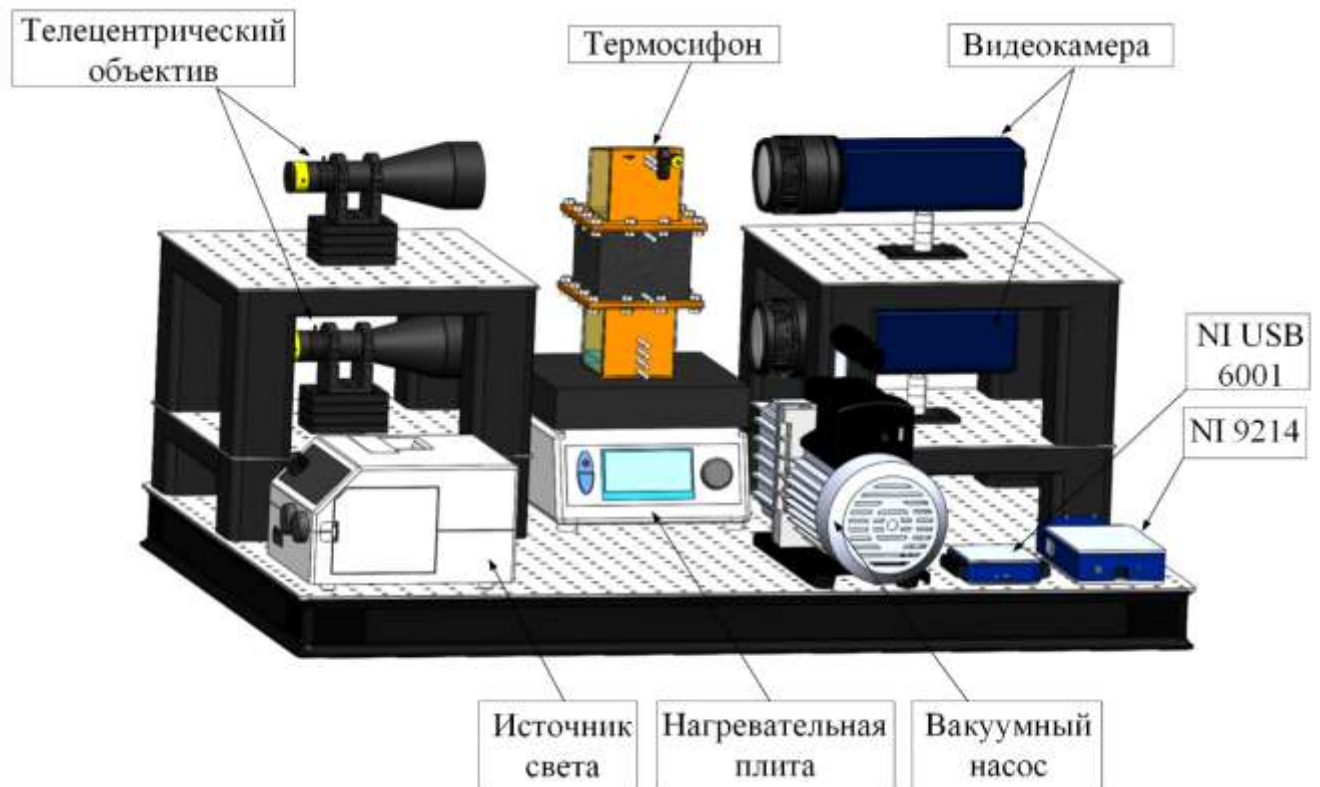


Рисунок 5.2 – Схема экспериментального стенда

Термосифон (рис. 5.2) заполнялся ($\varepsilon_e=15\%$) теплоносителем (деаэрированной дистиллированной водой) с помощью шприца через регулирующий клапан в конденсаторе. С помощью вакуумного насоса ВС VP 21 (Вескоол, Россия), который подсоединялся к этому же клапану, из термосифона откачивались неконденсирующиеся газы до достижения давления $P_0 \approx 19,5 \pm 0,5$ кПа. Относительная влажность в термосифоне во время экспериментов составляла 99,9%. Показания датчиков давления, влажности и термопар передавались с помощью аналого-цифровых модульных преобразователей NI 9214 (National Instruments, США) и NI USB-6001 (National Instruments, США) на компьютер. Определение основных параметров (температуры теплоносителя в

жидком и газообразном состоянии, давление, влажность) проходило с использованием специального программного обеспечения LabView.

Тепловое воздействие на испарительную часть термосифона реализовывалось с помощью системы нагрева, включающей в себя нагревательную плиту ПЛК-1818 (Томьяналит, Россия). Отвод теплоты от конденсационной части осуществлялся за счет теплообмена с окружающей средой (воздухом с температурой 26 ± 2 °C) в условиях естественной конвекции. Квазистационарное состояние работы термосифона принималось, когда температура жидкости не изменялась более чем на $\pm 0,1$ °C в течении 15 минут.

Термическое сопротивление термосифона определялось по отношению разницы температур между нижней и верхней крышками ТС к тепловому потоку [204]:

$$R_{CT} = \frac{\Delta T}{q}$$

При расчете термического сопротивления ТС использованы средние значения температур в квазистационарном состоянии.

Регистрация пузырьков пара, капель и пленок конденсата в экспериментах проводилась теневым оптическим методом, включающим в себя систему из двух высокоскоростных видеокамер FastVideo 500M (НПО Астек, Россия) с объективами Sigma AF 105mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro Nikon F с одной стороны термосифона и галогеновых источников света (Edmunds Optics, США) с двумя телецентрическими объективами (системами линз) для создания двух пучков плоскопараллельного света с другой стороны ТС. Такая система позволяла визуализировать процессы испарения, кипения, конденсации через смотровые окна термосифона, проводить анализ форм капель и пузырьков на нижней и верхней крышках ТС и исследовать свойства смачиваемости внутренних текстурированных после импульсной лазерной обработки поверхностей нижней и верхней крышек.

5.1.2 Область варьирования факторов

По результатам анализа литературных источников [119,120] установлено, что температура теплоносителя в реакторах типа MTR, ETR находится в диапазоне 40-60 °С, а температура поверхности твэлов в низкоэнергетических реакторах типа CM-2, SL-1, HFTR с пластинчатыми твэлами, выполненными из сплава алюминия с никелем, не превышает 215 °С. С целью обоснования возможности охлаждения термосифоном теплонагруженных элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах в экспериментах температура нагревательной плиты варьировалась в диапазоне от 40 до 220 °С с шагом 20 °С.

Тепловой поток, подведенный к термосифону от нагревательной плиты с температурой поверхности в диапазоне от 40 до 140 °С, определялся измерителем плотности теплового потока ИПП-2 (ЭКСИС, Россия) прижимного типа. Плотность теплового потока от плиты, поверхность которой нагрета до высоких температур (от 160 до 220 °С) определялась по линейной аппроксимационной зависимости, полученной по результатам серии измерений q в диапазоне температур 70÷150 °С с шагом 10 °С. В таблице 1 приведена область варьирования теплового потока, подведенного от плиты ПЛК-1818 к зоне интенсивного испарения теплоносителя.

Таблица 5.1 – Температура поверхности нагревательной плиты и плотности теплового потока в экспериментах

Температура поверхности плиты T_{heater} , °С	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
Плотность теплового потока q , кВт/м ²	0,7	1,8	3,2	5,1	6,8	8,2	10,0	11,7	13,4	15,0

5.1.3 Оценка погрешностей измерений

Тарировка термопар, регистрирующих температуры в характерных точках внутреннего объема термосифона и крышек ТС, проводилась с помощью

программы Virtual Instrument (VI), разработанной в графической среде LabView (рис. 5.3).

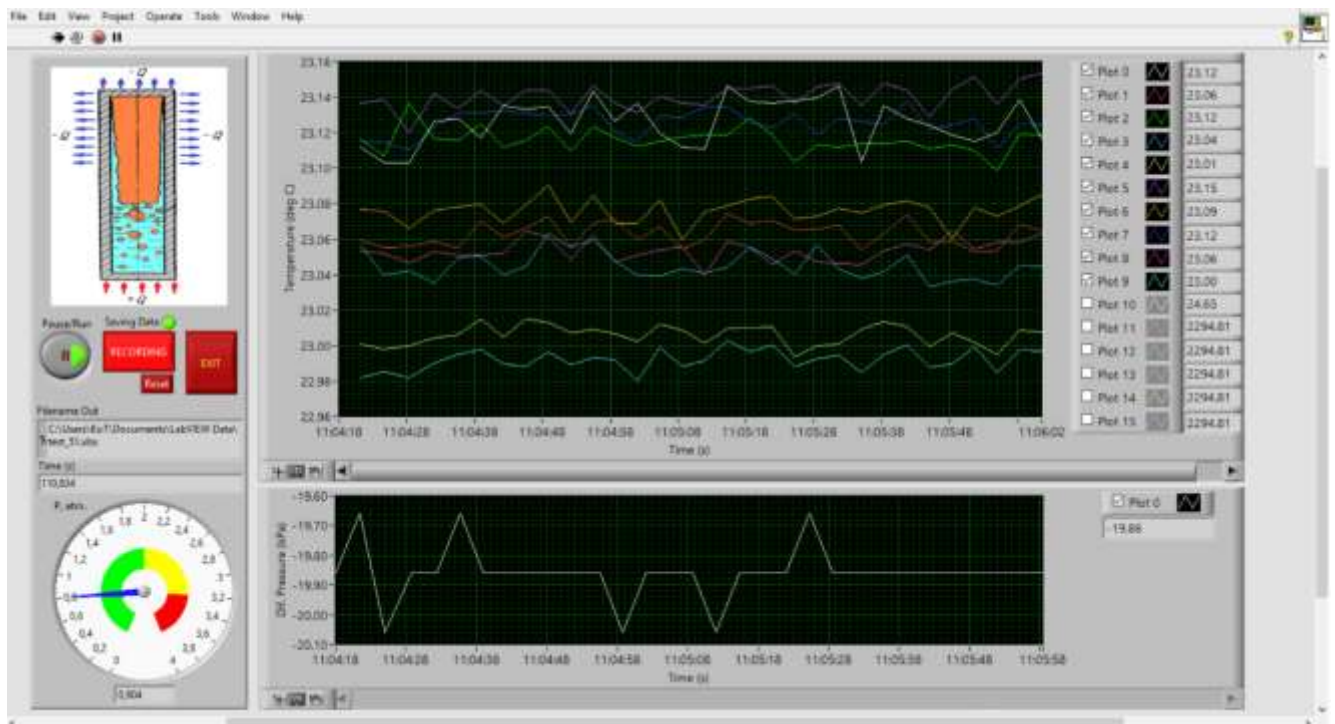


Рисунок 5.3 – Окно программы Virtual Instrument в процессе тарировки термопар

Регистрация температур нижней границы нижней крышки (T_0) и верхней границы верхней крышки (T_9) проводилась с большей (до 10%) погрешностью, по сравнению с температурами, зарегистрированными термопарами (T_1 - T_8) в характерных точках внутреннего объема ТС. Последнее обусловлено их креплением на термосифоне (не идеальный контакт спая термопары с поверхностью крышек). Повторяемость экспериментальных данных подтверждалась серией из 3-5 экспериментов в идентичных условиях. В таблице 5.2 приведены систематические (инструментальные) погрешности прямых измерений.

Таблица 5.2 – Систематические (инструментальные) погрешности прямых измерений

Инструмент	Погрешность	Размерность
Термопара ДТПК031-0.5/0.05/1.5	$\pm 0,1$	$^{\circ}\text{C}$
Шприц	± 1	мл
Измеритель плотности теплового потока ИПП-2	± 1	Вт/м^2
Пьезорезистивный преобразователь МРХ5700GP	$\pm 0,01$	кПа
Цифровой модуль НУТ 221	$\pm 0,1$	%

Оценка случайных погрешностей измерений проводилась по выражению [206]:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2} \quad (5.1)$$

Максимальная погрешность определения термического сопротивления термосифона не превышала 7%.

5.2 Результаты экспериментальных исследований

5.2.1 Изменение текстуры приповерхностного слоя металлических поверхностей

С помощью фрезерного станка и аргонной сварки изготовлены две испарительные, одна транспортная и две конденсационные части термосифона из меди М1, элементный состав которой приведен в таблице 5.3.

