ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

p

Лага Екатерина Юрьевна

Интенсификация теплообмена и фазовых превращений на теплопередающих поверхностях вследствие изменения характеристик приповерхностных слоев металла при воздействии лазерного излучения

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

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

Научный руководитель: Феоктистов Дмитрий Владимирович,

кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ИШФВП, доцент

Официальные оппоненты: Марчук Игорь Владимирович,

доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», механико-математический факультет, декан

Богомолов Александр Романович,

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра теплоэнергетики, заведующий кафедрой

Защита состоится «<u>20</u>» <u>мая</u> 2025 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 43, уч. корпус 3, ауд. 122.



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

Автореферат разослан «___» ____ 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.04 кандидат технических наук, доцент

Д.В. Гвоздяков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка систем охлаждения нового поколения для отвода тепловых потоков высокой плотности, а также разработка эффективных систем энергогенерирующего оборудования невозможна без развития фундаментальных знаний в области создания принципиально новых теплопередающих поверхностей, характеризующихся уникальными функциональными свойствами. Современные наукоемкие лазерные технологии относится к прорывным технологиям в области микротекстурирования поверхностей металлов, в том числе широко используемых в теплоэнергетике алюминиевых сплавов и жаростойких, жаропрочных сталей. Уже достигнутые к настоящему времени результаты показывают, что для решения актуальных задач в области теплотехники и теплофизики лазерные технологии находятся вне конкуренции, поскольку позволяют получить результаты, которые с использованием других технологий либо трудно реализуемы, либо вовсе недостижимы. Актуальность проблемы разработки систем охлаждения нового поколения для отвода тепловых потоков высокой плотности заключается в том, что реализация и развитие достаточно многих перспективных технологий в микроэлектронике, авиационной, космической нефтехимической И промышленности, а также судостроении и промышленной теплоэнергетике сдерживается отсутствием эффективных, надежных и автономных систем, обеспечивающих регламентный температурный режим работы оборудования. В диссертационной работе эта проблема решается путем разработки нового подхода к интенсификации испарения капель, основанного на изменении геометрических параметров и приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей вследствие воздействия лазерного излучения.

Сжигание энергетического топлива в топках котлов на тепловых электрических станциях и водяных котельных является наиболее широко распространенным в мире промышленным способом генерации тепловой и электрической энергии. Типичными проблемами сжигания твердых топлив является отложение продуктов горения и шлакование поверхностей нагрева. Последнее существенно ухудшает теплообмен и снижает эффективность энергогенерирующего оборудования. В мировой практике существуют разные методы борьбы с этими проблемами, но наиболее широко известные способы, как правило, сводятся к изменению состава топлива путем добавления реагентов, которые снижают теплоту сгорания топлива. Поэтому проблема шлакования поверхностей нагрева остается актуальной по настоящее время. В диссертационной работе предложен принципиально новый подход к решению вышеобозначенных проблем, основанный на модификации теплопередающих поверхностей энергогенерирующего оборудования лазерным излучением. Суть нового подхода заключается в формировании приповерхностного слоя, обеспечивающего снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с теплопередающей поверхностью нагрева энергогенерирующего оборудования.

Цель диссертационной работы – разработка нового подхода к интенсификации испарения капель в системах охлаждения капельным орошением и снижению прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с теплопередающей поверхностью нагрева энергогенерирующего оборудования за счет модификации интенсивными потоками энергии (лазерным излучением) геометрических параметров и приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей.

Для достижения поставленной цели решались задачи:

1. Разработка методик экспериментальных исследований процессов теплообмена в условиях испарения капли, расположенной на теплопередающей поверхности с заданными геометрическими параметрами и приповерхностными свойствами; формирование заданных геометрических параметров (текстуры), бифильных и экстремальных свойств смачивания теплопередающих поверхностей; оценка охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине за счет испарения капли теплоносителя.

2. Определение характеристик теплообмена и испарения капли теплоносителя, расположенной на нагретой теплопередающей поверхности, модифицированной лазерным излучением.

3. Определение характеристик приповерхностного слоя (размеров элементов текстуры, их свойств смачивания) теплопередающей поверхности, обеспечивающих интенсификацию теплообмена и испарения капли теплоносителя.

4. Разработка методик проведения экспериментальных исследований и натурных испытаний на действующем объекте теплоэнергетики по определению характеристик формирования золошлаковых отложений; оценка сопротивления модифицированных лазерным излучением теплопередающих поверхностей к золошлаковым отложениям.

5. Определение параметров шероховатости (текстуры) и приповерхностных свойств поверхностей теплообмена, обеспечивающих снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с поверхностью.

6. Анализ процессов, протекающих при формировании шлака на теплопередающей поверхности.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части: пункта 5 – «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»; пункта 6 – «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях»; пункта 9 – «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Научная новизна. Разработан подход к интенсификации процесса охлаждения теплонагруженных поверхностей путем формирования заданной конфигурации микротекстуры, бифильных и экстремальных свойств смачивания. Разработанный подход также позволяет управлять геометрическими характеристиками капель в процессе их интенсивного испарения на теплонагруженной поверхности. Определены скорости испарения и особенности режимов испарения капель на теплопередающих поверхностях, характеризующихся бифильными свойствами смачивания. Проведена оценка охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине за счет испарения капли теплоносителя. Установлены условия реализации «сухих пятен» и роста скорости испарения капли на завершающей стадии.

Предложен принципиально новый подход к интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании, основанный на формировании специального вида текстуры и заданных приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей, обеспечивающих снижение прочности адгезионного контакта золошлаковых отложений с поверхностью. Проведен формировании протекающих анализ процессов, при шлака на теплопередающих модифицированных поверхностях. Определены характеристики растекания шлака.

