



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

Войткова Ксения Артуровна

**ИСПАРЕНИЕ КАПЛИ ВОДЫ С ШЕРОХОВАТЫХ НАГРЕТЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ СПЛАВОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

Томск – 2022

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

Научный руководитель: **Кузнецов Гений Владимирович**
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор НОЦ И.Н.
Бутакова ИШЭ НИ ТПУ

Официальные оппоненты: **Бубенчиков Алексей Михайлович**
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры
теоретической механики механико-
математического факультета ФГАОУ ВО
НИ «Томский государственный
университет», г. Томск.

Чиннов Евгений Анатольевич
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Лаборатории интенсификации
теплообмена Института Теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г.
Новосибирск.

Защита состоится «11» октября 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 43, уч. корпус 3, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан « » 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических
наук



Гвоздяков
Дмитрий
Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие электроники связано с постоянно увеличивающимися требованиями повышения удельной мощности электронных устройств, расширения температурного диапазона их работы и уменьшения габаритов. Увеличение энергонасыщенности электронного оборудования инициирует интенсивные локальные тепловыделения (плотность теплового потока может достигать 1000 Вт/см^2 и выше) и возникновение термических напряжений, как правило, с нестационарным пространственным распределением. Применение традиционных технологий охлаждения для конкретных изделий или их элементов в системах обеспечения тепловых режимов современного энергонасыщенного оборудования (например, воздушное охлаждение) во многих случаях не может обеспечить достаточно эффективный отвод тепла. Плотность отводимого с помощью воздушного охлаждения теплового потока составляет не более 35 Вт/см^2 . Возникает объективная необходимость высокой интенсивности отвода тепла от локально теплонагруженных участков оборудования, температура которых в определенных условиях работы может подниматься выше предельно допустимых.

Достижение регламентного температурного режима энергонасыщенного оборудования возможно с использованием двухфазных иммерсионных (погружных) систем жидкостного охлаждения. В таких системах вычислительное оборудование работает в резервуарах с охлаждающей жидкостью. Погружная система жидкостного охлаждения используется для отвода тепла от теплонагруженных участков «майнинг ферм» и центров обработки данных. Активно развиваются технологии непрямого жидкостного охлаждения: тепловые трубки, микро- и миниканалы, испарительные камеры. Перспективной технологией охлаждения является и подача охлаждающей жидкости на теплонагруженный участок энергонасыщенного оборудования (прямое жидкостное охлаждение). В эту группу входят технологии охлаждения, в которых жидкость подается на разогретую поверхность в виде капель или струй. Например, при использовании спреевого охлаждения плотность отводимого теплового потока может достигать 1200 Вт/см^2 . В основе указанных выше технологий охлаждения лежит принцип наиболее эффективного применения теплового эффекта фазового перехода (типа «Вода-Пар»).

Степень разработанности темы исследования. Перед вводом в эксплуатацию теплообменного оборудования поверхности его деталей обрабатывают определенными в нормативных документах способами для улучшения их эксплуатационных характеристик. После обработки поверхностей деталей элементов конструкций различными способами

характеристики процессов смачивания, растекания и испарения капель жидкостей с таких поверхностей могут существенно изменяться. Исследования процессов, происходящих на поверхностях отдельных элементов энергонасыщенного оборудования, с каждым годом становятся все более и более актуальными, в связи с расширением номенклатуры изделий, в которых могут использоваться системы капельного охлаждения. Значительным вкладом в развитие теории смачивания, растекания и испарения капель жидкостей с обработанных различными способами поверхностей подложек являются результаты исследований О. А. Кабова, Е. Я. Гагатовой, С. Я. Мисюры, Л. Ю. Бараша, Д.В. Феоктистова, Е.Г. Орловой, А.Г. Исламовой и др. В зарубежных научных лабораториях исследования описанного выше процесса проводятся под руководством Д. Брутина (Франция), Д. Бонна (Нидерланды), Ф. Дуанна (Сингапур), Б. Собака (Бельгия), С. Семенова (Великобритания), В. Старова (Великобритания) и др. Но для разработки теории, позволяющей проводить прогностическую оценку интенсивности процесса охлаждения локально теплонагруженных участков оборудования каплями жидкостей, необходимо получить экспериментальные данные, иллюстрирующие возможность эффективного использования одиночных капель жидкости для охлаждения локальных участков поверхностей деталей или элементов конструкции энергонасыщенного оборудования.

Целью работы является установление в результате экспериментального исследования и математического моделирования возможности управления процессом охлаждения локальных участков нагретых поверхностей элементов конструкции энергонасыщенного оборудования специальной обработкой этих участков и последующем осаждением на эти участки капель испаряющихся при нагреве жидкостей.