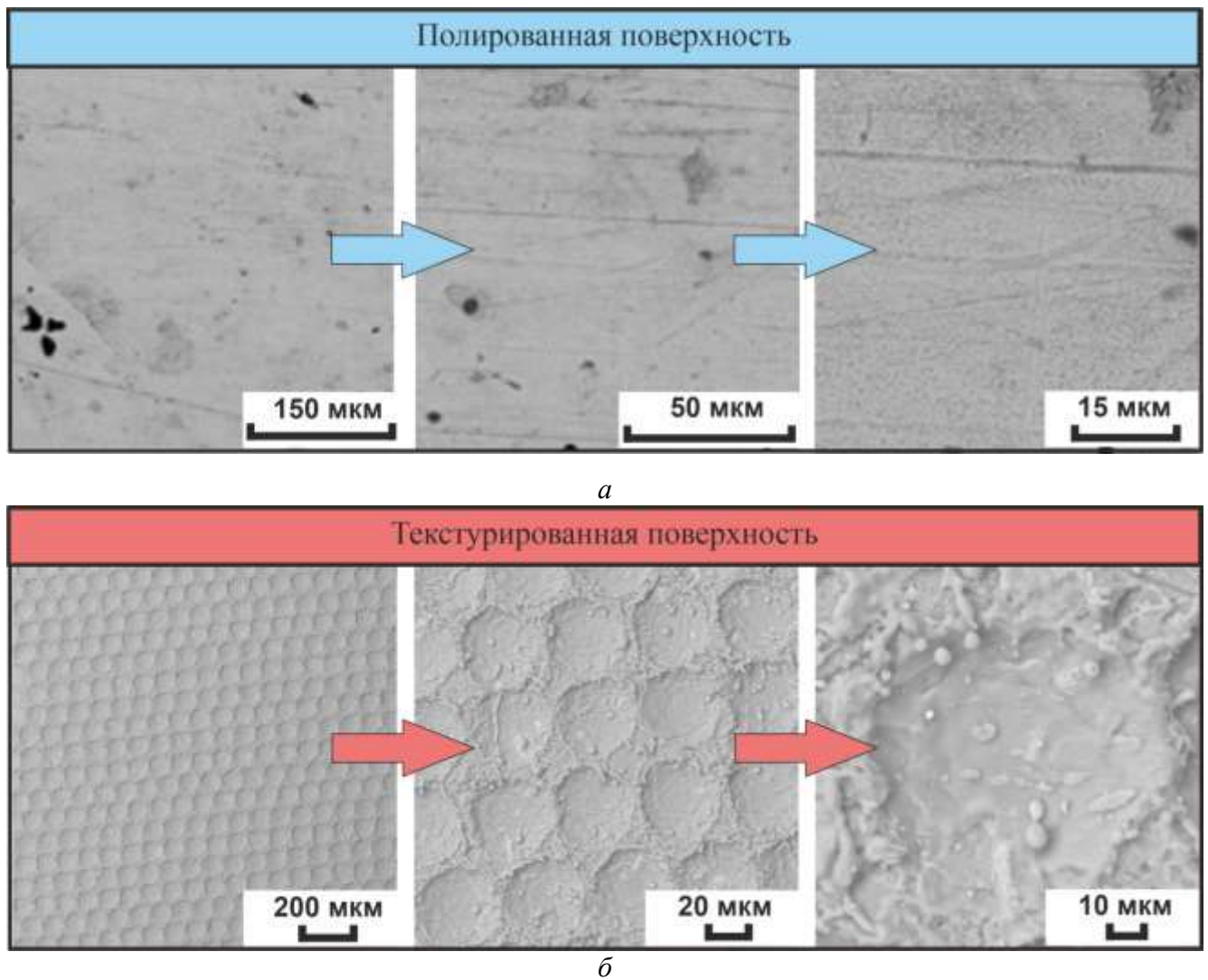
Таблица 5.3 – Элементный состав меди

Химический элемент	Содержание, %
Медь (Cu)	99,923
Кислород (O)	0,050
Железо (Fe)	0,005
Свинец (Pb)	0,005
Сера (S)	0,004

продолжение таблицы 5.3

Цинк (Zn)	0,004
Мышьяк (As)	0,002
Никель (Ni)	0,002
Сурьма (Sb)	0,002
Олово (Sn)	0,002
Висмут (Bi)	0,001

Все стенки частей ТС были отполированы шлифовальным войлоком. Далее на установке MiniMarket-2 при использовании иттербиевого импульсного наносекундного волоконного лазера IPG Photonics (НТО ИРЭ-Полус, Россия) с длиной волны 1064 нм проводилось текстурирование верхней поверхности нижней крышки одного испарителя и нижней поверхности верхней крышки одного конденсатора. Текстура нанесена при мощности $N=20$ Вт (100%); длительности импульса $\tau=200$ нс; частоте следования (частота повторения импульсов) $f=20$ кГц; линейной скорости луча 678 мм/с и количеством линий прохода 30 на 1 мм. По аналогии с текстурированием алюминиевых сплавов [174,205] при таких условиях текстура приповерхностного слоя металла характеризуется перекрытием границ образованных соседних кратеров, так как расстояние между их центрами не превышает диаметра светового пятна луча лазера. Изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), полированной и текстурированной лазерным излучением поверхностей меди приведены на рисунке 5.4.



а – полированной, *б* – текстурированной лазерным излучением поверхностей меди

Рисунок 5.4 – СЭМ-изображения поверхностей обработанных абразивными дисками и лазерным излучением

Более темные фрагменты на изображениях (рисунок 5.4), полученных при помощи электронного сканирующего микроскопа Hitachi TM-3000, имеют меньшую плотность. Показано (рис. 5.4*а*), что на полированном образце хаотично расположены включения железа, серы, цинка и других элементов, входящих в элементный состав меди (таблица 5.3), а также углубления и выступы нанометрового размера. На текстурированной лазерным излучением поверхности (рис. 5.4*б*) отсутствуют явные области отдельных включений. Это связано с тем, что энергии луча было достаточно для инициации термохимических процессов, в

результате которых в приповерхностном слое меди происходили значительные изменения в текстуре и элементном составе. Установлено, что в результате лазерного текстурирования повышается химическая однородность приповерхностного слоя металла, образованного струйками и каплями закристаллизованного металла.

Помимо анализа текстуры поверхностей, проведено сравнение характеристик шероховатости, так как этот параметр значительно влияет на функциональные свойства металла, в первую очередь, на смачиваемость. Оценка шероховатости проводилась при помощи профилометрического комплекса Micro Measure 3D station. В качестве основных значимых параметров шероховатости приняты трехмерные высотные (среднее арифметическое отклонение поверхности S_a , максимальная высота неровностей профиля S_z , асимметрия распределения высот S_{sk} , эксцесс распределения высот S_{ku}) и гибридный (среднее квадратичное отклонение наклонов неровностей поверхности S_{dq}) параметры (таблица 5.4).

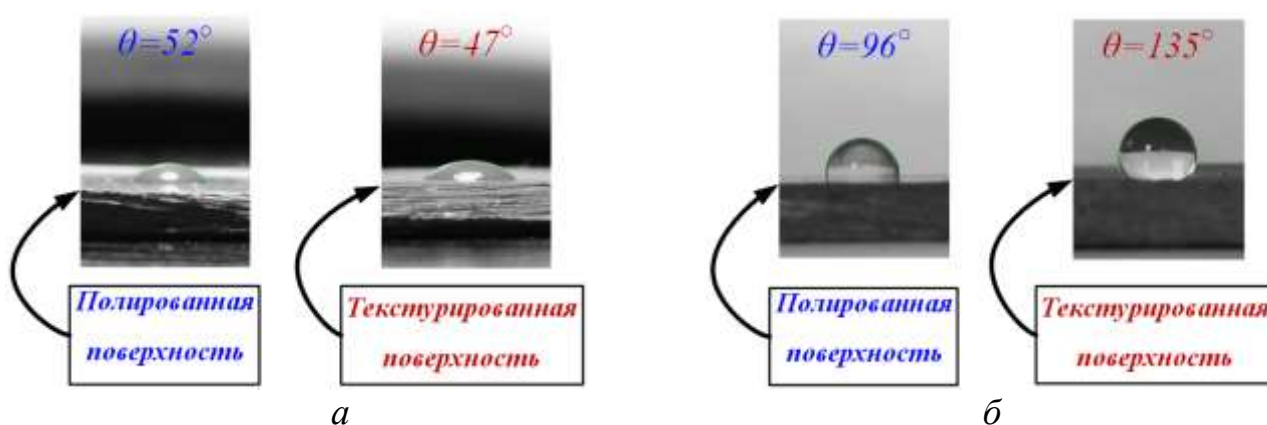
Таблица 5.4 – Трехмерные параметры шероховатости

Параметр	Полированная поверхность	Текстурированная поверхность
S_a , мкм	0,047	19,783
S_z , мкм	0,870	140,000
S_{sk}	-0,032	-11,213
S_{ku}	3,100	15,588
S_{dq}	0,044	10,482

По результатам исследований параметров шероховатости (таблица 5.4) среднее арифметическое отклонение профиля полированной поверхности составило $S_a = 0,047$ мкм (поверхность близка к молекулярно-гладкой), что на несколько порядков ниже чем у текстурированной лазерным излучением. Большому значению параметра S_z соответствуют высокие энергетические барьеры в виде выступов и углублений при растекании капель жидкости по текстурированной поверхности. Большее значение параметра S_{sk} у текстурированной поверхности по сравнению с полированной свидетельствует о

большей асимметрии расположения углублений и выступов. Более высокая величина параметра Sku , указывает на значительную асимметрию в гауссовом распределении этих неровностей (плосковершинное распределение). Гибридный параметр Sdq зависит одновременно от пространственного расположения неровностей и от их высот. Текстурированная лазерным излучением поверхность характеризуется хаотично расположенными брызгами и каплями затвердевшего металла, что приводит к значительному отклонению её от молекулярно-гладкой поверхности ($10,482 \gg 0,044$).

Смачиваемость металлов определялась по статическому углу капли, дозированной на полированную и текстурированную поверхности (рис. 5.5а). Чтобы кардинально изменить свойства смачиваемости исследуемых поверхностей, последние нагревались при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 6 часов. Чтобы избежать возможного изменения зарегистрированных квазистатических углов в результате серии измерений оценка θ проводилось теневым методом через 1 месяц после нагрева металлических поверхностей (рис. 5.5б).



а – до нагрева, б – после (с выдержкой 1 месяц)

Рисунок 5.5 – Фотоизображения испаряющейся капли воды на полированной и текстурированной поверхностях

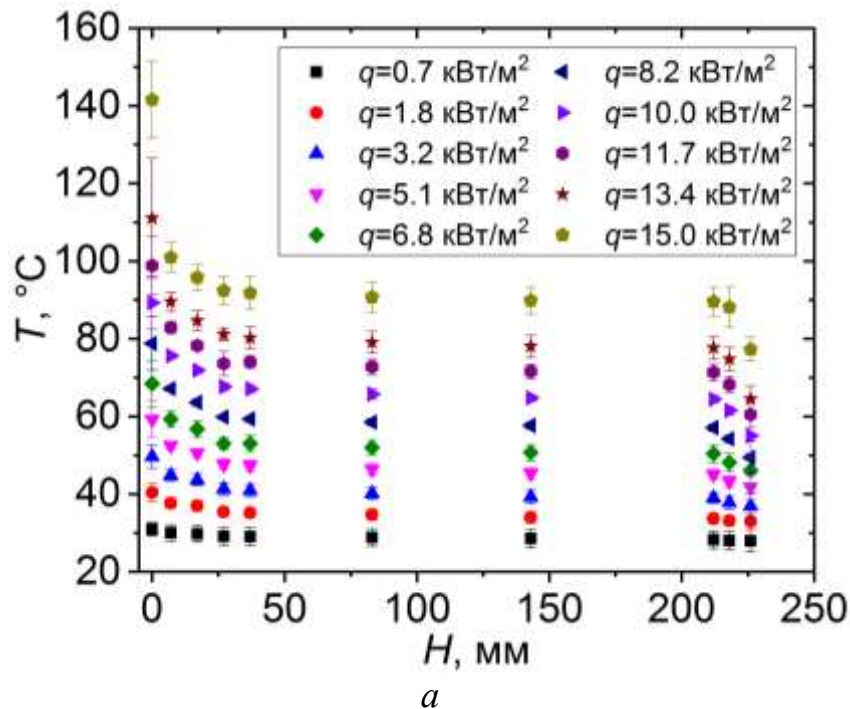
Сделан вывод, что полированная и текстурированная поверхности меди до нагрева были гидрофильны. Нанесение текстуры привело к небольшому улучшению смачиваемых свойств поверхности. Однако после нагрева и выдержки