Теоретическая практическая значимость. И Результаты диссертационного исследования являются основой для решения актуальных проблем теплотехники – интенсификации процессов теплообмена и испарения капель теплоносителя в системах охлажления энергонасыщенного оборудования; интенсификации теплообмена В энергогенерирующем оборудовании за счет снижения негативных последствий формирования золошлаковых отложений. Полученные результаты способствуют развитию фундаментальных знаний о процессах теплообмена и испарения капель теплоносителя, расположенных на теплопередающих поверхностях.

Полученные новые знания о теплообмене при испарении капель, о процессах, протекающих при формировании шлака, на теплопередающих поверхностях, модифицированных интенсивными потоками энергии, являются научной основой для прикладных технологий, направленных на создание перспективных систем охлаждения капельным орошением и повышение срока службы котельного оборудования, профилактики шлакования.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационное исследование выполнено в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», Приоритет-2030-НИП/ЭБ-114-375-2023 и проекта РНФ № 23-73-30004 «Лазерные стратегии в инновационном материаловедении: от авиации и теплоэнергетики до медицины и машиностроения».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. В условиях, характерных началу формирования паровой фазы теплоносителя, для интенсификации процесса испарения капель воды,

расположенных на теплопередающих поверхностях из алюминиевого сплава АМг-2, наиболее предпочтительна комбинация гидрофильных ($\theta_0 = 87,8^\circ$) и супергидрофильных ($\theta_0 = 0^\circ$) свойств смачивания. Для контроля режимов испарения и увеличения скоростей конвективных потоков в капле предпочтительнее на практике использовать бифильные теплопередающие поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачиваемости.

2. На завершающей стадии процесса испарения капли длина линии трехфазного контакта является доминирующим фактором, влияющим на рост скорости испарения и количества теплоты, отводимой от теплонагруженной поверхности.

3. Формирование интенсивными потоками энергии (лазерным излучением) заданных геометрических параметров текстур «Анизотропная» (развитая многомодальная шероховатость) и «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм) на теплопередающих поверхностях теплогенерирующего оборудования, является перспективным подходом для снижения интенсивности шлакования и интенсификации результате формирования многомодальной теплообмена. развитой В на теплопередающих поверхностях создаются шероховатости условия смещения температур образования шлака в область более высоких значений (выше на 60-75 °C по сравнению с немодифицированной сталью 20Х23Н18). Текстура «Анизотропная» способствует уменьшению размера фронта растекания шлака, а текстура «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм) уменьшает толщину расплава шлака за счет увеличения его фронта растекания.

4. При модификации теплопередающих поверхностей лазерным излучением, за счет формирования оксидного слоя и текстуры «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм) снижается прочность адгезионного контакта продуктов горения органического топлива с поверхностью, что позволяет более эффективно проводить очистку теплопередающих поверхностей от золошлаковых отложений.

Степень достоверности. Достоверность полученных в экспериментальных исследованиях 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.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач диссертации. Разработке методик экспериментальных исследований и выборе методов измерений. Проведении экспериментов и обработке их результатов, оценке систематических и случайных погрешностей. Анализе результатов экспериментальных исследований и натурных испытаний. В формулировке выводов и основных защищаемых положений диссертационной работы. Апробации результатов на всероссийских и международных конференциях, подготовка публикаций в журналы, индексируемые в базах Scopus и Web of Science.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных мероприятиях: 1. IX Всероссийская научная конференция международным участием с «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, Россия, 2020 г.; 2. Х Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, Россия, 2021 г.; 3. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и оборудования», Томск, Россия, технологического 2022 г.; 4. Научнопрактическая конференция работающей молодежи Группы «Интер РАО», Москва, Россия, 2022 г.: 5. XVI Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-16), Махачкала, Россия, 2023 г.; 6. XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева, посвященная 100-летию академика В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических Россия, 2023 г.; 7. VIII Всероссийская установках», Казань, научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Махачкала, Россия, 2023 г.; 8. III Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские чтения», Томск, Россия, 2023 г.; 9. XVII Минский международный форум по тепломассообмену, Минск, Белоруссия, 2024 г.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в девяти публикациях, три из них статьи, опубликованные в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных «Web of Science» и «Scopus», входящих в первый квартиль.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературных источников, включающего 110 наименований, содержит 32 рисунка, 12 таблиц, 151 страницу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследований, представлена научная новизна работы и ее практическая и теоретическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, и сведения об их апробации.

В первой главе обобщены известные знания о процессе испарения капель, расположенных на теплопередающих поверхностях, характеризующихся контрастной смачиваемостью. Также выполнен анализ современного состояния теории и практики в области решения проблемы интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании за счет снижения негативных последствий золошлаковых отложений. Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса испарения капель воды, расположенных на теплопередающих поверхностях из алюминиевого сплава АМг-2, с заданными геометрическими параметрами и приповерхностными свойствами.

