

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Абедгазехабади Акрам

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Томск – 2023

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

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

Феоктистов Дмитрий Владимирович,
кандидат технических наук.

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

Богомолов Александр Романович,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра теплоэнергетики, заведующий кафедрой.

Защита состоится «21» сентября 2023 года в 14 час. 00 мин. на заседании объединенного междисциплинарного диссертационного совета МДС.ТПУ.08 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'ТМ'.

Глушков Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Главными проблемами энергетического комплекса любой страны является переход к альтернативным возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) и снижение антропогенного воздействия процессов сжигания ископаемых топлив на окружающую среду. Несмотря на колоссальные вложения в развитие отрасли и технологий возобновляемых источников энергии, 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 этой проблемы является использование новых видов топлив (композиционных), представляющих собой смесь твердых натуральных топлив, воды и различных энергетических добавок в виде отработанных жидких горючих углеводородов. К таким перспективным энергоресурсам относятся водоугольные (ВУТ) и органоводоугольные (ОВУТ) топлива. До настоящего времени для таких композиционных топлив (как и для широко используемых) 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.

Зажигание и горение многокомпонентных топлив при определенных условиях происходит в условиях диспергирования капель (вторичного измельчения). Последнее известно под терминами паффинг и микровзрыв. Экспериментально установлен механизм диспергирования – разрушение паровых пузырей в ядре капли. Но пока не определены причины, особенности и масштабы протекания этого эффекта при зажигании и горении композиционных топлив в условиях кондуктивного нагрева.

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. 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. 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.

Перспективным способом обработки металлических поверхностей, придающим поверхности важные на практике (гидрофобные и гидрофильные) свойства, является лазерная обработка. До настоящего времени достаточно ограничена информация о закономерностях и характеристиках процесса тепломассопереноса и гидромеханики в термосифонах (ТС), внутренняя поверхность которых модифицирована лазерным излучением. Не установлено влияние текстуры внутренних поверхностей термосифонов 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 лазерным воздействием поверхностями нижней и верхней крышек в условиях тепловых потоков высокой плотности, характерных для элементов конструкции, например, ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в аварийных режимах.

Целью работы – на базе лазерных подходов модификации поверхностных свойств металлов разработать физические основы получения новых конструкционных материалов поверхностей нагрева, позволяющих интенсифицировать процессы химического реагирования, тепломассопереноса и фазовых превращений.

Достижение поставленной цели предполагало решение следующих задач:

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 ОВУТ, эмульсии и масла в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме пуска и в режиме номинальной работы оборудования.

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.

3. Оценка возможности смещения кризиса теплообмена второго рода (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур путем модификации теплопередающих поверхностей нагрева лазерным излучением наносекундной длительности

4. 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 микроскопии, профилометрии, рентгеноспектрального микроанализа, гониометрии, шпирин-метод, кольца Дью Нуи, Вильгельми, Оуэнса Вендта Рабеля и Кьельбле (ОВРК), а также хорошо апробированные методики высокоскоростной регистрации быстропотекающих процессов химического реагирования, фазовых превращений и методики измерений температуры, основанные на применении малоинерционных миниатюрных термпар. При анализе результатов выполненных исследований применены методы оценки случайных и систематических погрешностей измерений, методы математической статистики.

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 (масла до 25 %, эмульсии до 28 %, суспензии до 55 %) в условиях, соответствующих пуску энергогенерирующего оборудования.

3. 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, а также широко используемых на практике обычных жидких топлив.

4. Экспериментально доказано, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов.

5. Установлено, 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).

6. Обоснована 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.

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. 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.

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 ОБУТ, эмульсии и масла в обычном жидком состоянии в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме пуска и в режиме номинальной работы оборудования.

2. Модели процессов паффинга и микровзрыва капель в условиях высокотемпературного нагрева, достаточного для стабильного зажигания многокомпонентных топлив.

3. Обоснование того, что лазерный способ обработки поверхностей металлов (алюминия и нержавеющей стали) 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.

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: Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 23–25 апреля 2019 г.; IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 28–30 октября 2020 г.; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 20–22 апреля 2021 г.; II Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения», г. Томск, 13–15 декабря 2022 г.

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

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, основных результатов и выводов по диссертации, списка литературных источников, включающего 213 наименований, содержит 34 рисунка, 15 таблиц, 172 страницы.

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, диспергирования, испарения на модифицированных поверхностях металлов.