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

1. Установление режимов испарения капель воды с шероховатых нагретых поверхностей подложек.
2. Разработка автономной замкнутой математической модели процесса теплопереноса в испаряющейся с нагретой поверхности подложки капле жидкости.
3. Определение по результатам экспериментального исследования и математического моделирования скоростей испарения и температур капель воды при их испарении с нагретой поверхности подложки.
4. Установление влияния наночастиц в капле воды на характеристики ее испарения с поверхностей подложек.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части пункта 1 – «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования

молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах».

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы теневой оптический метод применялся для определения характеристик процесса испарения капель воды с обработанных различными способами поверхностей подложек из алюминиево-магниевого сплава. Геометрические характеристики лежащей на поверхности подложки капли воды (контактный угол, контактный диаметр, объем) определялись методами гониометрии по полученным теневым изображениям. Характеристики шероховатости поверхностей подложек определены с помощью контактного профилометра. Микроструктура и химический состав приповерхностных слоев подложек исследованы методами электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. Численное исследование процесса испарения капли жидкости с поверхности подложки выполнено при решении задач теплопроводности и диффузии с использованием программного комплекса MATLAB. Системы нелинейных уравнений математической физики с нелинейными граничными условиями решались с использованием метода конечных разностей.

Научная новизна работы. Обоснована возможность управления процессом испарения капель воды в результате изменения шероховатости поверхности алюминиево-магниевого сплава. Установлены режимы испарения капель воды с шероховатых нагретых поверхностей подложек. Сформулирована автономная замкнутая математическая модель, в которой локальные скорости испарения капли жидкости с поверхности твердого тела рассчитывались в явном виде с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена. Вычислены скорости испарения и определены распределения температур в испаряющейся с поверхности подложки капли воды. Показана возможность использования наночастиц полистирола в капле воды для создания условия ее нерастекания на гладких поверхностях подложек.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в обосновании возможности управления процессом охлаждения участков поверхности каплями жидкости в результате изменения шероховатости поверхности алюминиево-магниевого сплава различными способами. Практическая значимость работы заключается в возможности использования сформулированной в настоящей работе математической модели, а также установленных экспериментально характеристик процесса испарения капель воды с шероховатых поверхностей подложек, для разработки рекомендаций к

нормативным методам расчета систем капельного охлаждения энергонасыщенного оборудования.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных средств измерений, методов анализа и обработки опытных данных. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных проводилась по результатам расчетов погрешностей измерений регистрируемых физических величин. С целью обоснования достоверности результатов математического моделирования проведен сравнительный анализ с полученными в настоящей работе результатами экспериментов. Также проводилось сравнение полученных результатов с теоретическими следствиями и экспериментальными данными авторов, полученных ими для других материалов, жидкостей и температур нагрева.

Связь работы с научными программами и грантами.

Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов РФФИ Аспиранты № 20-38-90027 «Процессы смачивания и испарения капель жидкостей с полированных и обработанных лазерными импульсами поверхностей алюминиевого сплава» и РФФИ мол_нр № 19-38-50098 «Испарение капель в условиях постоянных и циклически меняющихся давлений и температур в изолированной камере».

Положения, выносимые на защиту:

1. При обработке поверхности подложки из алюминиевого сплава шлифовальной машиной, шлифовально-полировальными дисками и лазерным излучением выполняется условие нерастекания капли воды – более 90% времени своего существования капли воды испаряются в режиме постоянного контактного диаметра (пиннинга контактной линии).

2. После добавления полистирольных частиц с характерными размерами 50 нм, 100 нм или 1000 нм в дистиллированную воду условие нерастекания капли воды с частицами объемной концентрацией 0,025% выполняется как на шероховатых, так и на относительно гладких поверхностях подложек из алюминиевого сплава.

3. Математическая модель теплопереноса в испаряющейся с поверхности твердого тела капле, в которой локальные скорости испарения рассчитывались в явном виде с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена.

4. Температуры испаряющейся капли жидкости в течение достаточно длительного времени (более 90 % времени существования капли) могут быть существенно ниже (на 10-15 %) температуры нагретой поверхности подложки.

5. Перепад температур по угловой координате испаряющейся с нагретой от 313 К до 343 К поверхности подложки капли воды может достигать 35 К. Последнее приводит к существенному снижению (более

чем в 10 раз) локальных скоростей испарения капли охлаждающей жидкости при увеличении угловой координаты от $\varphi = 0^\circ$ (контактная линия) до $\varphi = 90^\circ$ (точка, соответствующая максимальной толщине капли).