Использовалось пять групп поверхностей. Поверхности I группы (Polished) использовались в качестве референтных, их поверхность не модифицирована и характеризуется гидрофильными свойствами смачивания ($\theta_0=87,8^\circ$). Поверхности II группы (SHPhi), характеризуются супергидрофильными свойствами смачивания ($\theta_0 \approx 0^\circ$), изготовлены путем модификации лазерным излучением. Суть подхода гидрофилизации заключается в увеличении поверхностной энергии за счет формирования оксидов (полярных соединений) в приповерхностном модифицированном слое, а также в формировании многомодальной развитой текстуры (шероховатости) за счет процессов абляции металла. Поверхности III плавления и группы (SHPho), характеризуются супергидрофобными свойствами (θ_0 =152,5°), изготовлены путем модификации лазерным излучением и проведением последующей процедуры низкотемпературного отжига. Суть подхода гидрофобизации формировании лазерным излучением многомодальной заключается В снижении поверхностной текстуры последующем энергии путем И углеводородных интенсификации процесса адсорбции соединений окружающей (неполярных соединений) ИЗ среды процедурой низкотемпературного отжига (старения). Поверхности IV и V групп характеризуются бифильными свойствами смачивания. Поверхности IV группы изготовлены с использованием поверхностей, характеризующихся супергидрофобными свойствами (III группы $\theta_0=152,5^\circ$) путем формирования на их поверхности супергидрофильных (θ₀≈0°) участков с заданными параметрами. Изготовлено две геометрическими серии бифильных поверхностей IV группы с одним супергидрофильным кольцом (BiPhi1) (рисунок la) и с тремя концентрическими супергидрофильными кольцами (BiPhi2) (рисунок 1б). Бифильные поверхности V группы изготовлены путем формирования на полированной поверхности I группы (*θ*₀=87,8°) супергидрофильных участков ($\theta_0 \approx 0^\circ$) в виде одного (BiPhi3) (рисунок 1в) или трех (BiPhi4) концентрических колец (рисунок 1г) аналогично бифильным поверхностям IV группы.



Рисунок 1 – СЭМ-изображения бифильных поверхностей: a) BiPhi1; б) BiPhi2; в) BiPhi3; г) BiPhi4

Исследование процесса испарения капель теплоносителя проводилось на



Рисунок 2 – Экспериментальная установка по исследованию процесса испарения капли теплоносителя: 1 – капля; 2 – электронный дозатор; 3 – поверхность; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – источник света; 6 – телецентрическая оптическая труба; 7 – фотоаппарат; 8 – F-mount адаптер; 9 – 6,5Х увеличительная труба; 10 – делитель пучка; 11 – 4х объектив; 12 – стеклокерамическая плита; 13 – медный параллелепипед; 14 – бокс

Капля рисунке 2. дистиллированной деаэрированной воды объемом 5 мкл при помощи электронного дозатора поверхность помешалась на АМг-2, нагретой до 100 °С. Контроль температуры нагрева поверхности осуществлялся высокоточной малоинерционной системой регистрации температур, представленной на рисунке 3.

установке, представленной на

Анализ текстуры проводился методом

электронной микроскопии. Геометрические параметры поверхностей (трехмерные параметры шероховатости) определены методом конфокальной микроскопии.

Свойства смачивания определялись по значению статического контактного

угла $(heta_0)$ и	угла	скатыван	ия	Обра
$(heta_{ m roll})$ c	исп	ользовани	ем	Термон
оборудования	I	теневс	ого	repaidle
оптического		мето	да.	
Геометрическ	ие	разме	ры	
испаряющейс	я	кап	ли	
(объем (V),		диаме	етр	
основания (d)	,	площа	ідь	М пара
поверхности	(<i>S</i>),	контактн	ый	Р
угол (θ))	опред	целялись	с	



Рисунок 3 – Система регистрации температур

использованием оборудования теневого оптического метода. Исследование процессов зарождения, роста и разрушения пузырей в капле осуществлялось с помощью оборудования верхней оптической системы. Определение скорости конвективных потоков в испаряющейся капле осуществлялось по методике micro-PIV.

Удельная скорость испарения капли определялась по уравнению:

$$W = \frac{\rho \cdot \Delta V}{\Delta \tau \cdot (S_i + S_{i+1})/2}, \, \kappa \Gamma / (\mathrm{M}^2 \cdot \mathrm{c}),$$

где $\Delta \tau = \tau_{i+1} - \tau_i$ – разница между текущим и следующим моментом времени, с; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; $\Delta V = V_i - V_{i+1}$ – разница между объемами капли в момент времени τ_i и τ_{i+1} , соответственно, м³; S_i, S_{i+1} – площади межфазных поверхностей капли «вода/воздух» в момент времени τ_i и τ_{i+1} , м².

На рисунке 4 представлены зависимости безразмерных параметров контактного угла, контактного диаметра, объема капли и удельной скорости испарения капли теплоносителя от безразмерного времени её испарения. Безразмерные параметры определены как отношение *i*-го значения к наибольшему значению экспериментально зарегистрированной величины.



Рисунок 4 – Зависимости безразмерных геометрических размеров и удельной скорости испарения капли воды от безразмерного времени её испарения: а) контактного угла; б) контактного диаметра; в) объем капли; г) удельной скорости испарения

На бифильных поверхностях BiPhi3 и BiPhi4 комбинация гидрофильных и супергидрофильных свойств существенно интенсифицирует процесс испарения капли воды по сравнению с комбинацией экстремальных свойств смачивания, а также полированной поверхностью. Последнее обусловлено преимущественно бо́льшим контактным диаметром растекания капли по поверхностям BiPhi3 и BiPhi4.

На поверхности BiPhil с экстремальными свойствами смачивания и одним супергидрофильным кольцом интенсивность испарения значительно ниже, чем на полированной поверхности Polished (рисунок 4г). Последнее обусловлено тем, что на поверхности BiPhil на оси симметрии супергидрофильного кольца (в супергидрофобной части поверхности) в начале процесса испарения капли воды устойчиво формируется паровой пузырь (рисунок 5в). Со временем пузырь увеличивается в размерах до внутренней границы супергидрофильного кольца. При испарении капли не менее чем на 2/3 части начального объема пузырь разрушается с образованием «сухого пятна». После разрушения парового пузыря не испарившаяся часть теплоносителя распределяется по супергидрофильной части кольца. Образование «сухих пятен» нежелательно в системах охлаждения, поскольку сопровождаются значительным перегревом охлаждаемой поверхности. На поверхности BiPhi2 (с тремя концентрическими супергидрофильными кольцами), а также на поверхностях BiPhi3 и BiPhi4 не образуется подобного рода пузырей.