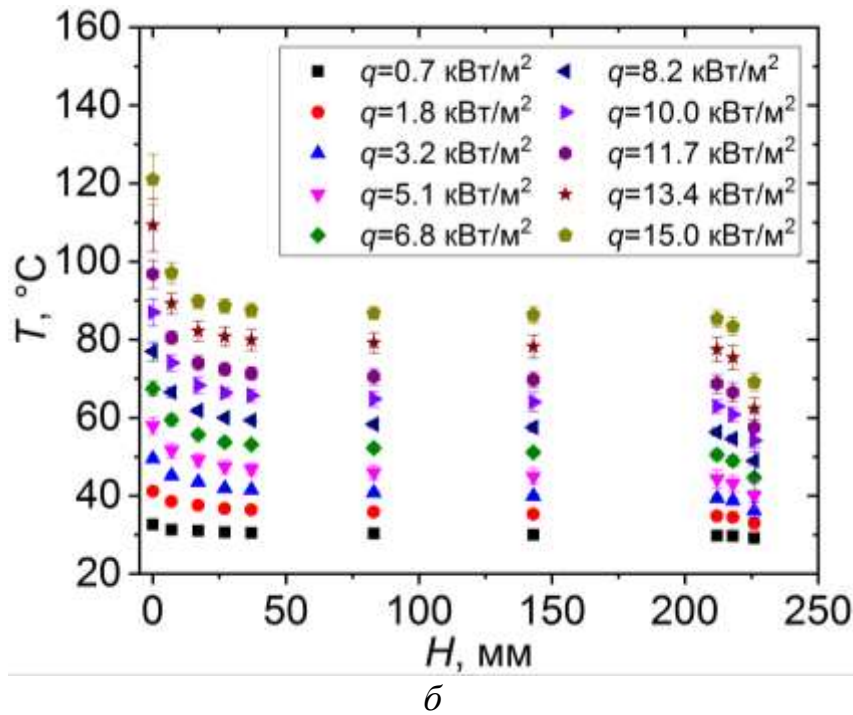
1 месяц обе поверхности стали гидрофобными. Статический угол на текстурированной лазерным излучением поверхности меди составил 135° , что почти на 40° больше по сравнению с полированной поверхностью. Показано (рис. 5.6), что текстура, образованная струйками и каплями закристаллизованного металла, позволяет кардинально изменить функциональные свойства поверхности от гидрофильности до гидрофобности (изменение статического угла составляет почти 90 градусов).

5.2.2 Особенности процессов теплопереноса в термосифоне

Оценка влияния текстуры внутренних поверхностей нижней и верхней крышек термосифона на условия возникновения процессов испарения, кипения и конденсации теплоносителя проведена по результатам двух серий экспериментов, отличающихся текстурой приповерхностного слоя крышек ТС: 1) полированная и 2) текстурированная.

По результатам выполненных серий экспериментов установлены распределения температур по высоте термосифонов (рис. 5.6).





a – с полированными, b – текстурированными крышками при различных тепловых режимах ($q=0,7-15$ кВт/м²)

Рисунок 5.6 – Распределения температур по высоте термосифона

Установлено (рис. 5.6), что с ростом теплового потока температура крышки в испарительной части ТС увеличивается интенсивнее, чем T крышки конденсатора. Как следствие перепад температуры по высоте испарителя в квазистационарных режимах работы ТС был выше (в 2 - 6 раз) чем в конденсационной части. Это связано с тем, что в испарителе тепловой поток был направлен перпендикулярно нижней крышке. В результате этого возникал большой перепад температуры по высоте испарительной части: в слое жидкости нижняя граница нагревалась за счет подведенного теплового потока, на верхней границе осуществлялся процесс интенсивного испарения, сопровождающийся поглощением теплоты, а образованный пар, перемещаясь в адиабатную часть ТС, постепенно остывал, снижая свою температуру. Конденсатор охлаждался в условиях свободной конвекции, т.е. пар по высоте конденсатора незначительно снижал свою температуру. Наибольший перепад T в конденсаторе

зарегистрирован между слоем конденсата и внешней поверхностью верхней крышки ТС.

Анализ рисунка 5.6 показал, что распределения температур в термосифоне как с полированными, так и с текстурированными крышками, на первый взгляд, практически не отличаются. Действительно, в диапазоне тепловых потоков от 0,7 до 8,2 кВт/м² температуры в том и другом термосифоне лежат в пределах погрешности. Однако с ростом теплового потока от 10 до 15 кВт/м² температуры по всей высоте термосифона с текстурированными крышками становились ниже чем температуры в ТС с полированными крышками (рис. 5.7).

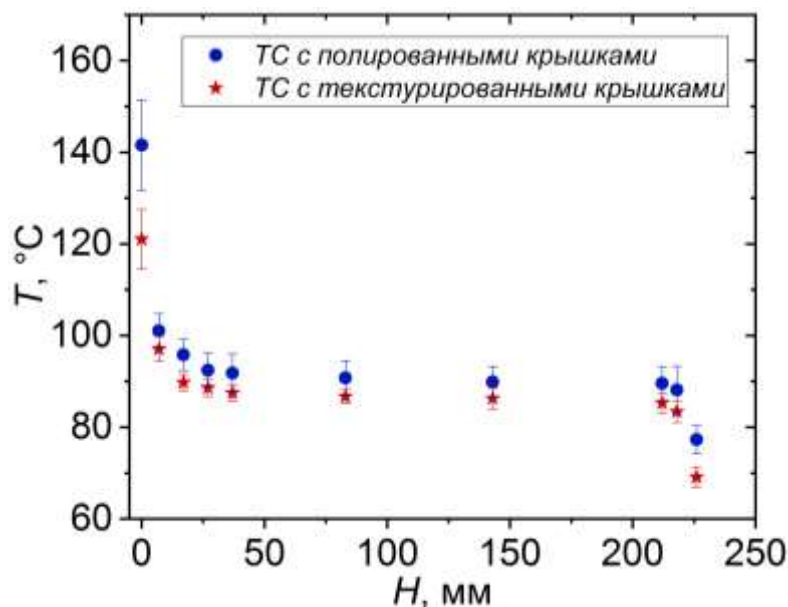


Рисунок 5.7 – Распределения температур по высоте термосифона с полированными и текстурированными крышками при $q=15 \text{ кВт/м}^2$

Можно предположить, что при малых тепловых потоках ($q=0.7-8.2 \text{ кВт/м}^2$) сформированная микротекстура поверхности в виде кратеров нижней крышки не оказывает влияния на процессы теплопереноса в ТС. При более высоких q (10-15 кВт/м²) текстурированная поверхность по сравнению с полированной способствовала интенсификации конвективных течений в слое жидкости, в результате чего переносимый за счет конвекции тепловой поток увеличился и температура нижней крышки уменьшилась. По результатам анализа рисунка 5.7

можно предположить, что влияние микротекстуры внутренней поверхности верхней крышки ТС на распределения температур в конденсаторе незначительно.

На рисунке 5.8 приведены зависимости термического сопротивления термосифона от плотности теплового потока.

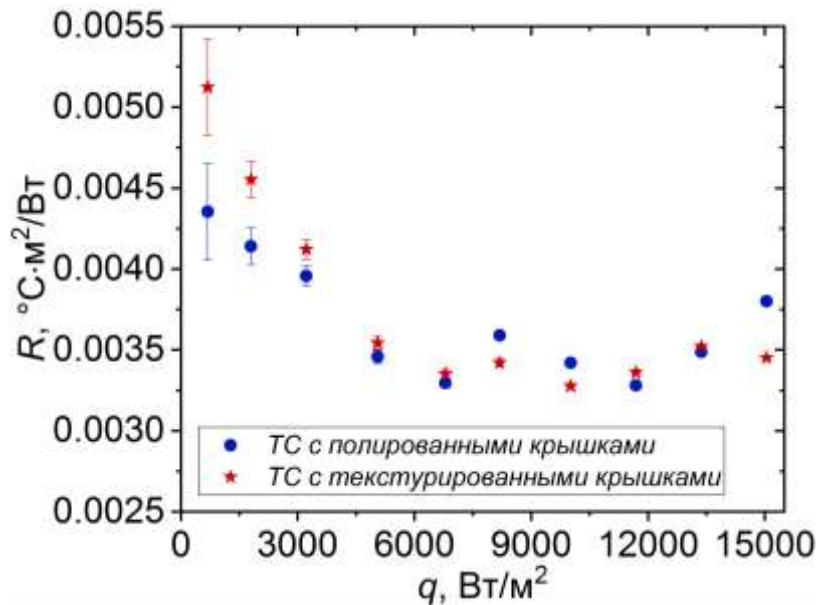


Рисунок 5.8 – Термическое сопротивление термосифона с полированными и текстурированными крышками.

Установлено, что увеличение теплового потока от 0,7 до 5,1 $\text{кВт}/\text{м}^2$ привело к снижению термического сопротивления. Дальнейший рост теплового потока до 15 $\text{кВт}/\text{м}^2$ не вызвал заметного повышения тепловых характеристик ТС. Последнее вызвано низким коэффициентом теплоотдачи воздуха в условиях естественной конвекции над верхней крышкой ТС. В результате чего отведенного теплового потока было недостаточно для увеличения эффективности работы термосифона с ростом q как с полированной, так и с текстурированной крышкой конденсатора.

Влияние микротекстуры внутренних поверхностей нижней и верхней крышек термосифона на процессы теплопереноса в ТС также оценивалось по результатам анализа фотоизображений (рис. 5.9 – рис. 5.12) и свойствам

смачиваемости крышек термосифонов после проведения серий экспериментов (см. таблица 5.5).

Ниже приведены результаты визуального наблюдения процессов, происходящих в испарительной и конденсационной частях ТС, в диапазоне тепловых потоков от 0,7 до 11,7 кВт/м². При тепловых потоках высокой плотности ($q > 12$ кВт/м²) получить хорошие изображения не удалось из-за высокой влажности в ТС и больших температур теплоносителя.

*а**б**в**г**д**е*

*ж**з*

плотности теплового потока q (кВт/м²): *а* – 0,7, *б* – 1,8, *в* – 3,2, *г* – 5,1, *д* – 6,8, *е* – 8,2, *ж* – 10,0, *з* – 11,7

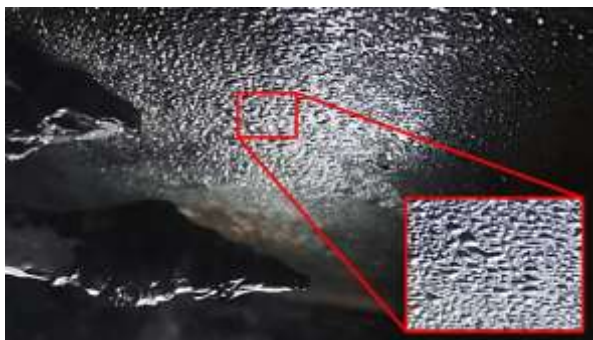
Рисунок 5.9 – Фотоизображения верхней полированной поверхности нижней крышки ТС

*а**б**в**г**д**е*

*ж**з*

плотности теплового потока q (кВт/м²): *а* – 0,7, *б* – 1,8, *в* – 3,2, *г* – 5,1, *д* – 6,8, *е* – 8,2, *ж* – 10,0, *з* – 11,7

Рисунок 5.10 – Фотоизображения верхней текстурированной поверхности нижней крышки ТС

*а**б**в**г*

д*жс**е**з*

плотности теплового потока q (кВт/м²): *а* – 0,7, *б* – 1,8, *в* – 3,2, *г* – 5,1, *д* – 6,8, *е* – 8,2, *жс* – 10,0, *з* – 11,7

Рисунок 5.11 – Фотоизображения нижней полированной поверхности верхней крышки ТС

*а**б**в**г*



q (кВт/м²): $a - 0,7$, $b - 1,8$, $в - 3,2$, $г - 5,1$, $д - 6,8$, $е - 8,2$, $жс - 10,0$, $з - 11,7$

Рисунок 5.12 – Фотоизображения нижней текстурированной поверхности верхней крышки ТС

По результатам анализа фотоизображений слоя жидкости на нижней крышке ТС (рис. 5.9 – рис. 5.10) установлено, что на полированной и текстурированной поверхностях крышек испарителя механизмы теплопереноса и гидромеханики были схожи. Пузырьки пара образовывались преимущественно в областях, имеющих множество неровностей (случайные углубления и выступы). Такими областями также являлись поверхности средств герметизации устройства на термопарах и стыках смотровых окон. Диаметры пузырьков пара на таких поверхностях не превышали 2 мм. На металлической поверхности нижней крышки ТС наблюдалось несколько (до 15) пузырьков, диаметр которых не превышал 0.5 мм. С ростом теплового потока количество пузырьков на нижней крышке ТС уменьшалось и при $q=11,7$ кВт/м² пузырьки пара на верхней поверхности нижней крышки ТС отсутствовали.