Личный вклад автора состоит в совместной с руководителем постановке цели и задач; выборе методик экспериментальных исследований характеристик процесса испарения капель жидкостей с шероховатых поверхностей подложек; постановке и планировании экспериментов; проведении экспериментов; обработке полученных результатов; оценке систематических и случайных погрешностей; анализе и обобщении результатов исследований; получении зависимостей скоростей испарения капель воды от температуры поверхности подложки; установлении режимов испарения капель воды на специально обработанных шероховатых поверхностях подложек; формулировке математической модели процесса теплопереноса в капле; разработке метода решения; установлении температур испаряющейся с поверхности подложки капли; формулировке основных защищаемых положений и выводов; написании и отправке статей в журналы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2020 г.), Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2022 г.), Седьмая российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2018 г.), 14th International Forum on Strategic Technology (Томск, 2019 г.), Международная молодежная научная конференция «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2019 и 2020 гг.), III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020 г.), Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения – 2022. Энергетика и цифровая трансформация» (Казань, 2022 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации изложены в 6 работах, из них 3 статьи в высокорейтинговых изданиях, индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus» («Journal of Materials Science», «Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects», «Surface and Coatings Technology»), 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных результатов кандидатских и докторских диссертаций («Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ,

энергетика», «Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева»).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 120 страницах, содержит 35 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 145 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы; проведен анализ степени разработанности темы исследования; сформулированы цель, задачи; отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; описаны методы исследования; приведены положения, выносимые на защиту; обоснована достоверность результатов экспериментальных и теоретических исследований; приведены сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен анализ современного состояния и перспектив развития экспериментальных и теоретических исследований в области интенсификации процесса испарения капель жидкостей с поверхностей твердых тел с различной шероховатостью. На основании обобщения результатов выполненных ранее теоретических исследований сделан вывод о том, что основными недостатками известных математических моделей процесса испарения капель жидкостей является использование эмпирических выражений с несколькими постоянными, определяемыми по результатам специальных экспериментальных исследований, для расчета локальных скоростей испарения. Сделан вывод о том, что до настоящего времени не установлены функциональные связи между способами обработки поверхностей металлов и сплавов и условиями эффективного испарения капель жидкостей.

Вторая глава посвящена описанию методики проведения экспериментальных исследований. Эксперименты по исследованию процессов смачивания и испарения капель воды проведены на установке «DSA100E» (Kruss, Германия), схема которой представлена на рисунке 1.

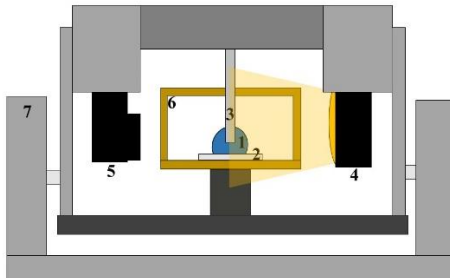


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки «DSA100E»: 1 – капля жидкости; 2 – подложка из АМг6; 3 – игла дозирующего устройства; 4 – источник света; 5 – видеокамера; 6 – экспериментальная камера «ТС40»; 7 – механизм для выравнивания установки относительно горизонтальной оси

Для анализа формы капли применена теневая методика. Капли воды объемами 5 мкл выдавливались на поверхности подложек через иглу диаметром 0,52 мм. Геометрические характеристики (контактные углы, контактные диаметры и объемы) испаряющихся с поверхностей подложек капель определялись по их теневым изображениям, полученным с помощью источника света и видеокамеры. Последние обрабатывались в программном комплексе «Advance» (Kruss, Германия). Эксперименты с каплями воды проводились в камере «ТС40» (Kruss, Германия). Температуры подложек, с поверхностей которых происходило испарение, и воздуха в камере регулировались элементами Пельтье в диапазоне от 293 К до 343 К, что соответствует температурам внутренних поверхностей типичных тепловыделяющих устройств во время их работы.

Экспериментальные исследования процесса испарения капель жидкостей проведены на подложках из алюминивно-магниевого сплава АМг6. Последний является конструкционным материалом и применяется во многих отраслях промышленности (авиационной, аэрокосмической, энергетической). Для анализа влияния шероховатости поверхностей сплавов на условия эффективного охлаждения последних в результате испарения капель жидкостей подложки полировались в барабане галтовочного станка и шлифовались шлифовально-полировальным инструментом. Кроме того, поверхности подложек обрабатывались лазерным излучением для создания на поверхностях подложек текстуры в виде лунок или каверн. При проведении экспериментов по исследованию процесса испарения капель жидкости с поверхностей подложек использовалась деионизированная вода. С целью анализа влияния твердых включений на условия испарения капель использованы монодисперсные частицы полистирола с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса испарения капель воды с шероховатых нагретых поверхностей алюминивно-магниевого сплава (режимы и скорости испарения). Установлено, что при обработке поверхности подложки из алюминиевого сплава шлифовальной машиной, шлифовально-полировальными дисками и лазерным излучением выполняется условие нерастекания капли воды – более 90% времени своего существования капли воды испарялись в режиме постоянного контактного диаметра (пиннинг контактной линии) (таблица 1). Выполнялось условие нерастекания капли. Движению контактной линии препятствовали