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 ОВУТ, эмульсии и масла в обычном жидком состоянии в условиях, соответствующих условиям работы энергогенерирующего оборудования в режиме запуска и в режиме номинальной работы оборудования.

На поверхностях стали формировались четыре вида текстуры. Из них одна, с условным обозначением Р, обрабатывалась абразивными материалами (шлифовкой и полировкой). Лазерным излучением

наносекундной длительности сформирована конфигурация текстур в виде параллельных микроканалов с условным обозначением АВ, А2В, 2АВ. На поверхностях АВ ширина текстурированной локальной области поверхности

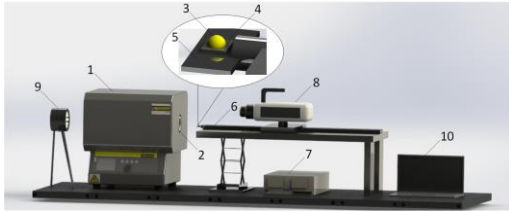


Рисунок 1 – Модель экспериментального стенда смешанного подвода теплоты к капле топлива: 1 – трубчатая муфельная печь; 2 – керамическая трубка; 3 – капля топлива; 4 – поверхность стали; 5 – штатив; 6 – координатный механизм; 7 – блок управления координатным механизмом; 8 – высокоскоростная видеокамера; 9 – проектор; 10 – ПК

принята в два раза больше ширины нетекстурированной части поверхности (65 мкм). На поверхностях А2В ширина текстурированной локальной области поверхности (130 мкм) принята в два раза больше ширины нетекстурированной части поверхности (65 мкм). На поверхностях 2АВ ширина микроканала составляет 65 мкм, а ширина нетекстурированной части 130 мкм. На рис. 1 и 2 показаны модели экспериментальных стендов, используемых в проведенных исследованиях.

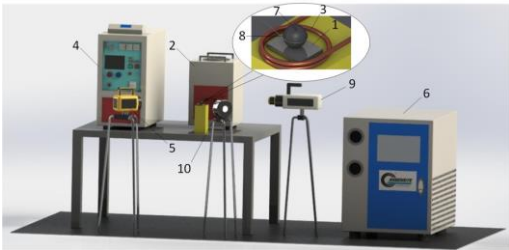


Рисунок 2 – Модель экспериментального стенда кондуктивного подвода теплоты к капле топлива: 1 – модифицированная поверхность стали; 2 – электромагнитный индуктор; 3 – индукционная спираль; 4 – блок управления индуктором; 5 – тепловизионная видеокамера; 6 – чиллер; 7 – капля топлива; 8 – держатель; 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – проектор

Использовалось два состава композиционного топлива и отработанное машинное масло, входящее в состав этих композиционных топлив. 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.). Температура воздушной среды (рис. 1) в полости трубки печи и температура поверхности стали (рис. 2) были равны и составляли 950 °С.

В экспериментах определялись основные характеристики: время задержки зажигания (τ_d), максимальный размер области выгорания топлива (D_{max}), число инициаций паффинга (N), время выгорания (τ_{burn}). В экспериментальных исследованиях при смешанном подводе теплоты дополнительно определялся контактный диаметр растекания капель топлив (d_s). До и после проведения экспериментов по зажиганию и горению топлив поверхности исследовались методами сканирующей электронной микроскопии, профилометрии. По результатам анализа поверхностей,

предварительно прошедших процедуру очистки от загрязнений воздухом под давлением 10 бар, не зарегистрировано отложений продуктов горения на модифицированных лазерным излучением поверхностях после проведения экспериментов по горению топлив. Сделан вывод о том, что конфигурация текстуры в виде микроканалов, сформированных лазерным излучением, позволяет значительно увеличить стойкость поверхностей нагрева к адгезии продуктов горения топлив. На рис. 3 приведены зависимости времен задержки зажигания каплей топлив от площади проекции межфазной поверхности «капля топлива – поверхность нагрева» в условиях смешанного подвода теплоты. Установлено, что времена задержки зажигания каплей топлив, расположенных на поверхностях, текстурированных лазерным излучением, меньше, чем на полированной поверхности. Последнее обусловлено большей площадью контакта между каплей топлива и поверхностью нагрева. Из используемых в экспериментах конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов наибольший положительный эффект на время задержки зажигания (рис. 3) оказывает текстура поверхности 2AB не только по причине лучшего растекания каплей топлива по ней, но и за счет наибольшего прироста площади поверхности, обусловленной развитой шероховатостью. На рис. 4 приведены характеристики, зарегистрированные в условиях смешанного подвода теплоты. В порядке увеличения времен полного выгорания каплей жидких топлив поверхности стали располагаются в следующей последовательности: 2AB, AB, A2B, P (рис. 4б). Наименьшие значения числа инициаций паффинга и максимального размера области выгорания зарегистрированы при зажигании и горении каплей топлив на полированной поверхности. В таких условиях время полного выгорания каплей будет больше, чем на текстурированных поверхностях нагрева. Наибольшие же значения N , D_{\max} и наименьшие τ_{burn} зарегистрированы на текстурированной поверхности 2AB (рис. 4). На текстуре 2AB физико-химические процессы, происходящие в условиях зажигания и горения топлив, реализуются намного интенсивнее по сравнению с использованием полированной, AB и A2B текстур в качестве поверхностей нагрева.