В конденсаторе (рис. 5.11 – рис. 5.12) при тепловом потоке 0,7 кВт/м² на нижней поверхности верхней крышки ТС происходила капельная конденсация. Размеры капель по высоте и диаметру не превышали 0,5 мм, а периметр смачивания имел неправильную форму. При $q=1,8$ кВт/м² капли сливались и становились больше в размерах (диаметр капель был не более 7 мм). С дальнейшим ростом теплового потока происходит капельно-пленочная конденсация.

После проведения экспериментов испарительная и конденсационная части термосифонов просушивались и теневым методом определялись свойства смачиваемости крышек ТС по квазистатическому углу капли, дозированной на их поверхность. Результаты определения θ приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Квазистатический угол на полированной и текстурированной поверхностях крышек ТС

	Квазистатический угол (θ , °)		
	После обработки	После нагрева с выдержкой 1 месяц	После экспериментов
Испаритель полированный	52	96	134
Конденсатор полированный			79
Испаритель текстурированный	47	135	110
Конденсатор текстурированный			90

Установлено (таблица 5.5), что при продолжительном смачивании металлических поверхностей квазистатический угол кардинально меняется. Например, в испарителе с полированной нижней крышкой, которую постоянно смачивал относительно толстый слой теплоносителя ($h \approx 11$ мм), θ увеличился, а в конденсаторе с полированной верхней крышкой, которая смачивалась каплями и тонкими пленками жидкости, уменьшился с 96 до 79 °. В случае с текстурированными поверхностями статический угол после экспериментов уменьшился и в испарителе и в конденсаторе, причем в конденсаторе угол уменьшился сильнее от 135 до 90 °.

По результатам анализа таблицы 5.5 и рисунков 5.9 – 5.12 можно сделать несколько выводов. Во-первых, при малых тепловых потоках ($q=0,7-5,1$ кВт/м²) при конденсации на текстурированной поверхности верхней крышки ТС капли были больше в размерах, чем на полированной. При тепловых потоках от 6.8 до 11,7 кВт/м² на текстурированной поверхности происходила преимущественно пленочная конденсация с малым количеством капель в отличие от полированной поверхности, на которой присутствовало больше капель. Последнее объясняется

меньшей смачиваемостью текстурированной поверхности крышки конденсатора по сравнению с полированной.

Во-вторых, с помощью лазерного текстурирования можно добиться не только гидрофобной поверхности в конденсаторе, но и более смачиваемой поверхности в испарителе по сравнению с полированной. Известно, что гидрофильные поверхности уменьшают отрывной диаметр пузырьков пара, увеличивают частоту их отрыва при кипении [208,209]. Поэтому чем больше квазистатический угол на внутренней поверхности нижней крышки ТС тем менее эффективно работает термосифон (высокое термическое сопротивление, низкий коэффициент теплоотдачи в испарителе).

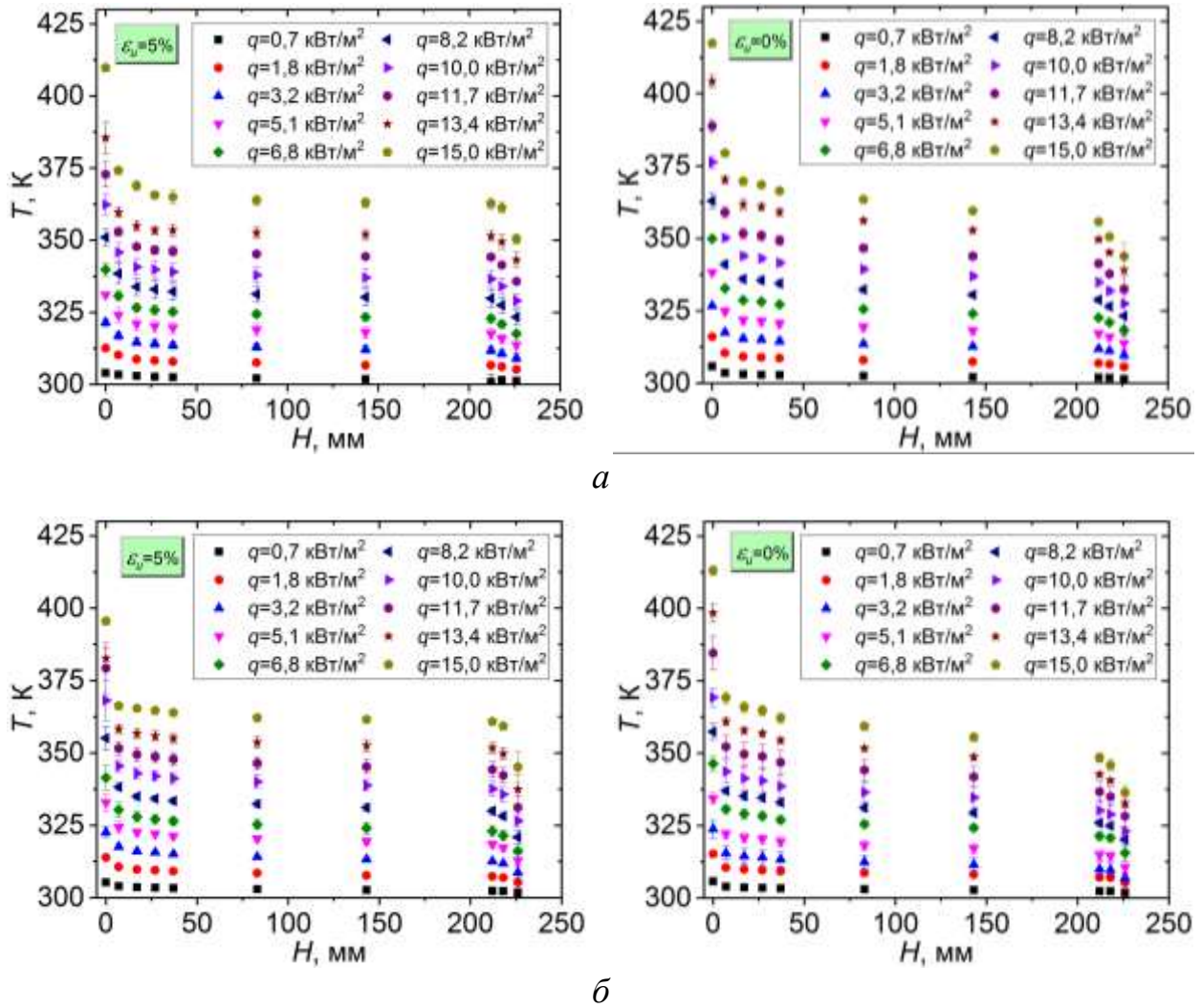
В отличие от многих известных работ, например [210,211], в настоящем исследовании рассматривался режим интенсивного испарения слоя теплоносителя на нижней крышке ТС без кипения. Установлено, что снижение квазистатического угла в испарительной части и увеличение его в конденсационной части за счет текстурирования лазерным излучением внутренних поверхностей крышек ТС привело к меньшим температурам по высоте термосифона, что качественно согласуется с результатами авторов [210,211]. Известно [210,211], что термическое сопротивление термосифона зависит от состояния внутренней поверхности (гидрофильная или гидрофобная). Однако разница между термическими сопротивлениями термосифонов с текстурированными и полированными крышками в проведенном исследовании была незначительна. Последнее обусловлено тем, что сформирована текстура в виде кратеров с общими границами. Такой вид текстуры незначительно по сравнению с известными сформированными лазерным излучением изменяют шероховатость и элементный состав. Но все же даже с таким видом текстуры зарегистрированы более низкие температуры по высоте ТС, в частности уменьшилась температура нижней крышки и, соответственно, температура термостабилизируемой поверхности, воспроизводящей условия работы оборудования низкоэнергетических реакторов (например CM-2, SL-1, HFTR).

5.3 Результаты экспериментальных исследований

На практике при использовании нескольких сотен или тысяч термосифонов удаление неконденсирующихся газов целесообразно осуществлять вакуумным насосом [212]. Если на производстве используются единицы или десятки термосифонов, то удаление воздуха из них осуществляется методом заливки кипящего теплоносителя в ТС, испарительная часть которого разогрета [212]. В таком случае возможна потеря части объема теплоносителя, заливаемого в термосифон (жидкость при соприкосновении с горячими стенками ТС интенсивно испаряется и выливается наружу). Испарительная часть термосифона при интенсивном испарении теплоносителя будет залита объемом меньше минимально необходимого (например, всего на 5%). Такие условия близки к критическим условиям работы ТС, так как при тепловых потоках высокой плотности, подведенных к нижней крышке ТС, испаритель весь осушится и эффективность отвода теплоты термосифоном значительно снизится.

При малой интенсивности теплообмена в зоне конденсации и при температурах поверхностей теплонагруженных устройств выше допустимых возможна аварийная ситуация, сопровождающаяся термическими напряжениями в конструкции ТС. Напряженно-деформированное состояние термосифона может привести к утечке теплоносителя и выходу его из строя. В таких условиях отвод теплоты термосифоном осуществляется в основном кондукцией (стенками ТС).

На рисунке 5.13 приведены распределения температуры по высоте термосифонов с полированными и текстурированными крышками при $\varepsilon_u = 5\%$ и $\varepsilon_u = 0\%$ (при отсутствии слоя жидкости в испарителе).



а – с полированными, б – текстурированными крышками при $\varepsilon_u = 0-5\%$ и

тепловых потоках $q = 0,7 - 15 \text{ кВт/м}^2$

Рисунок 5.13 – Распределения температур по высоте термосифона

По результатам экспериментов установлено (рис. 5.13), что при интенсивном испарении малого объема воды ($\varepsilon_u = 5\%$) в термосифоне при тепловых потоках $q = 0,7 - 5,0 \text{ кВт/м}^2$ слой теплоносителя остается на нижней крышке (осушение испарителя не происходит). Толщина слоя теплоносителя не превышала 4 мм (нижняя термопара в термосифоне регистрировала температуру пара над свободной поверхностью, а не слоя жидкости). Можно сделать вывод, что термосифон способен отводить тепловой поток в диапазоне от 0,7 до 15 кВт/м² в близких к критическим условиях работы, т.е. при существенно малом заполнении испарителя без его полного осушения. Но такие условия опасны, так

как при резком повышении тепловой нагрузки теплоноситель может вскипеть, что при малой толщине слоя жидкости приведет к быстрому осушению испарителя. Рекомендуется заливать термосифон объемом близким к минимально необходимому и при давлении во внутренней полости ТС близким к атмосферному [213]. В таких условиях теплоноситель на нижней крышке с ростом теплового потока будет интенсивно испаряться без кипения, а при внезапном значительном выделении теплоты толщины слоя будет достаточно, чтобы он не испарился полностью.

Установлено, что в критических условиях работы термосифона ($\varepsilon_u=0\%$) температуры в нем выше, чем в условиях наличия теплоносителя на нижней крышке ТС ($\varepsilon_u=5\%$). Выкипевший теплоноситель или его утечка в термосифоне приведут к перегреву нижней крышки (температура нижней текстурированной крышки со слоем воды ($\varepsilon_u=5\%$) при $q=15 \text{ кВт/м}^2$ была на 18°C ниже, чем ее температура при отсутствии теплоносителя в испарителе).

Если теплоносителя в термосифоне не будет, охлаждаемое оборудование скорее всего выйдет из строя из-за перегрева. Поэтому, чтобы избежать критических условий работы термосифона необходимо удалять неконденсирующиеся газы из ТС. Присутствие последних во внутренней полости термосифона приводит к высоким давлениям внутри и снижению интенсивности теплообмена в зоне конденсации. Недостаточный теплоотвод и повышенное давление с ростом теплового потока могут привести к возникновению утечек или взрыву устройства.

Результаты экспериментов обосновывают возможность охлаждения теплонагруженных элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах автономными (не связанными с источниками электроснабжения) системами охлаждения на базе термосифонов с внутренними текстурированными поверхностями нижней и верхней крышек. В диапазоне тепловых потоков $q=0,7-15 \text{ кВт/м}^2$ при заполнении испарителя на 15% и в условиях близких к критическим условиям работы термосифонов ($\varepsilon_u=5\%$) испаритель ТС не будет осушен.