По результатам анализа зависимостей контактного угла и контактного диаметра (рисунок 4а и рисунок 4б) выделены режимы испарения капли. Особенность режимов испарения капель на бифильных поверхностях с комбинацией супергидрофильных и супергидрофобных свойств заключается в том, что на них капля испаряется в одном режиме пиннинга в продолжение всего времени жизни. Линия трехфазного контакта «пиннингуется» (зацепляется) в области супегидрофильного кольца. При этом внешняя по отношению к кольцу супергидрофобная область препятствует дальнейшему растеканию капли. Проведенные эксперименты показали, что формирование с заданными геометрическими параметрами супергидрофильных колец на супергидрофобной поверхности позволяет управлять режимами испарения капель, с высокой точностью контролировать контактный диаметр капли в режиме испарения пиннинг.

Проведена оценка охлаждения приповерхностного слоя на заданной толщине (160 мкм), за счет испарения капли теплоносителя. Оценка охлаждения определена как разница температур приповерхностного слоя до момента помещения капли и в процессе её испарения (ΔT). Установлено, что вид кривых (рисунок 5), характеризующих снижение температуры приповерхностного слоя за счет испарения капли теплоносителя, зависит от свойств смачивания и конфигурации расположения участков с различной смачиваемостью.





Рисунок 5 – Изменение температуры приповерхностного слоя (на толщине 160 мкм) под испаряющейся каплей воды объемом 5 мкл на поверхностях: a) Polished и SHPhi; б) SHPho; в) BiPhi1 и BiPhi2, формирование «сухого пятна» на поверхности BiPhi1; г) BiPhi3 и BiPhi4

Установлено, что на поверхности SHPhi достигается наибольшее охлаждение $\Delta T = 5 \,^{\circ}\text{C}$ (таблица 1) приповерхностного слоя, нагретого до 100°С. Последнее обусловлено супергидрофильными свойствами и приростом площади поверхности за счет развитой текстуры в 5,5 раз (Sdr =559 мкм) относительно аналогичной характеристики на полированной поверхности. На супергидрофобной поверхности с аналогичной текстурой, как и на поверхности SHPhi, зарегистрировано наименьшее охлаждение $\Delta T = 0.5$ °C. Такое различие в характеристиках охлаждения приповерхностного слоя обусловлено не только различием площади межфазного контакта «поверхность-жидкость» (в случае SHPhi она существенно больше) через которую происходит подвод теплоты, но и обусловлено состоянием жидкости на поверхности. В случае SHPho капля на поверхности находится в состоянии Касси-Бакстера, на поверхности SHPhi в состоянии Венциля. Микро- и нанополости текстуры SHPho под каплей заполнены воздухом, который характеризуется высоким термическим сопротивлением. В таких условиях площадь межфазного контакта «поверхность-жидкость» через которую реализуется процесс подвода теплоты к капле ограниченна вершинами выступов, образующих шероховатость поверхности. Последнее является причиной незначительного ($\Delta T = 0.5$ °C) охлаждения приповерхностного слоя SHPho.

Средние значения ΔT , зарегистрированные в экспериментах, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Охлаждение приповерхностного слоя (на толщине 160 мкм) при испарении капли воды объемом 5 мкл

Охлаждение приповерхностного слоя	Поверхность	ΔT, °C
Высокое	SHPhi (II группа)	$5,0 \pm 0,5$

12

Продолжение таблицы 1

Умеренное	BiPhi4 (IV группа)	$\Delta T_{\rm av}$: 1,5 ± 0,3 / $\Delta T_{\rm max}$: 1,8 – 1,9
	BiPhi3 (IV группа)	$\Delta T_{\rm av}$: 1,2 ± 0,2 / $\Delta T_{\rm max}$: 1,6 – 1,7
	Polished (I группа)	$\Delta T_{\rm av}$: 1,2 ± 0,2 / $\Delta T_{\rm max}$: 1,6 ± 0,3
	BiPhi2 (V группа)	$\Delta T_{\rm av}$: 1,1 ± 0,2 / $\Delta T_{\rm max}$: 1,3
	BiPhi1 (V группа)	$\Delta T_{\rm av}$: 0,8 ± 0,2 / $\Delta T_{\rm max}$: 1,1
Низкое	SHPho (III группа)	$0,5 \pm 0,1$

Из рисунков 5в и 5г видно, что вид кривых, характеризующих снижение температуры приповерхностного слоя, для бифильных поверхностей однотипен, но отличается от поверхностей Polished и SHPhi (рисунок 5a), а также SHPho (рисунок 5б). В момент дозирования капли воды на бифильные поверхности температура приповерхностного слоя уменьшается на $\Delta T_{\rm max}$, с течением времени перепад температуры уменьшается до $\Delta T_{\rm av}$. Такое изменение температуры приповерхностного слоя обусловлено тем, что при дозировании капли воды на бифильную поверхность, в области супергидрофильной части превосходящую теплоноситель занимает область, по размерам супергидрофильные кольца через систему взаимосвязанных микро- и наноразмерных полостей за счет капиллярных сил. С течением времени происходит, нагрев теплоносителя, содержащегося в микро- и наноразмерных полостях. Часть его испаряется, часть теплоносителя в полостях находится в состоянии насыщения. Рост температуры приповерхностного слоя (перепад температуры уменьшается до ΔT_{av}) обусловлен тем, что микро- и наноразмерные полости не подпитываются теплоносителем из менее прогретых верхних слоев капли, наступает квазиравновесное состояние. Последнее длится до разрушения формы капли на завершающей стадии процесса испарения, сопровождающейся трансформацией линии трехфазного контакта из окружности в кривую Безье. Последнее увеличивает длину линии трехфазного контакта. Так же, как и на поверхности Polished, является причиной уменьшения температуры приповерхностного слоя на $\Delta T_{\rm max}$ на завершающей стадии процесса испарения капли теплоносителя. Исключением является поверхность BiPhi1, поскольку на завершающей стадии испарения капли в результате разрушения парового пузыря на супергидрофобной пятно» (рисунок 5в), формируется «сухое области вследствие чего приповерхностный слой нагревается.