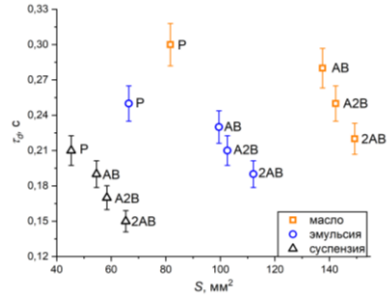


Рисунок 3 – Зависимости времен задержки зажигания каплей топлив от площади проекции межфазной поверхности «капля топлива – поверхность нагрева» в условиях смешанного подвода теплоты к поверхностям стали P, AB, A2B, 2AB

Как и в случае смешанного подвода теплоты, при кондуктивном нагреве лазерная обработка поверхностей стали способствует уменьшению времени задержки зажигания. Установлено, что в условиях работы

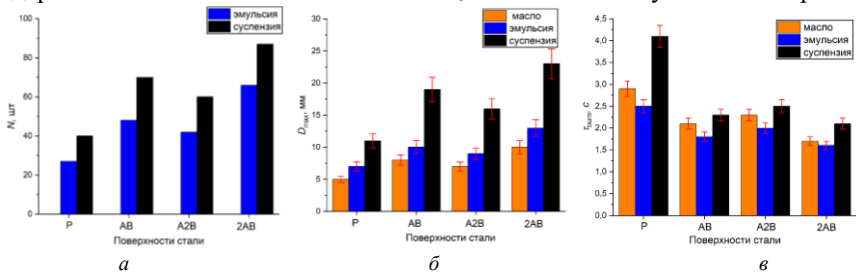


Рисунок 4 – Характеристики, зарегистрированные в условиях смешанного подвода теплоты: *а* – число инициаций паффинга, *б* – максимальный размер области выгорания, *в* – времена полного выгорания капель топлив в условиях смешанного подвода теплоты

энергогенерирующего оборудования в номинальном режиме для уменьшения времен зажигания капель масла в жидком состоянии, эмульсии и суспензии целесообразно на поверхностях нагрева создавать развитую многомодальную шероховатость, характеризующуюся наибольшим приростом 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 капель композиционных топлив (ОВУТ и эмульсии), а также жидких в условиях работы энергогенерирующего оборудования в номинальном режиме.

На рис. 5 приведены характеристики, зарегистрированные в условиях кондуктивного подвода теплоты. Причинами инициаций паффинга является многокомпонентность топлива, в состав которого обязательно входит вода. Из рассматриваемых текстур поверхность 2AB характеризуется наиболее развитой шероховатостью. 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 AB и A2B. Капли масла в обычном состоянии не диспергируют при горении. По этой причине отсутствуют их значения N (рис. 5а). Рост числа инициаций паффинга интенсифицирует процесс горения за счет увеличения области выгорания. Последнее хорошо иллюстрируют установленные зависимости на рис. 5б. Также зависимости рис. 5б иллюстрируют влияние развитой текстуры на увеличение максимального размера области выгорания капель