Использование таких систем обеспечения теплового режима ЯЭУ, работающих в условиях аварий (при потери источников электроснабжения), рекомендуется при заполнении испарителя на 15%. При меньших степенях заполнения (5-15 %) испаритель не осушится, но при значительном выделении теплоты толщины слоя жидкости будет недостаточно, чтобы он не испарился полностью. При отсутствии теплоносителя на нижней крышке ТС ($\varepsilon_u=0\%$) температура нижней крышки будет на несколько десятков градусов выше, чем при наличии теплоносителя на этой крышке. Соответственно вероятность выхода устройства из строя значительно выше. Поэтому, чтобы избежать напряженно-деформированного состояния ТС, приводящего к утечкам теплоносителя и выходу из строя устройства, рекомендуется откачивать неконденсирующиеся газы из полости термосифона.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан графоаналитический способ прогнозирования формирования текстур, лазерным методом обработки поверхностей металлов в виде упорядоченных микроканалов с заданными геометрическими характеристиками и контролируемой шероховатостью в широких диапазонах изменения её 3D-параметров. Графоаналитический способ базируется на использовании в расчетах экспериментально установленного диаметра абляционного кратера, обладает достаточно хорошей точностью (отклонения от заданных геометрических размеров элементов текстур в виде микроканалов не превышают 10%).

2. Экспериментально установлено, что на поверхностях стали марки X16CrNi25-20 конфигурация текстуры в виде микроканалов, сформированных лазерным излучением наносекундной длительности, позволяет значительно увеличить стойкость поверхностей к адгезии продуктов горения жидких и композиционных топлив.

3. Экспериментально установлено, что за счет формирования конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов лазерными методами обработки поверхностей металлов можно уменьшить время задержки зажигания капель топлив объемом 10 мкл (масла до 25%, эмульсии до 28%, суспензии до 55%) в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования. Последнее обусловлено лучшим растеканием капель топлива по модифицированным лазерным излучением поверхностям нагрева и наибольшим приростом площади поверхности, обусловленным развитой шероховатостью.

4. Также установлено, что использование на практике поверхностей нагрева с текстурой в виде микроканалов в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования, способствует интенсификации физико-химических процессов, происходящих при горении капель композиционных топлив (эмульсии и суспензии), а также масла. Последнее характеризуется увеличением максимального размера области выгорания капель свыше 50%, а в

случае горения композиционных топлив увеличением числа инициаций паффинга, что в итоге сокращает время выгорания капель топлив.

5. В условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, использование поверхностей нагрева с текстурой в виде микроканалов, позволяет до 40% уменьшить время задержки зажигания капель композиционных жидких топлив (например, ОВУТ), а также широко используемых на практике жидких топлив.

6. Из используемых текстур в экспериментах, воспроизводящих номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, наименьшее время выгорания капель топлив масла, эмульсии и суспензии зарегистрировано на поверхностях с текстурой в виде микроканалов шириной 65 мкм с расстоянием между осями микроканалов равным 195 мкм. Полученный результат объясняется более развитой поверхностью за счет выбранной конфигурации текстуры. Так уменьшение времен выгорания на такой поверхности по сравнению с полированной поверхностью в случае горения капель топлив масла составляет более 40%, в случае эмульсии 40%, а в случае суспензии 34%.

7. Для интенсификации процесса выгорания капель топлив в условиях, соответствующих номинальному режиму работы энергогенерирующего оборудования, предпочтительно использовать на практике поверхности нагрева с более развитой текстурой. Из используемых конфигураций текстур, сформированных лазерным способом обработки, наилучшие результаты по оценке характеристик зажигания (τ_d) и горения (τ_{burn} , N , D_{max}) капель топлив, в том числе и композитных топлив, в условиях, воспроизводящих пуск и номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, продемонстрировала текстура 2AB. Последняя характеризуется параллельными микроканалами шириной около 65 мкм с расстоянием между осями микроканалов равным 195 мкм, развитой текстурой на необработанной части поверхности лазерным излучением, сформированной закристаллизовавшимся расплавом.

8. Экспериментально установлено, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях

высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Паффинг реализуется при смешении нерастворимых (или плохо растворимых) жидких компонентов, характеризующихся значительным отличием полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения. Микровзрыв реализуется только при смешении взаимно нерастворимых компонентов, причем один компонент должен характеризоваться отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1$ (должен быть полярным), а второй отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D < 0.1$ (должен быть дисперсным). Кроме того, необходимо обеспечение внешних условий нагрева, при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела “жидкость-жидкость”, стремилось к нулю.

9. По результатам проведенных экспериментов условно выделено шесть возможных режимов воздействия одиночного лазерного импульса наносекундной длительности с энергией в импульсе до 1 мДж на поверхность нержавеющей стали и алюминия: 1) режим нагрева без модификации поверхности; 2) умеренное плавление; 3) интенсивное плавление; 4) формирование абляционных кратеров, характеризующихся волнообразной формой периметра (кромки); 5) формирование абляционных кратеров с кромкой правильной формы окружности; 6) формирование абляционных кратеров с кромкой, деформированной каплями и струйками расплавленного металла.

10. Экспериментально показана возможность применимости графоаналитической методики [164], разработанной для прогнозирования текстур на поверхностях керамики, базирующейся на знании геометрической формы и размеров элемента текстуры (абляционного кратера), для создания заданных микротекстур на поверхностях алюминия и нержавеющей стали в виде абляционных кратеров, микроканавок, микростолбиков и “цветной капусты”.

11. Экспериментально установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью, высотой между впадинами и вершинами, а также приростом

площади поверхности за счет шероховатости. Также установлено, что температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности.

12. Экспериментально доказано, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали), используемых в качестве конструкционных материалов, например, при изготовлении поверхностей нагрева энергогенерирующих и теплопередающих устройств, является наиболее перспективным по сравнению с механической обработкой абразивными материалами, широко используемыми в настоящее время в машиностроении. Последнее обусловлено тем, что лазерная обработка поверхности металлов позволяет за счет формируемой текстуры и создания экстремальных свойств смачивания (супергидрофильности) в достаточно широких диапазонах значений управлять характеристиками кризиса кипения второго рода, а именно, температурой Лейденфроста более чем 110°C на поверхности алюминия и более чем на 45°C на поверхности нержавеющей стали. Зарегистрированные смещения температур Лейденфроста характерны для исследования кризиса кипения в атмосферных условиях с использованием дистиллированной деаэрированной воды в качестве теплоносителя на сформированных лазерным излучением текстурах в условиях энергии в импульсе до 0,6 мДж. Для смещения температуры Лейденфроста в область более высоких температур необходимо создавать развитую, многоуровневую шероховатость, характеризующуюся большим значением параметра Spd (характеризует число выступов на единицу площади поверхности) и параметром Sku (эксцесс) значением менее 3. Различия в величине сдвига температуры Лейденфроста на разных металлах (алюминий, нержавеющая сталь) обусловлены, главным образом, формируемой текстурой и шероховатостью. По причине того, что после лазерного способа обработки поверхности алюминия и нержавеющей стали характеризуются подобными свойствами смачивания (супергидрофильностью / гидрофильностью). По результатам анализа параметров

шероховатости на поверхностях алюминия сформирована более развитая шероховатость по сравнению с поверхностями стали. По этим причинам смещение температуры Лейденфроста на поверхностях алюминия превышает аналогичную характеристику на поверхностях нержавеющей стали.

13. Полученные результаты могут быть использованы при решении актуальных проблем теплофизики, направленных на повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем создания конструкционных материалов (металлов и их сплавов) с целевыми функциональными свойствами модификацией поверхностей лазерным излучением наносекундной длительности. Примерами энергонасыщенного оборудования являются устройства связи пятого поколения 5G, системы охлаждения атомных реакторов, микропроцессоры суперкомпьютеров и устройства обеспечения теплового режима авиа- и космических аппаратов.

14. Результаты экспериментов обосновывают возможность охлаждения теплонагруженных элементов конструкции ЯЭУ в аварийных режимах автономными (не связанными с источниками электроснабжения) системами охлаждения на базе термосифонов с внутренними текстурированными поверхностями нижней и верхней крышек. В диапазоне тепловых потоков $q=0,7-15 \text{ кВт/м}^2$ при заполнении испарителя на 15% и в условиях близких к критическим условиям работы термосифонов ($\epsilon=5\%$) испаритель ТС не будет осушен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holechek J.L. et al. A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? // *Sustain.* 2022. Vol. 14, № 8. P. 1–22.
2. Investment in renewable energy, by technology [Electronic resource].
3. Iacovidou E. et al. Technical properties of biomass and solid recovered fuel (SRF) co-fired with coal: Impact on multi-dimensional resource recovery value // *Waste Manag.* 2018. Vol. 73. P. 535–545.
4. Glushkov D.O. et al. Kinetic properties and ignition characteristics of fuel compositions based on oil-free and oil-filled slurries with fine coal particles // *Thermochim. Acta.* Elsevier, 2021. Vol. 704. P. 179017.
5. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal–water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // *Fuel Process. Technol.* Elsevier B.V., 2016. Vol. 152. P. 22–33.
6. Staroń A. et al. Impact of waste soot on properties of coal-water suspensions // *J. Clean. Prod.* Elsevier Ltd, 2016. Vol. 135. P. 457–467.
7. Boylu F., Dinçer H., Ateşok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries // *Fuel Process. Technol.* Elsevier, 2004. Vol. 85, № 4. P. 241–250.
8. Fei Y., Gopan A., Axelbaum R.L. Characterization of coal water slurry prepared for PRB coal // *J. Fuel Chem. Technol.* Elsevier, 2014. Vol. 42, № 10. P. 1167–1171.
9. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions // *Fuel.* Elsevier, 2011. Vol. 90, № 2. P. 865–877.
10. Burdukov A.P. et al. The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures // *Fuel.* Elsevier, 2002. Vol. 81, № 7. P. 927–933.
11. Dorokhov V.V. et al. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making // *Energy.* Pergamon, 2021. Vol. 234. P. 121257.
12. Nadkanská H. et al. Influence of liquid hydroxide based additives on

suppression of slag formation in granulation furnaces // *Inz. Miner.* 2019. Vol. 2019, № 2. P. 341–346.

13. Vamvuka D. et al. Co-combustion characteristics of lignite/woody biomass blends. Reactivity and fusibility assessment // *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* Taylor & Francis, 2019. Vol. 00, № 00. P. 1–15.

14. Vamvuka D., Sfakiotakis S., Mpoupouris A. Slagging and Fouling Propensities of Ashes from Urban and Industrial Wastes // *Recent Innov. Chem. Eng.* (Formerly *Recent Patents Chem. Eng.* Bentham Science Publishers Ltd., 2018. Vol. 11, № 2. P. 145–158.

15. Stefanovic P.L. et al. Review of the investigations of pulverized coal combustion processes in large power plants in Laboratory for Thermal Engineering and Energy-Part B // *Therm. Sci.* 2019. Vol. 23. P. S1611–S1626.

16. Alekhnovich A.A., Artem'eva N. V. Effect of the Ash Content on the Slagging Properties of Coals and the Slagging of Pulverized Coal-Fired Boilers // *Power Technol. Eng.* 2017. Vol. 51, № 4. P. 431–437.

17. Daood S.S. et al. Pollutant and Corrosion Control Technology and Efficient Coal Combustion // *Energy and Fuels.* 2017. Vol. 31, № 5. P. 5581–5596.

18. Kougioumtzis M.A. et al. Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency // *Renew. Energy.* Elsevier Ltd, 2021. Vol. 171. P. 516–525.

19. Arkhipov A.M. et al. Efficiency of using direct-flow burners and nozzles in implementation of dry-bottom ash removal at the TPP-210A boiler furnace // *Therm. Eng.* . 2017. Vol. 64, № 2. P. 134–141.

20. Clery D.S. et al. The effects of an additive on the release of potassium in biomass combustion // *Fuel.* Elsevier, 2018. Vol. 214, № May 2017. P. 647–655.

21. Rozwadowski A., Dziok T. The impact of repeated water soaking of cereal straw on the slagging index and the formation of deposits on heating surfaces of power boilers // *Polityka Energ.* 2018. Vol. 21, № 2. P. 125–137.

22. Zafar M.H. et al. An investigation on the impact of demineralization of lignocellulosic corncob biomass using leaching agents for its utilization in industrial

boilers // Biomass Convers. Biorefinery. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020. Vol. 10, № 4. P. 1035–1041.

23. Tsue M. et al. Observation of sooting behavior in an emulsion droplet flame by planar laser light scattering in microgravity // Symp. Combust. Elsevier, 1996. Vol. 26, № 1. P. 1251–1258.

24. Watanabe H. et al. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // Int. J. Heat Mass Transf. Pergamon, 2009. Vol. 52, № 15–16. P. 3676–3684.

25. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Differences of two-component droplets breakup at the high temperatures // J. Energy Inst. Elsevier, 2020. Vol. 93, № 1. P. 351–366.