При помещении капли объемом 5 мкл на нагретую поверхность (100° С) на начальном этапе происходит прогрев жидкости, после чего начинается зарождение и рост пузырей на поверхности материала (гетерогенное кипение). Установлено, что на супергидрофобных областях формируются относительно большие пузырьки характерным размером до 0,57 мм. На супергидрофильных участках, формируются очень мелкие пузыри, точный размер которых не позволяла зарегистрировать используемая система регистрации. Независимо от режима испарения капли, число зарождений новых пузырьков уменьшается на завершающей стадии процесса испарения. Свойства смачиваемости, в том числе экстремальные (супергидрофильные / супергидрофобные), а также

развитая, многомодальная шероховатость не повлияли на рост числа пузырей на завершающей стадии процесса испарения капли. Сделан вывод о том, что прирост площади поверхности за счет шероховатости и длина линии трехфазного контакта являются более значимыми факторами, чем число и размер паровых пузырей, влияющими на характеристики охлаждения нагретого приповерхностного слоя и характеристики испарения капли теплоносителя на завещающей стадии.

На рисунке 6 приведены типичные регулярные поля скоростей конвективных потоков в капле воды, испаряющейся на бифильной поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачивания.



Рисунок 6 – Типичные поля скоростей в испаряющийся капле, полученные методом micro-PIV, на бифильной поверхности с комбинацией экстремальных свойств смачивания (BiPhi2)

По результатам анализа скоростей конвективных потоков установлено, что дизайн бифильных поверхностей, расположение участков с различной смачиваемостью по отношению к другу, их геометрическая друг конфигурация существенно влияют на формирование конвективных потоков в испаряющейся капле. С целью увеличения скоростей конвективных потоков в испаряющейся капле предпочтительнее на практике использовать комбинацией бифильные поверхности с экстремальных свойств смачиваемости.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований и натурных испытаний по оценке стойкости теплопередающих поверхностей нагрева, модифицированных лазерным излучением, к осаждению продуктов горения твердого топлива и шлакованию.

В экспериментальных исследованиях использовалось пять поверхностей жаропрочной жаростойкой стали 20Х23Н18. Поверхности, обработанные абразивными материалами, применялись в качестве референтных. Путем модификации лазерным излучением сформировано четыре вида текстур

(рисунок 7) с заданными геометрическими параметрами: «Микроканалы № 1», «Микроканалы № 2», «Микростолбики» и «Анизотропная».



Рисунок 7 – СЭМ-изображения поверхностей стали, модифицированных лазерным излучением: a) «Микроканалы № 1»; б) «Микроканалы № 2», в) «Микростолбики», г) «Анизотропная»

В экспериментах использовалась смесь, имитирующая компонентный состав золы, образующейся при сжигании твердого органического топлива. Зольная смесь состоит из четырех компонентов: оксид кальция (37,0 % по масс.), оксид железа (23,7 % по масс.), диоксид кремния (20,4 % по масс.) и оксид алюминия (18,9 % по масс.). Перед нанесением на поверхность зольная смесь смешивалась с турбинным маслом соотношением 60:40 % по массе. На рисунке 8 приведена экспериментальная установка для исследования характеристик шлакования поверхностей металлов. Модельный состав золы в



Рисунок 8 – Экспериментальная установка для исследования характеристик шлакования поверхностей металлов: 1 – поверхность; 2 – индукционный нагреватель; 3 – спираль индуктора; 4 – блок-регулятор; 5 – тепловизор; 6 – чиллер; 7 – зольная смесь в форме сферы; 8 – высокоскоростная видеокамера; 9 – светодиодный прожектор

форме сферы (диаметром 2,5 мм и массой 0,02±0,001 г) размещался на поверхности стали при комнатной температуре. Нагрев поверхности осуществлялся индукционным

нагревателем. В таких условиях поверхность стали являлась источником нагрева образца золы, расположенного на ней. Нагрев осуществлялся до полного перехода золы в жидкое агрегатное состояние

(шлак). Измерение температуры в рабочей области осуществлялось бесконтактно с помощью инфракрасной камеры. Видеосъемка процесса формирования шлака из золы осуществлялась с помощью высокоскоростной видеокамеры.

Отличия экспериментальных условий от реальных условий формирования шлака в энергогенерирующем оборудовании (избыток воздуха, температура окружающей среды, размер и концентрация частиц, формирующих золошклаковый слой) подобны известным исследованиям и обусловлены техническими ограничениями экспериментального оборудования.

Анализ текстуры проводился методом сканирующей электронной микроскопии (рисунок 7). Весовой состав химических элементов определен методом рентгеноспектрального микроанализа (таблица 2).