топлива (масла в обычном жидком состоянии), горящего без вторичного

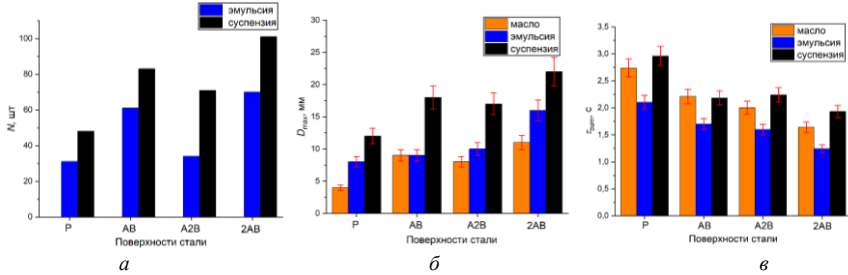


Рисунок 5 – Характеристики, зарегистрированные в условиях кондуктивного подвода теплоты: *a* – число инициаций паффинга, *б* – максимальный размер области выгорания, *в* – времена полного выгорания капле топлив в условиях смешанного подвода теплоты диспергирования вследствие реализации паффинга. Установлено, что за счет развитой текстуры можно увеличить размер области выгорания капле топлив на 65 % (наибольшее увеличение D_{max} зарегистрировано в случае горения капле масла на поверхности 2AB в сравнении с горением на поверхности P). Установлено, что для интенсификации процесса выгорания топлив как жидких, так и композиционных (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}) капле топлив, в том числе и композиционных топлив, в условиях, воспроизводящих пуск и номинальный режим работы энергогенерирующего оборудования, продемонстрировала текстура 2AB.

В третьей главе приведено описание разработанных экспериментальных стендов, полученных результатов и выводы для обоснования гипотезы о механизмах реализации паффинга и микровзрыва капле 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 капле является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Оценка растворимости многокомпонентных составов выполнена на основе широко известного подхода «подобное растворяет подобное». Последний базируется на сопоставлении дисперсионной 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 дисперсионной составляющей. Полярная составляющая поверхностного натяжения характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные). 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 (дисперсионными) 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 дисперсионная составляющая (жидкость должна быть сильно дисперсионной $\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,1$). Для обоснования гипотезы выбраны жидкости, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики жидкостей, используемых в исследовании

Жидкость	Химическая формула / температура кипения, °С	Литературные данные		
		σ_L , мН/м	σ_L^P , мН/м	σ_L^D , мН/м
Вода	H ₂ O/100,0	72,8	51,0	21,8
Моноэтаноламин	C ₂ H ₇ NO/170,0	48,2	29,4	18,8
Глицерол	C ₃ H ₈ O ₃ /290,0	63,4	26,4	37,0
Этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂ /197,3	47,7	16,8	30,9
Ацетон	C ₃ H ₆ O/56,0	25,2	3,1	22,1
Этиловый спирт 95 %	C ₂ H ₆ O/78,3	22,1	4,6	17,5
Дийодметан	CH ₂ I ₂ /182,1	50,8	0,0	50,8
Додекан	C ₁₂ H ₂₆ /216,3	25,4	0,0	25,4
Синтетическое машинное масло	- /190,4	33,4	1,4	32,0
Компрессорное масло	- /190,5	28,01	0,01	28,0
Масло TEDEX TU 32	- /208,0	36,1	1,1	35,0

На основании результатов анализа известных работ 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 % × 50 % (по объему); 4) условия формирования капли – интенсивное перемешивание компонентов при температуре, соответствующей лабораторным условиям, в течение не менее 20 минут со скоростью

вращения магнитного якоря не менее 1200 об/мин; 5) расположение капли – на подвеске. Вышеперечисленные условия реализованы с помощью стенда, модель которого приведена на рис. 6. Жидкости условно разделены на четыре группы по значениям отношения σ_L^P / σ_L^D . В первую группу

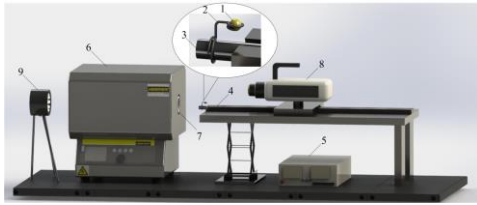


Рисунок 6 – Экспериментальный стенд: 1 – капля жидкости; 2 – держатель; 3 – трубка из стали; 4 – координатный механизм; 5 – блок управления координатным механизмом; 6 – муфельная печь; 7 – керамическая трубка; 8 – высокоскоростная видеокамера; 9 – LED-светильник

«полярных жидкостей» включены жидкости с отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$. Во вторую группу «дисперсионные жидкости с высоким значением полярной составляющей» включены жидкости с отношением

$0,2 \leq \sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 1,0$. В третью группу «дисперсионные жидкости с низким значением

полярной составляющей» включены жидкости, характеризующиеся отношением $0,1 \leq \sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,2$. В четвертую группу «дисперсионные жидкости» включены жидкости с отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D \leq 0,1$. Безразмерный критерий оценки (σ_L^P / σ_L^D), характеризует преобладание связей между молекулами, по которому можно отнести любую жидкость к одной из четырех условно выделенных групп. В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований по регистрации одного из четырех возможных механизмов протекания физико-химических процессов (испарение, кипение, паффинг, микровзрыв).