26. Suzuki Y. et al. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets // Proc. Combust. Inst. Elsevier, 2011. Vol. 33, № 2. P. 2063–2070.

27. Yahaya Khan M. et al. Puffing and Microexplosion Behavior of Water in Pure Diesel Emulsion Droplets During Leidenfrost Effect // Combust. Sci. Technol. Taylor and Francis Inc., 2017. Vol. 189, № 7. P. 1186–1197.

28. Yahaya Khan M. et al. Experimental Study on Influence of Surfactant Dosage on Micro Explosion Occurrence in Water in Diesel Emulsion // Appl. Mech. Mater. 2016. Vol. 819, № April 2016. P. 287–291.

29. Jarvis T.J., Donohue M.D., Katz J.L. Bubble nucleation mechanisms of liquid droplets superheated in other liquids // J. Colloid Interface Sci. Academic Press, 1975. Vol. 50, № 2. P. 359–368.

30. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Therm. Sci. Elsevier, 2019. Vol. 142, № April. P. 30–41.

31. Pilch M., Erdman C.A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop // Int. J. Multiph. Flow. Pergamon, 1987. Vol. 13, № 6. P. 741–757.

32. Mura E. et al. Study of the micro-explosion temperature of water in oil

emulsion droplets during the Leidenfrost effect // *Exp. Therm. Fluid Sci.* Elsevier, 2012. Vol. 43. P. 63–70.

33. Strizhak P.A. et al. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating // *Chem. Eng. Res. Des.* Institution of Chemical Engineers, 2017. Vol. 127. P. 72–80.

34. Volkov R.S., Strizhak P.A. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explore the mechanism of the explosive disintegration of water emulsion droplets exposed to intense heating // *Int. J. Therm. Sci.* Elsevier Masson SAS, 2018. Vol. 127. P. 126–141.

35. Moussa O. et al. Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions // *Int. J. Therm. Sci.* Elsevier Masson SAS, 2018. Vol. 133. P. 90–97.

36. Shinjo J. et al. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets // *Phys. Fluids*. American Institute of Physics Inc., 2014. Vol. 26, № 10. P. 103302.

37. Califano V., Calabria R., Massoli P. Experimental evaluation of the effect of emulsion stability on micro-explosion phenomena for water-in-oil emulsions // *Fuel*. Elsevier, 2014. Vol. 117, № PART A. P. 87–94.

38. Items R. et al. This is a repository copy of Multicomponent fuel droplet combustion investigation using magnified high speed backlighting and shadowgraph imaging . White Rose Research Online URL for this paper : Version : Accepted Version Article : Faik , A . M . D and Z. 2018.

39. Lasheras J.C., Fernandez-Pello A.C., Dryer F.L. Initial Observations on the Free Droplet Combustion Characteristics of Water-in-Fuel Emulsions // *Combust. Sci. Technol.* 1979. Vol. 21, № 1–2. P. 1–14.

40. Mura E. et al. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches // *Exp. Therm. Fluid Sci.* Elsevier Inc., 2014. Vol. 56. P. 69–74.

41. Watanabe H., Okazaki K. Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging // *Proc. Combust. Inst.* The Combustion Institute, 2013. Vol. 34, № 1. P. 1651–1658.

42. Zhang K. et al. A novel route to utilize waste engine oil by blending it with water and coal // J. Hazard. Mater. Elsevier B.V., 2017. Vol. 332. P. 51–58.
43. Kellens K. et al. Energy and resource efficiency of laser cutting processes // Phys. Procedia. Elsevier B.V., 2014. Vol. 56, № C. P. 854–864.
44. Goorahoo, D., Carstensen, G., Zoldoske, D. F., Norum, E., Mazzei A. Using Air in Sub-Surface Drip Irrigation (SDI) to Increase Yields in Bell Peppers // Int. Water Irrig. 2002. Vol. 22, № 2. P. 39–42.
45. Ponomarev K., Feoktistov D., Abedtazehabadi A. Experimental Investigation of the Heat Transfer Intensity in Thermosyphon // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2135, № August 2019.
46. Ponomarev K., Abedtazehabadi A. Experimental investigation of the temperature distribution along the two-phase thermosyphon height and the condensation type on the top cover // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2337.
47. Ponomarev K., Feoktistov D., Abedtazehabadi A. Aspects of the research methodology of convection, conduction, evaporation and condensation jointly occurring in the thermosyphon // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2135, № 2019.
48. Design parameters for superhydrophobicity and superoleophobicity / A. Tuteja, W. Choi, G. H. McKinley [et al.] // MRS bulletin. - 2008. - Vol. 33, N 8. - P. 752-758.
49. Style, R. W. Static wetting on deformable substrates, from liquids to soft solids / R. W. Style, E. R. Dufresne // Soft Matter. - 2012. - Vol. 8, N 27. - P. 7177-7184.
50. Heat transfer characteristics of titanium/water two-phase closed thermosyphon / Q. Baojin, Z. Li, X. Hong, S. Yan // Energy Conversion and Management. -2009. - Vol. 50, N 9. - P. 2174-2179.
51. Orlova E.G. et al. Spreading of a distilled water droplet over polished and laser-treated aluminum surfaces // Eur. J. Mech. B/Fluids. 2018. Vol. 68.
52. Enhancing thermal performance of a two-phase closed thermosyphon with an internal surface roughness / A. A. Alammar, N. A.-M. Fadhel, K. A.-D. Raya [et al.] // Journal of Cleaner Production. - 2018. - Vol. 185. - P. 128-136.

53. Pashkevich, R. I. Film condensation in a large diameter tube with upward steam flow / R. I. Pashkevich, P. V. Muratov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. - 2015. - Vol. 81. - P. 804-810.
54. Revankar, S. T. Laminar film condensation in a vertical tube in the presence of noncondensable gas / S. T. Revankar, D. Pollock // *Applied Mathematical Modelling*. - 2005. - Vol. 29, N 4. - P. 341-359.
55. Liter, S. G. Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: Theory and experiment / S. G. Liter, M. Kaviany // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. - 2001. - Vol. 44, N 22. - P. 4287-4311.
56. Effect of sintered microporous coating at the evaporator on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon / Y. Kim, D. H. Shin, J. S. Kim [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. - 2019. - Vol. 131. - P. 1064-1074.
57. Operation performance of thermosyphons employing titania and gold nanofluids / T. Grab, U. Gross, U. Franzke, M. H. Buschmann // *International Journal of Thermal Sciences*. - 2014. - Vol. 86. - P. 352-364.
58. Transparent superhydrophobic thin films with self-cleaning properties / A. Nakajima, K. Hashimoto, T. Watanabe [et al.] // *Langmuir*. - 2000. Vol. 16, N 17. - P. 7044-7047.
59. Wang, M. F. A nonlithographic top-down electrochemical approach for creating hierarchical (micro-nano) superhydrophobic silicon surfaces / M. F. Wang, N. Raghunathan, B. Ziaie // *Langmuir*. - 2007. - Vol. 23, N 5. - P. 2300-2303.
60. Tunable poly(dimethylsiloxane) topography in O₂ or Ar plasmas for controlling surface wetting properties and their ageing / K. Tsougeni, A. Tserepi, G. Boulousis [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. - 2007. - Vol. 46, N 2. - P. 744-750.
61. Electrochemical deposition of conductive superhydrophobic zinc oxide thin films / M. Li, J. Zhai, H. Liu [et al.] // *Journal of Physical Chemistry B*. - 2003. - Vol. - 107, N 37. - P. 9954-9957.
62. Lau K.K.S. et al. Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests // *Nano Lett.*

American Chemical Society , 2003. Vol. 3, № 12. P. 1701–1705.

63. Yimsiri, P. Spin and dip coating of light-emitting polymer solutions: Matching experiment with modelling / P. Yimsiri, M. R. Mackley // *Chemical Engineering Science*. - 2006. Vol. 61, N 11. - P. 3496-3505.

64. Superhydrophobic structures on 316L stainless steel surfaces machined by nanosecond pulsed laser / Y. Cai, W. Chang, X. Luo [et al.] // *Precision Engineering*. - 2018. - Vol. 52. - P. 266-275.

65. Maurer, J. A. Self-cleaning superhydrophobic nanocomposite surfaces generated by laser pulse heating / J. A. Maurer, M. J. Miller, S. F. Bartolucci // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2018. - Vol. 524. - P. 204-208.

66. Ngo, C. V. Control of laser-ablated aluminum surface wettability to superhydrophobic or superhydrophilic through simple heat treatment or water boiling post-processing / C. V. Ngo, D. M. Chun // *Applied Surface Science*. - 2018. - Vol. 435. - P. 974-982.

67. Qin, J. Z. A simple way to achieve superhydrophobic surfaces with tunable water adhesion by a nanosecond pulse laser / Z. Qin, J. Liu, X. Zeng // *Advanced Laser Processing and Manufacturing II*. - International Society for Optics and Photonics. - 2018. - Vol. 10813, Art. 1081313. - P. 1-14.

68. Application of bioinspired superhydrophobic surfaces in two-phase heat transfer experiments / E. Teodori, A. S. Moita, M. Moura [et al.] // *Journal of Bionic Engineering*. - 2017. - Vol. 14, N 3. - P. 506-519.

69. Two-phase thermosiphon cooling using integrated heat spreaders with copper microstructures / V. Abreu, M. Harrison, J. Gess, A. S. Moita // *17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. - San Diego, 2018. - P. 645-652.

70. Theofanous T.G. et al. The boiling crisis phenomenon part I: Nucleation and nucleate boiling heat transfer // *Exp. Therm. Fluid Sci*. 2002. Vol. 26, № 6–7. P. 775–792.

71. Zhuang B. et al. Like dissolves like: A first-principles theory for predicting liquid miscibility and mixture dielectric constant // *Sci. Adv*. American Association for

the Advancement of Science, 2021. Vol. 7, № 7. P. 7275–7287.

72. Osada H. et al. Experimental Analysis of Heat-Loss with Different Piston Wall Surface Conditions in a Heavy-Duty Diesel Engine // COMODIA 2017 - 9th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2017. P. B204.

73. Tsutsumi Y., Nomura K., Nakamura N. Effect of Mirror-Finished Combustion Chamber on Heat Loss // SAE Tech. Pap. SAE International, 1990.

74. Kawaguchi A. et al. Thermo-swing insulation to reduce heat loss from the combustion chamber wall of a diesel engine // Int. J. Engine Res. 2019. Vol. 20, № 7. P. 805–816.

75. Moskvina L.N., Efimov A.A., Gusev B.A. Protective Oxidation of Boiler Equipment Heating Surfaces with Concurrently Removing Ash Deposits // Therm. Eng. 2020 673. Springer, 2020. Vol. 67, № 3. P. 173–177.

76. Shchelkin K.I. Selected works[collection of scientific articles] / ed. Loboiko B.G. Snezhinsk: RFNC-VNIITF, 2011. 268 p.

77. Feoktistov D. V. et al. The effect of ceramic surface structure modification method on the ignition and combustion behavior of non-metallized and metallized gel fuel particles exposed to conductive heating // Fuel. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 330, № August. P. 125576.

78. Feoktistov D. V. et al. Ignition and combustion characteristics of coal-water-oil slurry placed on modified metal surface at mixed heat transfer // Fuel Process. Technol. Elsevier B.V., 2022. Vol. 233. P. 107291.

79. Feoktistov D. V. et al. Ignition and combustion enhancement of composite fuel in conditions of droplets dispersion during conductive heating on steel surfaces with different roughness parameters // Fuel. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 314, № November 2021. P. 122745.

80. Feoktistov D.V. et al. Gel fuels based on oil-filled cryogels: Corrosion of tank material and spontaneous ignition // Chem. Eng. J. Elsevier B.V., 2020. P. 127765.

81. Misyura S.Y. et al. Effect of heat treatment on corrosion of laser-textured aluminum alloy surfaces // J. Mater. Sci. 2021 5622. Springer, 2021. Vol. 56, № 22. P.

12845–12863.

82. Feoktistov D. V. et al. Gel fuels based on oil-filled cryogels: Corrosion of tank material and spontaneous ignition // *Chem. Eng. J. Elsevier B.V.*, 2021. Vol. 421, № P2. P. 127765.

83. Kadota T., Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion // *Prog. Energy Combust. Sci. Pergamon*, 2002. Vol. 28, № 5. P. 385–404.

84. Khanpit V., Tajane S.P., Mandavgane S.A. Experimental studies on coal-water slurry fuel prepared from pretreated low-grade coal // <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1666830>. Taylor & Francis, 2019. Vol. 42, № 3. P. 831–845.