Таблица 2 – Весовой состав химических элементов на локальных областях поверхностей стали

Конфигурация текстур	С	0
Референтная поверхность	0,5	0,2
Микроканалы № 1	2,5-4,2	3,3-5,1
Микроканалы № 2	0,6-6,0	3,8-8,5
Микростолбики	0,8-4,4	0,8-5,5
Анизотропная	1,3	12,8

Из таблицы 2 видно, что модификация поверхностей стали лазерным излучением, приводит к росту содержания кислорода И углерода. Увеличение кислорода обусловлено процессами химического реагирования,

реализующимися при высокоэнергетическом тепловом воздействии в воздушной среде. Поверхность с текстурой «Микроканалы № 2» характеризуются более высоким содержанием С и О по сравнению с текстурами «Микроканалы № 1» и «Микростолбики». Из исследуемых текстур «Анизотропная» характеризуется наиболее высоким содержанием О.

По результатам экспериментов выделены процессы, протекающие при нагреве зольной смеси, установлены критерии их идентификации, характерные времена и температуры их реализации. На рисунке 9 приведены диаграммы, иллюстрирующие динамику трансформаций золы в соответствии



с зарегистрированными процессами. Из рисунка 9 видно, что в экспериментах по шлакованию с референтной поверхностью задержки и

длительности выделенных процессов меньше, чем в аналогичных

экспериментах с модифицированными лазерным излучением

Рисунок 9 – Времена реализации процессов, протекающих Л. при нагреве зольной смеси на поверхностях стали

Зарегистрированные бо́льшие физико-химических времена инициации процессов И их бо́льшие продолжительности на поверхностях, модифицированных лазерным излучением, можно объяснить тем, что в условиях высокотемпературного нагрева золы, расположенной на сильно шероховатой поверхности (модифицированной лазерным излучением). площадь контакта с поверхностью меньше, чем площадь контакта в случае нахождения золы на поверхности, обработанной абразивными материалами.

ым излучением поверхностями.

При идентичных условиях нагрева из сформированных лазерным излучением текстур наибольшее время задержки до формирования расплава шлака зарегистрировано на текстуре «Анизотропная». Последняя характеризуется более высокими значениями термического сопротивления приповерхностного модифицированного слоя в сравнении с другими использованными в экспериментах поверхностями.

На рисунке 10 приведены значения температур поверхностей стали (источника нагрева), соответствующие выделенным процессам

трансформации зольной смеси. По результатам анализа рисунка 9 и рисунка 10 сделан вывод о том, что лазерный способ обработки поверхностей стали с характеристиками,

достаточными ЛЛЯ формирования на поверхности текстуры «Анизотропная», является перспективным подходом снижения интенсивности шлакования поверхностей нагрева котла, на которых формируется золошлаковый слой. Суть подхода заключается в формировании лазерным излучением поверхностях текстуры на способствующей стали, снижению передачи теплоты кондуктивным способом к



Рисунок 10 – Значения температур поверхностей стали, соответствующие характерным процессам (номера по оси абсцисс) трансформации зольной смеси: T_1 – кипение масла (начало затвердевания зольной смеси); T_2 – начало формирования парогазовой смеси; T_3 – завершение затвердевания зольной смеси; T_4 – завершение формирования парогазовой смеси; T_5 – зажигание паров масла; T_7 – начало формирования парогазовой смеси; T_5 – закершение состава); T_8 – завершение выгорания паров масла; T_7 – начало формирования шлака (плавление зольного состава); T_8 – завершение формирования шлака

золошлаковому слою, и тем самым способствующей формированию условий смещения температур нагрева поверхностей стали (источников нагрева золошлакового слоя) в область больших температур (выше на 60–75 °C), при которых протекают процессы формирования расплава шлака.

По результатам анализа СЭМ-изображений остатка, закристаллизовавшегося минерального шлакообразующего вещества на поверхностях стали, условно выделены фронты растекания расплава шлака. Проведена оценка изменения химического состава в условно выделенных фронтах растекания шлака по сумме элементов Mn, Ni, Cr, входящих в состав стали, и по сумме элементов Al, Si, Ca, входящих в состав зольной смеси. Также в данной оценке использовались зарегистрированные данные о характерном размере участка поверхности, покрытой шлаком в каждом выделенном фронте растекания. Результаты сведены в таблицу 3.

	· ·	Сумма весового состава		Характерный	
Конфигурация текстур	Фронт растекания	Al+Si+Ca, входящих в состав золы, %	Mn+Ni+Cr, входящих в состав стали, %	размер участка поверхности, покрытой шлаком, мм	
Dath an arrow of	Ι	39,6	0,5	3,2	
поверхности	II	0,5	36,3	3,8	
поверхность	III	17,1	16,7	5,0	
Микроканалы	Ι	34,8-39,4	0,9-6,1	4,2	
Nº 1	II	24,3 - 27,1	5,6-7,2	6,6	
Микроканалы	Ι	1,0-41,7	1,8 - 32,5	4,0	
Nº 2	II	2,3-7,3	32,3 - 37,7	6,1	
Микроотолбики	Ι	39,0-39,5	0,1-0,2	4,3	
микростолоики	II	21,0-28,71	7,4 – 17,3	5,1	
Анизотропная	Ι	8,1	26,2	3,6-4,7	

Таблица 3 – Химический состав в условно выделенных фронтах растекания шлака и характерные размеры участков поверхности, покрытой шлаком

Установлено, что текстура «Анизотропная» демонстрирует наилучшие результаты по сопротивлению к формированию шлаковых отложений и соответственно снижению их негативного воздействия на полурадиационные и конвективные поверхности котельного оборудования, изготовленные из стали. Текстура «Анизотропная» характеризуется наименьшим характерным размером участка поверхности, покрытой шлаком. Суммарный весовой состав элементов Al+Si+Ca, входящих в состав золы, много ниже средних значений, а весовой состав элементов Mn+Ni+Cr, входящих в состав стали, выше средних значений аналогичных характеристик по фронтам растекания других текстур. Последнее свидетельствует о том, что толщина сформированного слоя шлака на поверхности с текстурой «Анизотропная» наименьшая из рассматриваемых текстур в экспериментах.