Таблица 2 – 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. 1) компонента*#1	Принадлежность к группе 1 – 4 (табл. 1) 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. 1.

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

Сформулированы основные положения прогностической оценки реализации 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; дисперсионные с высоким значением полярной составляющей; дисперсионные с низким значением полярной составляющей; дисперсионные. 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 дисперсионной 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 $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$ (должен быть сильно полярным), а второй отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D < 0,1$ (должен быть сильно дисперсионной). Кроме того, необходимо обеспечение внешних условий нагрева, при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела «жидкость – жидкость» стремилось к нулю.

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

Исследования проводились на образцах пластин из нержавеющей стали и алюминия. Лазерной обработкой сформировано четыре вида текстур (рис. 7) с заданными геометрическими характеристиками и шероховатостью: общие точки границ абляционных кратеров (далее по тексту «соприкосновение абляционных кратеров») (рис. 7б); микроканалы (рис. 7в); микростолбики (рис. 7г); 4 – развитая многомодальная, разноуровневая шероховатость (далее по тексту «цветная капуста») (рис. 7д). В экспериментах также использовались полированные поверхности (рис. 7а). Процессы испарения капель воды объемом 5 мкл исследовались по хорошо апробированной методике. Свойства смачивания полированных и модифицированных лазерным излучением поверхностей определялись методами Юнга-Лапласа и Тангенциальный 1. Анализ текстуры проводился методом электронной микроскопии. Трехмерные параметры шероховатости текстуры определены методом профилометрии.

Установлено (рис. 7), что текстура в виде микростолбиков характеризуется наиболее развитой средней шероховатостью, а также наибольшей высотой неровностей, наибольшим значением прироста

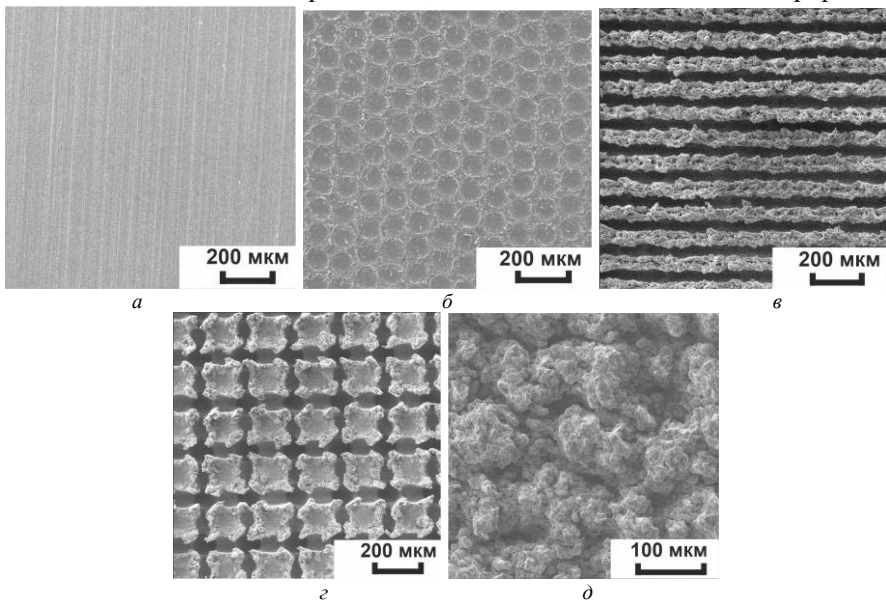


Рисунок 7 – СЭМ-изображения алюминия: *а* – полированная поверхность, *б* – соприкосновение абляционных кратеров, *в* – микроканалы, *г* – микростолбики, *д* – «цветная капуста»

площади поверхности за счет шероховатости. 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. После модификации лазерным излучением поверхности с текстурами в виде микростолбиков, микроканалов и «цветной капусты» характеризуются

супергидрофильностью. На поверхностях с текстурами в виде соприкасающихся абляционных кратеров зарегистрировано улучшение свойств смачивания. Контактный угол на поверхности алюминия уменьшился до $5,0 \pm 1,0^\circ$, на поверхности нержавеющей стали до $8,3 \pm 1,0^\circ$.