85. Rosli M.A.F. et al. Experimental study of micro-explosion and puffing of gas-to-liquid (GTL) fuel blends by suspended droplet method // *Energy. Elsevier Ltd*, 2021. Vol. 218. P. 119462.

86. Antonov D. V., Volkov R.S., Strizhak P.A. An explosive disintegration of heated fuel droplets with adding water // *Chem. Eng. Res. Des. Institution of Chemical Engineers*, 2018. Vol. 140. P. 292–307.

87. Cao Q. et al. Combustion characteristics of inorganic kerosene gel droplet with fumed silica as gellant // *Exp. Therm. Fluid Sci. Elsevier*, 2019. Vol. 103. P. 377–384.

88. Feng S. et al. Experimental studies the burning process of gelled unsymmetrical dimethylhydrazine droplets under oxidant convective conditions // *Fuel. Elsevier*, 2013. Vol. 111. P. 367–373.

89. Bittner B., Kissel T. Ultrasonic atomization for spray drying: a versatile technique for the preparation of protein loaded biodegradable microspheres // *j. microencapsulation*. 1992. Vol. 16, № 3. 325–341 p.

90. Xin Huang L., Filková I. M.A. Industrial Spray Drying Systems // *Handbook of Industrial Drying*, third Edition. Boca Raton, 2006. 234–275 p.

91. Chakraborty S., Rosen M.A., MacDonald B.D. Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors // *Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd*, 2017. Vol. 125. P. 104–110.

92. Wachters L.H.J. et al. The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state // *Chem. Eng. Sci.* 1966. Vol. 21, № 12. P. 1231–1238.
93. Semenov S. et al. Evaporation of droplets of surfactant solutions // *Langmuir*. 2013. Vol. 29, № 32. P. 10028–10036.
94. Semenov S. et al. Simultaneous spreading and evaporation: Recent developments // *Adv. Colloid Interface Sci.* Elsevier B.V., 2014. Vol. 206. P. 382–398.
95. Ponomarev K., Orlova E., Feoktistov D. Effect of the heat flux density on the evaporation rate of a distilled water drop // *EPJ Web Conf.* 2016. Vol. 110. P. 7–10.
96. Duisburg G.. *O. De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus* // Oxford University. 1756. 175 p.
97. Walker J. Boiling and the Leidenfrost Effect // *Phys. Educ.* 1994. Vol. 10. P. 1–4.
98. Shirota M. et al. Dynamic Leidenfrost Effect: Relevant Time and Length Scales // *Phys. Rev. Lett.* American Physical Society, 2016. Vol. 116, № 6.
99. Ajaev V.S., Kabov O.A. Levitation and Self-Organization of Droplets // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2021. Vol. 53, № 14. P. 203–225.
100. Sobac B. et al. Leidenfrost effect: Accurate drop shape modeling and refined scaling laws // *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* American Physical Society, 2014. Vol. 90, № 5.
101. Xu X., Qian T. Hydrodynamics of Leidenfrost droplets in one-component fluids // *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 2013. Vol. 87, № 4.
102. Rossky P.J. Exploring nanoscale hydrophobic hydration // *Faraday Discuss.* 2010. Vol. 146. P. 13–18.
103. Kabov O.A. et al. Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate // *Interfacial Phenom. Heat Transf.* 2018. Vol. 6, № 4. P. 421–435.
104. Nagai N., Nishio S. Leidenfrost temperature on an extremely smooth surface // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1996. Vol. 12, № 3. P. 373–379.
105. Kim H. et al. On the effect of surface roughness height, wettability, and nanoporosity on leidenfrost phenomena // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98, № 8. P.

083121.

106. Hughes F. The evaporation of drops from super-heated nano-engineered surfaces // Dr. Diss. Massachusetts Inst. Technol. 2009.

107. Vakarelski I.U. et al. Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces // Nature. 2012. Vol. 489, № 7415. P. 274–277.

108. Takata Y. et al. Evaporation of water drop on a plasma-irradiated hydrophilic surface // Int. J. Heat Fluid Flow. 2004. Vol. 25, № 2. P. 320–328.

109. Munoz R., Beving D., Yan Y. Hydrophilic zeolite coatings for improved heat transfer: A quantitative analysis // AIChE J. 2005. Vol. 44, № 3. P. 4310–4315.

110. Huang C.K., Carey V.P. The effects of dissolved salt on the Leidenfrost transition // Int. J. Heat Mass Transf. 2007. Vol. 50, № 1–2. P. 269–282.

111. Sataeva N.E. et al. Laser-assisted processing of aluminum alloy for the fabrication of superhydrophobic coatings withstanding multiple degradation factors // Surf. Coatings Technol. Elsevier, 2020. Vol. 397, № May. P. 125993.

112. Kruse C. et al. Extraordinary Shifts of the Leidenfrost Temperature from Multiscale.pdf. 2013.

113. Arnaldo Del Cerro D. et al. Leidenfrost point reduction on micropatterned metallic surfaces // Langmuir. 2012. Vol. 28, № 42. P. 15106–15110.

114. Hassebrook A. et al. Effects of droplet diameter on the Leidenfrost temperature of laser processed multiscale structured surfaces // Thermomechanical Phenom. Electron. Syst. -Proceedings Intersoc. Conf. IEEE, 2014. P. 452–457.

115. Talari V. et al. Leidenfrost drops on micro/nanostructured surfaces // Front. Energy. 2018. Vol. 12, № 1. P. 22–42.

116. Hassebrook A. et al. Effects of Droplet Diameter and Fluid Properties on the Leidenfrost Temperature of Polished and Micro/Nanostructured Surfaces // J. Heat Transfer. 2016. Vol. 138, № 5. P. 1–7.

117. Romashevskiy S.A., Ovchinnikov A. V. Functional Surfaces with Enhanced Heat Transfer for Spray Cooling Technology // High Temp. 2018. Vol. 56, № 2. P. 255–262.

118. Алексеев, С. В. Нитридное топливо для ядерной энергетики / С. В.

Алексеев, В. А. Зайцев. - Москва : Техносфера, 2013. - 240 с.

119. Самойлов, А. Г. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов : учебник для вузов / А. Г. Самойлов, В. С. Волков, М. И. Солонин. - Москва : Энергоатомиздат, 1996. - 400 с.

120. Самойлов, А. Г. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов / А. Г. Самойлов, В. С. Волков // Атомная энергия. - 1959. - Т. 6, № 3. - С. 261-276.

121. Обзор ядерных аварий с возникновением СЦР : отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-13638-TR / Т. Маклафлин, Ш. Монахан, Н. Прувост [и др.]. - Лос-Аламос : Лос-Аламосская национальная лаборатория, 2003. - 210 с.

122. Nuntaphan, A. Enhancement of heat transport in thermosyphon air preheater at high temperature with binary working fluid: A case study of TEG–water / A. Nuntaphan, J. Tiansuwan, T. Kiatsiriroat // Applied Thermal Engineering. - 2002. - Vol. 22. - P. 251-266.

123. Cheng, L. Two phase flow and thermal physics of nanofluids: understanding the fundamentals, mechanisms and challenges / L. Cheng, G. Xia // Proceedings of the 3rd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer. - Budapest, 2018. - P. 1-16.

124. Khandekar, S. Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids / S. Khandekar, Y. M. Joshi, B. Mehta // International Journal of Thermal Sciences. - 2008. - Vol. 47, N 6. - P. 659-667.

125. Kharangate, C. R. Effects of two-phase inlet quality, mass velocity, flow orientation, and heating perimeter on flow boiling in a rectangular channel: Part 2 – CHF experimental results and model / C. R. Kharangate, L. E. O'Neill, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2016. - Vol. 103. - P. 1280-1296.

126. Pinate, W. Critical heat flux of a two-phase closed thermosyphon with fins / W. Pinate, S. Rittidech // Journal of Mechanical Science and Technology. - 2018. - Vol. 32, N 5. - P. 2357-2364.

127. The investigation of the two-phase thermosyphon performance limit / C. C. Chang, Z. L. Huang, Y. C. Chiang, S. L. Chen // Journal of Marine Science and

Technology. - 2018. - Vol. 26, N 2. - P. 217-227.

128. Arkhipov, V. Numerical simulation of heat transfer in a closed two-phase thermosiphon / V. Arkhipov, A. Nee, L. Valieva // Key Engineering Materials. - 2017. - Vol. 743. - P. 449-453.

129. Nurpeiis, A. Experimental study of temperatures in characteristic sections of the working zone of a closed two-phase thermosyphon under the condition of a heat removal by external periphery / A. E. Nurpeiis, E. G. Orlova, G. Y. Mamontov // MATEC Web of Conferences. - 2017. - Vol. 141, Art. 01006. - P. 1-5.

130. Вергун, А. П. Численный анализ влияния коэффициента заполнения на интенсивность теплопереноса в закрытом двухфазном термосифоне / А. П. Вергун, А. Э. Ни, А. Е. Нурпейис // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2016. - № 1/2. - С. 114-121.

131. Charge and discharge characteristics of a thermal energy storage device / J. C. Wang, S. J. Lin, S. L. Chen [et al.] // Experimental Heat Transfer. - 2005. - Vol. 18, N 1. - P. 45-60.

132. Кузнецов, Г. В. Влияние степени заполнения термосифона на перепад температуры по высоте парового канала / Г. В. Кузнецов, Д. В. Феоктистов, К. О. Пономарев // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену : в 3 томах. - Москва, 2018. - Т. 2. - С. 78-81.

133. Chieh, J. J. Thermal performance of cold storage in thermal battery for air conditioning / J. J. Chieh, S. J. Lin, S. L. Chen // International Journal of Refrigeration. - 2004. - Vol. 27, N 2. - P. 120-128.

134. Jafari D. et al. Unsteady experimental and numerical analysis of a two-phase closed thermosyphon at different filling ratios // Exp. Therm. Fluid Sci. Elsevier, 2017. Vol. 81. P. 164–174.

135. Гидродинамика проточного барботажного слоя в вертикальном канале / М. К. Безродный, П. А. Барабаш, И. А. Назарова, А. П. Костюк // Промышленная теплотехника. - 2009. - Т. 31, № 4. - С. 27-33.

136. Костюк, О. П. Режимы течії двофазових сумішей у проточному барботажному шарі утилізатора теплоти відхідних газів / О. П. Костюк // Вісник

Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. - 2014. - № 12/1055. - С. 163-170.

137. Guo, T. Experimental study on flooding and flow reversal in small diameter tubes with various inclinations and horizontal lengths / T. Guo, J. H. Jeong // International Journal of Refrigeration. - 2014. - Vol. 38. - P. 290-298.

138. Smith, K. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons Part A: Flow regimes / K. Smith, R. Kempers, A. J. Robinson // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2018. - Vol. 119. - P. 907-921.

139. Alammam, A. A. Effect of inclination angle and fill ratio on geyser boiling phenomena in a two-phase closed thermosiphon – Experimental investigation / A. A. Alammam, R. K. Al-Dadah, S. M. Mahmoud // Energy Conversion and Management. - 2018. - Vol. 156. - P. 150-166.

140. Numerical analysis of a closed loop two-phase thermosyphon under states of single-phase, two-phase and supercritical / Y. Bai, L. Wang, S. Zhang [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2019. - Vol. 135. - P. 354-367.

141. Investigation of separated two-phase thermosiphon loop for relieving the air-conditioning loading in datacenter / H. Daraghme, M. Sulaiman, K. S. Yang, C. C. Wang // Energies. - 2019. - Vol. 12, Art. 105. - P. 1-18.

142. Kim Y. et al. Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios // Appl. Therm. Eng. 2018. Vol. 145. P. 328–342.

143. Corumlu, V. Evaluation of heat transfer mechanisms in heat pipe charged with nanofluid / V. Corumlu, A. Ozsoy, M. Ozturk // Arabian Journal for Science and Engineering. - 2019. - Vol. 44, N 6. - P. 5195-5213.

144. Kiseev, V. Heat transfer enhancement in a loop thermosyphon using nanoparticles/water nanofluid / V. Kiseev, O. Sazhin // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2019. - Vol. 132. - P. 557-564.

145. Experimental and numerical analysis of a nanofluidic thermosyphon heat exchanger / M. Ramezanizadeh, M. A. Nazari, M. H. Ahmadi, K. W. Chau /

Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. - 2019. - Vol. 13, N 1. - P. 40-47.

146. Красношлыков, А. С. Исследование влияния свойств теплоносителей на интенсивность теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах / А. С. Красношлыков // труды IV Международного молодёжного форума “Интеллектуальные энергосистемы”: в 3 томах. - Томск, 2016. - Т. 1. - С. 13-16.