Из текстур в виде микроканалов наилучший результат демонстрирует текстура «Микроканалы № 2». Последнее обусловлено более глубокими сравнении с текстурами микроканалами «Микроканалы № 1» в И «Микростолбики». Несмотря на то, что в первом фронте растекания шлака по текстуре «Микроканалы № 2» в микроканалах суммарное значение весового состава Al+Si+Ca достигает 41,7 %. Все же на данной текстуре содержание весового состава Mn+Ni+Cr выше, чем даже на полированной поверхности. Следовательно, и толщина слоя шлака на поверхности с текстурой поверхностях, «Микроканалы № 2» меньше, обработанных чем на абразивными материалами и модифицированных лазерным излучением «Микроканалы № 1» и «Микростолбики».

испытания модифицированных Натурные лазерным излучением поверхностей жаропрочной жаростойкой стали 20х23н18, с текстурами «Анизотропная» и «Микроканалы № 2» проведены на действующей На котельной котельной в зимний период. установлено четыре автоматизированных твердотопливных котла Metex, номинальной мощностью 400 кВт каждый. Исследуемые поверхности размещались внутри топки котла,

на период не менее 60 суток. В качестве топлива на котельной используется бурый уголь марки ЗБ Балахтинского месторождения (Красноярский край). Проведена оценка склонности угля к загрязнению поверхностей нагрева в топке котла, основанная на данных об элементном составе золы. Установлено, что при сжигании угля формируются прочные железистые и сульфатнокальциевые отложения на поверхностях нагрева, что оказывает негативное влияние на процессы теплообмена и, соответственно, эффективность работы котла. По СЭМ-изображениям (рисунок 11) поверхностей, полученных после проведения натурных испытаний и очистки потоком воздуха давлением 10 атм. видно, что референтная поверхность стали, покрыта слоем продуктов горения топлив, присутствует незначительное число локальных областей размером до десятка микрометров, имеющих металлический цвет, т.е. очищенных потоком воздуха. На этой же поверхности сформировались крупные, размером до сотен микрометров частицы продуктов горения угля преимущественно в сферической форме. Явно, что число таких частиц на площади поверхности поверхностях единицу на с текстурой «Микроканалы № 2» существенно меньше. На нижней поверхности микроканалов зарегистрировано больше участков, на которых отсутствуют продукты горения топлив. Последнее свидетельствует о том, что поверхность с текстурой «Микроканалы № 2» лучше очищена потоком воздуха по сравнению с референтной поверхностью. Поверхности с текстурой «Анизотропная» также имеют больше участков, очищенных от продуктов горения топлива по сравнению с референтной поверхностью стали. Но эти участки в основном являются выступами на текстуре. В углублениях находятся продукты горения угля.



Рисунок 11 – Типичные СЭМ-изображения поверхностей стали после испытаний и очистки потоком воздуха давлением 10 атм.: а) Референтная поверхность; б) «Микроканалы № 2»; в) «Анизотропная»

Определена масса рыхлых отложений (золы), масса отложений с прочным адгезионным контактом и общая масса отложений на поверхностях (таблица 4).

На референтной поверхности масса отложений с прочным адгезионным контактом, оставшихся после очистки воздухом, а также общая масса отложений, включая золу, больше значений аналогичных характеристик на поверхностях с текстурами «Микроканалы» и «Анизотропная». Текстура

«Анизотропная» продемонстрировала худший результат по сопротивлению к загрязнению рыхлыми отложениями (золой).

Проведенные испытания показали, что текстура «Анизотропная» хоть и характеризуется повышенной стойкостью к осаждению загрязнений с прочным адгезионным контактом к поверхности, но за счет, развитой многомодальной шероховатости данный вид текстуры склонен к большему

Kaudaummanung manamm	Масса отложений*, г			
конфигурация текстур	M_{ash}	Madhes	M_{total}	
Референтная поверхность	0,0581	0,2121	0,2702	
Микроканалы № 2	0,0230	0,1181	0,1411	
Анизотропная	0,1009	0,1428	0,2437	
$*M_{ack}$ – масса рыхлых отложений (золы):				

Таблица 4 – Масса пролуктов горения топлива

скоплению рыхлых отложений (золы). Последние невозможно очистить потоком воздуха с давлением 10 атм. Повышенную стойкость к осаждению рыхлых отложений

 M_{adhes} — масса отложений с прочным адгезионным контактом; M_{total} — общая масса отложений

(золы) и загрязнений с прочным адгезионным контактом продемонстрировала поверхность с текстурой «Микроканалы № 2». Этот вид текстуры характеризуется большей шероховатостью по сравнению с шероховатостью поверхностей, обработанных абразивными материалами. Следовательно, можно сделать вывод, что повышенная стойкость к осаждению продуктов сгорания поверхности с текстурой «Микроканалы № 2» обусловлена не только текстурой, но и элементным составом, изменённым при модификации поверхности интенсивными потоками энергии. Наибольший вклад в снижение прочности адгезионного контакта железистых и сульфатно-кальциевых отложений к поверхностям, модифицированных лазерным излучением, вносят оксиды металлов, формирующиеся в приповерхностном слое при лазерной обработке в воздушной среде. Повышенным сопротивлением к формированию шлака и отложениям продуктов горения топлива из исследуемых поверхностей характеризуются поверхности текстурой стали с «Микроканалы № 2».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан новый подход к интенсификации испарения капель в системах охлаждения капельным орошением, основанный на модификации интенсивными потоками энергии (лазерным излучением) геометрических параметров и приповерхностных свойств теплопередающих поверхностей, а также к интенсификации теплообмена в энергогенерирующем оборудовании за счет снижения прочности адгезионного контакта продуктов горения твердого топлива с теплопередающими поверхностями.