Установлено (рис. 8), что путем модификации поверхностей металлов лазерным излучением наносекундной длительности можно осуществить

смещение кризиса теплообмена (эффекта Лейденфроста) в область более высоких температур. Из исследуемых текстур наибольшее смещение

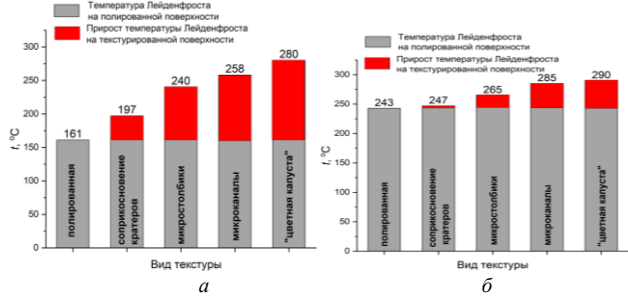


Рисунок 8 – Температура Лейденфроста: поверхность алюминия (а); поверхность нержавеющей стали (б)

температуры Лейденфроста в область больших температур зарегистрировано на поверхности с текстурой в виде «цветной капусты» (рис. 8). Для поверхности алюминия температура увеличивается на 119°C , для поверхности из нержавеющей стали 47°C . Повышение температуры эффекта Лейденфроста связано с улучшением свойств смачиваемости и формированием развитой шероховатости. Большой прирост температуры на поверхностях алюминия по сравнению со стальными связано с тем, что на поверхности алюминия формируется более развитая шероховатость. Установлено, что 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. Экспериментально установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста с 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 острровершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности.

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

Исследования проведены на экспериментальном стенде, модель которого приведена на рис. 9. Термосифон (ТС) изготовлен из меди разделен на испарительную, адиабатную и конденсационную части. Геометрия выбрана с условием $d_h/H_c \approx 1$ (d_h – гидравлический диаметр), при котором процесс

кипения в термосифоне подобен процессу кипения в условиях свободного движения жидкости, а предельные тепловые потоки в ТС не зависели бы от d_h . ТС заполнялся ($\varepsilon_e = 15\%$)

деаэрированной дистиллированной водой. Верхняя крышка термосифона выполнена под углом 10° к горизонту. Такой наклон обеспечивал стекание конденсата преимущественно по одной

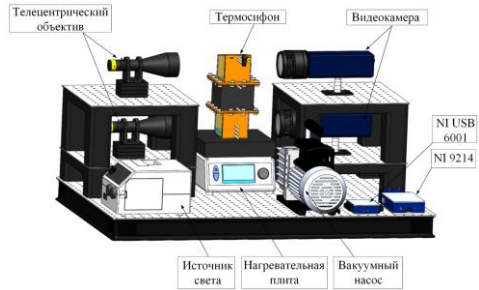


Рисунок 9 – Модель экспериментального стенда

стороне ТС. Термодатчики регистрировали температуру: слоя жидкости в испарителе; пара в испарительной, адиабатной и конденсационной частях; конденсата в конденсаторе, внешних поверхностей нижней и верхней крышек. Тепловое воздействие на испарительную часть термосифона реализовывалось с помощью системы нагрева, включающей в себя нагревательную плиту. Процессы кипения и конденсации регистрировались теньевым оптическим методом. Текстурирование нижней поверхности верхней крышки конденсатора проводилось лазерным излучением наносекундой длительности. Сформирована текстура с общими точками границ абляционных кратеров («соприкосновение абляционных кратеров»). 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. Установлены распределения температур по высоте термосифонов. Типичные зависимости приведены на рис. 10. Экспериментально установлено, что с ростом теплового потока от $10,0$ до $15,0$ кВт/м² температуры по всей высоте термосифона с текстурированными крышками становились ниже, чем температуры в ТС с полированными крышками. 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. Установлено, что увеличение теплового потока от $0,7$ до $5,1$ кВт/м² привело к снижению термического сопротивления. Дальнейший рост теплового потока до $15,0$ кВт/м² 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.