147. Meena, P. Effect of evaporator section lengths and working fluids on operational limit of closed loop oscillating heat pipes with check valves (CLOHP/CV) / P. Meena, S. Rittidech, P. Tammaeng // American Journal of Applied Sciences. - 2009. - Vol. 6, N 1. - P. 133-136.

148. Wang, J. Experimental investigation of the transient thermal performance of a bent heat pipe with grooved surface / J. Wang // Applied Energy. - 2009. - Vol. 86, N 10. - P. 2030-2037.

149. Narcy, M. Experimental investigation of a confined flat two-phase thermosyphon for electronics cooling / M. Narcy, S. Lips, V. Sartre // Experimental Thermal and Fluid Science. - 2018. - Vol. 96. - P. 516-529.

150. Application of nanofluids in thermosyphons: A review / M. Ramezanizadeh, M. A. Nazari, M. H. Ahmadi, E. Açıkkalp // Journal of Molecular Liquids. - 2018. - Vol. 272. - P. 395-402.

151. Geyser boiling in a thermosyphon with nanofluids and surfactant solution / A. Kujawska, B. Zajackowski, L. M. Wilde, M. H. Buschmann // International Journal of Thermal Sciences. - 2019. - Vol. 139. - P. 195-216.

152. Sajid, M. U. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review / M. U. Sajid, H. M. Ali // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2019. - Vol. 103. - P. 556-592.

153. A novel method to measure thermal conductivity of nanofluids / G. Xu, J. Fu, B. Dong [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2019. - Vol. 130. - P. 978-988.

154. Thermosyphons with innovative technologies / L. L. Vasiliev, L. P. Grakovich, M. I. Rabetsky [et al.] // Applied Thermal Engineering. - 2017. - Vol. 111. -

P. 1647-1654.

155. A novel energy pile: The thermo-syphon helical pile / J. Huang, J. S. McCartney, H. Perko [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. - 2019. - Vol. 159, Art. 113882. - P. 1-10.

156. Fertahi S.E.D. et al. Performance optimization of a two-phase closed thermosyphon through CFD numerical simulations // *Appl. Therm. Eng.* 2018. Vol. 128. P. 551–563.

157. Numerical evaluation of the cooling performance of a composite L-shaped two-phase closed thermosyphon (LTPCT) technique in permafrost regions / W. Pei, M. Zhang, Z. Yan [et al.] // *Solar Energy*. - 2019. - Vol. 177. - P. 22-31.

158. Fadhil, O. T. Experimental study of the thermal characteristics for a thermosyphon pipe with finned condenser / O. T. Fadhil, M. B. Al Hadithi, H. M. Al Hiti // *Alnahrain Journal for Engineering Sciences*. - 2016. - Vol. 19, N 2. - P. 301-309.

159. Naresh, Y. Thermal performance of an internally finned two phase closed thermosyphon with refrigerant R134a: A combined experimental and numerical study / Y. Naresh, C. Balaji // *International Journal of Thermal Sciences*. - 2018. - Vol. 126. - P. 281-293.

160. Coaxial anodic oxidation under dynamic electrolyte conditions for inner surface patterning of high-aspect-ratio and slim Ti tubes / Y. Wang, L. Sun, C. Xiang [et al.] // *Corrosion Science*. - 2017. - Vol. 124. - P. 193-197.

161. Qu, J. Effects of functional surface on performance of a micro heat pipe / J. Qu, H. Wu, P. Cheng // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. - 2008. - Vol. 35, N 5. - P. 523-528.

162. Hu Z.-F. Heat-Resistant Steels, Microstructure Evolution and Life Assessment in Power Plants // *Thermal Power Plants* / ed. Rasul M. Rijeka: IntechOpen, 2012.

163. Kuznetsov G. V. et al. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V., 2021. Vol. 422, № July. P. 127518.

164. Feoktistov D. V. et al. Expanding the scope of SiC ceramics through its

surface modification by different methods // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V., 2022. Vol. 435, № November 2021. P. 128263.

165. Shaheen M.E., Fryer B.J. Femtosecond laser ablation of brass: A study of surface morphology and ablation rate // *Laser Part. Beams*. 2012. Vol. 30, № 3. P. 473–479.

166. Orlova E. et al. Influence of the Texture Configuration of Heating Surfaces Created by Laser Irradiation on the Ignition and Combustion Characteristics of Liquid Fuels // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13, № 1.

167. Kuznetsov G.V. et al. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment // *Appl. Surf. Sci.* 2019. Vol. 469.

168. Glushkov D.O. et al. Conditions and characteristics of droplets breakup for industrial waste-derived fuel suspensions ignited in high-temperature air // *Fuel*. 2020. Vol. 265.

169. Neuymin V.M. The results of economic and exergetic analysis of thermal power plants with natural gas power units // *Energetik*. 2013. № 7. P. 2–5.

170. Belošević S. et al. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants // *Appl. Therm. Eng.* Pergamon, 2015. Vol. 74. P. 102–110.

171. Alekhnovich A.N., Bogomolov V.V., Artem'yeva N.V. Features of new energy coals burning at thermal power stations in Russia // *Energetik*. 2013. № 6. P. 83–87.

172. Vershinina K.Y. et al. Oil-filled cryogels: new approach for storage and utilization of liquid combustible wastes // *Ind. Eng. Chem. Res.* American Chemical Society, 2019. Vol. 58, № 16. P. 6830–6840.

173. Chen J. et al. Investigations on continuous-wave laser and pulsed laser induced controllable ablation of SiCf/SiC composites // *J. Eur. Ceram. Soc.* Elsevier, 2021. Vol. 41, № 12. P. 5835–5849.

174. Kuznetsov G. V. et al. Dynamic characteristics of water spreading over laser-textured aluminum alloy surfaces // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* Elsevier, 2020. Vol. 603, № June. P. 125253.

175. Kuznetsov G.V. et al. New approach to the heat transfer modeling in the coolant layer on the lower cover of a thermosyphon // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. Vol. 163.
176. Kim J. et al. Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on a superhydrophilic aluminum surface // *J. Heat Transfer. American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, 2017. Vol. 139, № 10.
177. Kuznetsov G. V. et al. Heat transfer in a two-phase closed thermosyphon working in Polar Regions // *Therm. Sci. Eng. Prog. Elsevier Ltd*, 2021. Vol. 22. P. 100846.
178. Boinovich L.B. et al. Synergistic effect of superhydrophobicity and oxidized layers on corrosion resistance of aluminum alloy surface textured by nanosecond laser treatment // *ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society*, 2015. Vol. 7, № 34. P. 19500–19508.
179. Boinovich L.B. et al. 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 (Ap // *Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V.*, 2016. Vol. 379. P. 111–113.
180. Sazhin S.S. Bubble nucleation mechanisms of liquid drops superheated in other liquids // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2004. Vol. 47. P. 2927–2940.
181. Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids / ed. Alekseev V.A. Moscow: Nauka, 1972. 721 p.
182. Volkov A.I., Zharsky I.M. Big chemical reference book. Minsk: Modern School, 2005. 608 p.
183. Ström G., Fredriksson M., Stenius P. Contact angles, work of adhesion, and interfacial tensions at a dissolving Hydrocarbon surface // *J. Colloid Interface Sci. Academic Press*, 1987. Vol. 119, № 2. P. 352–361.
184. Panzer J. Components of solid surface free energy from wetting measurements // *J. Colloid Interface Sci. Academic Press*, 1973. Vol. 44, № 1. P. 142–161.

185. Ohm A. No Title // Pharm. Ind. 1986. Vol. 48. P. 510.
186. Koerner G., Rossmly G., Sanger G. No Title // Goldschmidt informiert Essen No. 29. 1974.
187. Jie-Rong C., Wakida T. Studies on the Surface Free Energy and Surface Structure of PTFE Film Treated with Low Temperature Plasma // J Appl Polym Sci. John Wiley & Sons, Inc, 1997. Vol. 63. P. 1733–1739.
188. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Experimental determination of the surface energy of polycrystalline ice // Dokl. Phys. Chem. 2014. Vol. 459, № 2. P. 198–202.
189. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers // J. Appl. Polym. Sci. John Wiley & Sons, Ltd, 1969. Vol. 13, № 8. P. 1741–1747.
190. Feoktistov D. et al. Conditions for and Characteristics of the Dispersion of Gel Fuel Droplets during Ignition // Appl. Sci. 2023. Vol. 13, № 2.
191. Hoorfar M., W. Neumann A. Recent progress in Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) // Adv. Colloid Interface Sci. 2006. Vol. 121, № 1–3. P. 25–49.
192. Bateni A. et al. A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 2003. Vol. 219, № 1–3. P. 215–231.
193. Rulison C. Application Report Predicting the dispersability of particles Two-Component Surface Energy Characterization as a Predictor of Wettability and Dispersability // Krus. Appl. note AN213. 2000. Vol. Applicatio, № 40. P. 1–22.
194. Феоктистов Д.В., Кузнецов Г.В., Абедтазехабади Акрам, Орлова Е.Г., Бондарчук С.П. Д.А.В. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Vol. 334, № 4. P. 12–18.
195. Feoktistov D. V., Orlova E.G., Islamova A.G. Spreading behavior of a distilled water droplet on a superhydrophobic surface // MATEC Web Conf. 2015. Vol. 23. P. 01054.
196. Wieland M. et al. Wavelength-dependent measurement and evaluation of

surface topographies: Application of a new concept of window roughness and surface transfer function // *Wear*. 2000. Vol. 237, № 2. P. 231–252.

197. Moldovan E.R. et al. Wettability and Surface Roughness Analysis of Laser Surface Texturing of AISI 430 Stainless Steel // *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15, № 8. P. 2955.

198. Климков Ю.М., Майоров В.С., Хорошев М.В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Москва: МИИГАиК, 2014. 108 р.

199. Pogorzelski S. et al. Wettability of Metal Surfaces Affected by Paint Layer Covering // *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15, № 5. P. 1830.

200. Reinhardt H. et al. Nanoscaled Fractal Superstructures via Laser Patterning—A Versatile Route to Metallic Hierarchical Porous Materials // *Adv. Mater. Interfaces*. 2021. Vol. 8, № 4. P. 2000253.

201. Bizi-Bandoki P. et al. Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations // *Appl. Surf. Sci.* 2013. Vol. 273. P. 399–407.

202. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Laser Obtained Superhydrophobic State for Stainless Steel Corrosion Protection, a Review // *Coatings*. 2023. Vol. 13, № 1. P. 194.

203. Bizi-Bandoki P. et al. Time dependency of the hydrophilicity and hydrophobicity of metallic alloys subjected to femtosecond laser irradiations // *Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V.*, 2013. Vol. 273. P. 399–407.

204. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. - 2-е изд., доп. и перераб. - Киев : Факт, 2005. - 700 с.

205. Prediction of water droplet behavior on aluminum alloy surfaces modified by nanosecond laser pulses / D. V. Zaitsev, K. A. Batishcheva, G. V. Kuznetsov, E. G. Orlova // *Surface & Coatings Technology*. - 2020. - Vol. 399, Art. 126206. - P. 1-9.

206. Smith K. et al. The effects of bend angle and fill ratio on the performance of a naturally aspirated thermosyphon // *Appl. Therm. Eng.* 2016. Vol. 101. P. 455–467.

207. Табенкин, А. Н. Шероховатость, Волнистость, Профиль.

Международный Опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. - СПб : Издательство Политехнического Университета, 2007. - 136 с.

208. Mikic, B. B. A New Correlation of Pool-Boiling Data Including the Effect of Heating / B. B Mikic, W. M. Rohsenow // Journal of Heat Transfer. - 1969. - Vol. 91, N 2. - P. 245-250.

209. Ivey, H. J. Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity in nucleate boiling / H. J. Ivey // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 1967. - Vol. 10, N 8. - P. 1023-1040.

210. Xu Z. et al. Heat performances of a thermosyphon as affected by evaporator wettability and filling ratio // Appl. Therm. Eng. Pergamon, 2018. Vol. 129. P. 665–673.

211. Solomon A.B. et al. Thermal performance of anodized two phase closed thermosyphon (TPCT) // Exp. Therm. Fluid Sci. 2013. Vol. 48. P. 49–57.

212. Cen J. et al. Experimental study of the heat-transfer performance of an extra-long gravity-assisted heat pipe aiming at geothermal heat exploitation // Sustain. 2021. Vol. 13, № 22.

213. Noie S.H., Emami M.R.S., Khoshnoodi M. Effect of inclination angle and filling ratio on thermal performance of a two-phase closed thermosyphon under normal operating conditions // Heat Transf. Eng. 2007. Vol. 28, № 4. P. 365–371.