2. Выбор дизайна (конфигурации и расположения) поверхности, участки которой характеризуются различными свойствами смачивания, оказывает влияние не только на интенсивность испарения теплоносителя, но в случае комбинации экстремальных свойств смачивания на бифильных поверхностях, является доминирующим фактором формирования сухих пятен за счет разрушения паровых пузырей на супергидрофобной части поверхности.

бифильных поверхностях с комбинацией гидрофильных 3. Ha И супергидрофильных свойств режимы испарения капель теплоносителя их последовательность подобны аналогичным характеристикам на полированных поверхностях Комбинация гилрофильных металлов. гилрофильных И супергидрофильных свойств на бифильных поверхностях в сравнении с полированными поверхностями металлов значительно влияет на длительность режимов испарения. На бифильных поверхностях длительность «пиннинга» на 30-40 % меньше, чем на полированных, и, соответственно, продолжительность смешанного режима испарения больше.

4. Управлять режимами испарения капель, с высокой точностью контролировать контактный диаметр капли в режиме испарения «пиннинга» можно путем формирования с заданными размерами концентрических супергидрофильных колец на супергидрофобной теплопередающей поверхности.

5. Уменышить интенсивность шлакования конвективных и полурадиационных стальных поверхностей и, следовательно, интенсифицировать теплообмен в энергогенерирующем оборудовании можно путем формирования лазерным излучением развитой многоуровневой текстуры «Анизотропная» или «Микроканалы» (с шириной микроканалов 90 мкм, расстоянием между осями микроканалов 180 мкм). В результате формирования таких текстур создаются условия смещения температур формирования шлака в область более высоких значений (выше до 75 °C по сравнению с поверхностью стали обработанной абразивными материалами).

6. Повысить надежность энергогенерирующего оборудования можно путем уменьшения толщины формирующегося шлака на поверхностях нагрева. Установлено, что текстура «Анизотропная» способствует уменьшению размера фронта растекания шлака, а также позволяет более эффективно проводить процедуру очистки (удаление сжатым воздухом разрушенного приповерхностного слоя со шлаком). Также установлено, что от вида и характеристик текстуры поверхностей стали 20Х23H18, нагретой до температур 1300–1400 °C зависят характеристики фронтов растекания шлака. На поверхностях, обработанных абразивными материалами, условно можно выделить три фронта растекания. На поверхности с текстурой в виде микроканалов, условно можно выделить два фронта растекания. На «Анизотропной» текстуре зарегистрирован один фронт растекания.

7. По результатам натурных испытаний установлено, что поверхности с текстурой «Анизотропная» продемонстрировали худший результат по сопротивлению к загрязнениям рыхлыми отложениями (золой), наилучший результат продемонстрировали поверхности с текстурой «Микроканалы № 2». Но после очистки поверхностей воздухом давлением 10 атм. в течение 2 минут, наихудший результат по прочности адгезионного контакта железистых и сульфатно-кальциевых отложений продемонстрировала поверхность с тали, обработанная абразивными материалами. Пониженной прочностью адгезионного контакта железистых и сульфатно-кальциевых отложений с поверхностью,

характеризуется сталь с текстурой «Микроканалы № 2». Последнее также доказано результатами исследований методами сканирующей микроскопии И рентгенофлуоресцентного анализа. Результаты спектрального последнего свидетельствуют, что наибольший вклад в снижение прочности адгезионного контакта продуктов горения углеводородных топлив с поверхностью вносят оксиды металлов, формирующиеся на поверхностях стали при лазерной модификации в воздушной среде.

Основные научные результаты по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science

- Vershinina, K.Yu. Laser modification of heating surfaces: A new approach to reduce boiler slagging / K.Yu. Vershinina, E.G. Orlova, A. Abedtazehabadi, E.Yu. Laga, M.A. Rudmin, D.V. Feoktistov // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 182. – P. 481–496. Q1, IF = 6.9
- Feoktistov, D.V. Biphilic heat exchange surfaces for drip irrigation cooling systems / D.V. Feoktistov, A. Abedtazehabadi, A.V. Dorozhkin, E.Yu. Laga, A.O. Pleshko, E.G. Orlova // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 224. Article number 125316. Q1, IF = 5.0
- Feoktistov, D.V. A new approach to reducing slagging based on laser modification of heating surfaces: Field tests and mathematical modeling / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, K.K. Paushkina, E.G. Orlova, E.Yu. Laga, A.V. Zhuikov, K.Yu. Vershinina // Fuel. – 2025. – Vol. 382. – Article number 133778. Q1, IF = 6.7

Научные результаты по теме диссертации, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science

- Laga E.Yu. Study of wetting of aluminum surface textured by nanosecond laser processing / E.Yu. Laga // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2337. – Article number 020009.
- Laga E.Yu. Dynamic contact angles and contact angle hysteresis on lasertextured aluminum alloy surfaces / E.Yu. Laga, S.S. Borovikov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2337. – Article number 020010.
- Laga E.Yu. Changes in the texture and wettability of brass surfaces after single and multiple pass of a nanosecond laser pulse / E.Yu. Laga // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2422. – Article number 040014.
- Laga E.Yu. Experimental determination of the three-phase contact line speed over textured brass surface / E.Yu. Laga, S.S. Borovikov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2422. – Article number 040015.

- Laga E.Yu. Influence of conditions of liquid dosing on water droplet spreading / E.Yu. Laga // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2211. – Article number 012008.
- Laga E.Yu. Modification of steel surfaces with aluminum oxide particles: Study of wetting and spreading / E.Yu. Laga, S.S. Borovikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2211. – Article number 012011.