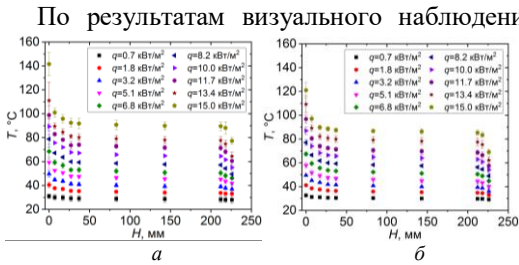


Рисунок 10 – Типичное распределение температур по высоте термосифона: *а* – с полированными, *б* – текстурированными крышками при различных тепловых режимах ($q=0,7-15,0$ кВт/м²)

Пузырьки пара образовывались преимущественно в областях неровностей. Диаметры пузырьков пара не превышали 2,0 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 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. Экспериментально установлено, что в диапазоне тепловых потоков $q=0,7-15,0$ кВт/м² 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 энергонасыщенного оборудования, работающего в условиях аварий (при потере 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 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.

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

1. 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.

2. За счет формирования конфигураций текстур в виде параллельных микроканалов лазерными методами обработки поверхностей металлов можно уменьшить время задержки зажигания капель топлив (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.

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 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.

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 использующихся на практике 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 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 в случае горения капель топлив масла составляет более 40 %, в случае эмульсии 40 %, а в случае суспензии 34 %.

6. 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 дисперсионной составляющих поверхностного натяжения. Микровзрыв реализуется только при смешении взаимно нерастворимых компонентов,

причем один компонент должен характеризоваться отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D > 1,0$ (должен быть полярным), а второй отношением $\sigma_L^P / \sigma_L^D < 0,1$ (должен быть дисперсионным). Кроме того, необходимо обеспечение внешних условий нагрева, при которых значение свободной поверхностной энергии образования поверхности раздела «жидкость-жидкость», стремилось к нулю.

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

8. 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 $110\text{ }^\circ\text{C}$ на поверхности алюминия и более чем на $45\text{ }^\circ\text{C}$ 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 $0,6\text{ мДж}$. 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.

9. Результаты экспериментов обосновывают возможность охлаждения теплонагруженных элементов конструкции энергонасыщенного оборудования 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 $q=0,7-15,0\text{ кВт/м}^2$ при заполнении испарителя на 15 % и в условиях близких к критическим условиям работы термосифонов ($\epsilon=5\text{ \%}$) испаритель ТС не будет осушен.

Список основных трудов по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах:

1. Orlova, E. G. Influence of the texture configuration of heating surfaces created by laser irradiation on the ignition and combustion characteristics of liquid fuels / E. G. Orlova, D. O. Glushkov, **A. Abedtazehabadi**, S. V. Belyaev, D. V. Feoktistov // **Applied Sciences**. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – Article no. 95.

2. Feoktistov, D. V. Conditions for and characteristics of the dispersion of gel fuel droplets during ignition / D. V. Feoktistov, E. G. Orlova, D. O. Glushkov, **A. Abedtazehabadi**, S. V. Belyaev // **Applied Sciences**. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – Article no. 1072.

3. Feoktistov, D. V. Increasing the energy efficiency of cooling systems for energy-saturated equipment by shifting the second kind heat transfer crisis to the higher temperature region / D. V. Feoktistov, G. V. Kuznetsov, **A. Abedtazehabadi**, E. G. Orlova, S. P. Bondarchuk, A. V. Dorozhkin // **Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering**. – 2023. – Vol. 334, No. 4. – P. 72–88.

Публикации в сборниках конференций, индексируемых в базе Scopus:

4. Ponomarev, K. O. Experimental investigation of the heat transfer intensity in thermosyphon / K. O. Ponomarev, D. V. Feoktistov, **A. Abedtazehabadi** // **AIP Conference Proceedings**. – 2019. – Vol. 2135, No. 1. – Article no. 020048.

5. Ponomarev, K. O. Aspects of the research methodology of convection, conduction, evaporation and condensation jointly occurring in the thermosyphon / K. O. Ponomarev, D. V. Feoktistov, **A. Abedtazehabadi** // **AIP Conference Proceedings**. – 2019. – Vol. 2135, No. 1. – Article no. 020047.

6. Ponomarev, K. O. Experimental investigation of the temperature distribution along the two-phase thermosyphon height and the condensation type on the top cover / K. O. Ponomarev, **A. Abedtazehabadi** // **AIP Conference Proceedings**. – 2021. – Vol. 2337, No. 1. – Article no. 020020.