физические барьеры: после дозирования капли воды на поверхность подложки жидкость проникала в образованные при обработке шлифовальным инструментом и лазерным излучением каверны и микроканавки. Возможное растекание капли воды по нагретой поверхности подложки вследствие снижения поверхностного натяжения с ростом ее температуры не зарегистрировано.

Таблица 1 – Отношения времени процесса регистрации режима испарения к временам полного испарения капли ($t/t_{исп}$, %) и время испарения капли воды объемом 5 мкл с поверхностей подложек. Режимы испарения: I – постоянного контактного диаметра, II – постоянного контактного угла; III – смешанный

№	Способ обработки	$t/t_{исп}$, %			$t_{исп}$, с
		I	II	III	
1	Галтовка	35	15	50	2350±20
2	Шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой	95	-	5	1960±20
3	Сатинирование	93	-	7	2640±20
4	Шлифовка	96	-	4	2310±20
5	Лазерными импульсами с шагом 200 мкм	93	-	7	2640±20
6	Лазерными импульсами с шагом 66 мкм	98	-	2	3240±20
7	Лазерными импульсами с шагом 50 мкм	99	-	1	3260±20

На обработанной галтовкой поверхности подложки выделены три режима испарения капель воды: постоянного контактного диаметра (контактная линия капли неподвижна, контактный угол уменьшается); постоянного контактного угла (контактный диаметр уменьшается) и смешанный (контактный диаметр и контактный угол уменьшаются) (рис. 2).

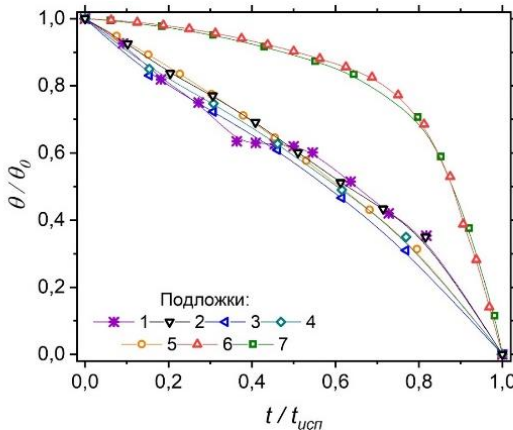


Рисунок 2 – Зависимости безразмерных контактных углов капель воды от безразмерного времени их испарения с поверхностей подложек: 1 – галтованная, 2 – полированная шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой, 3 – сатирированная, 4 – шлифованная, 5-7 обработанные лазерными импульсами с шагом 200 мкм, 66 мкм и 50 мкм, соответственно

Сделан вывод о том, что способы обработки поверхности сплава шлифовально-полировальным инструментом и лазерным излучением могут применяться для прецизионного контроля положения капель охлаждающих жидкостей на поверхности теплонагруженного элемента энергонасыщенного оборудования в технологии прямого жидкостного охлаждения.

По результатам экспериментов установлено, что при испарении капли воды с полистирольными частицами концентрацией 0,025 % с поверхностей подложек на последних образовывался твердый осадок в виде кольца (рис. 3). Диаметры образующихся при испарении капель воды с частицами полистирола колец не зависели от концентраций частиц и их размера и соответствовали начальным диаметрам капель воды.



Рисунок 3 – Типичное фотоизображение кольцевого осадка, образующегося на гладкой поверхности подложки при испарении капли воды с полистирольными частицами диаметром 100 нм (объемная концентрация частиц 0.025%)

По результатам анализа теневых изображений и геометрических характеристик испаряющихся капель установлено, что капли воды с частицами испарялись в режиме постоянного контактного диаметра как с шероховатых, так и относительно гладких и поверхностей подложек (обработанных всеми использовавшимися способами). Во время испарения капель воды частицы накапливались вблизи контактной линии, что приводило к повышению надежности закрепления контактной линии и выполнению условия нерастекания капли.

В четвертой главе сформулирована автономная замкнутая математическая модель, в которой локальные скорости испарения

рассчитывались в явном виде с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена. На рисунке 4 приведена область решения двумерной осесимметричной задачи теплопереноса в испаряющейся с поверхности нагретой металлической подложки капле воды. За начало системы координат принята точка пересечения оси симметрии капли с поверхностью подложки.

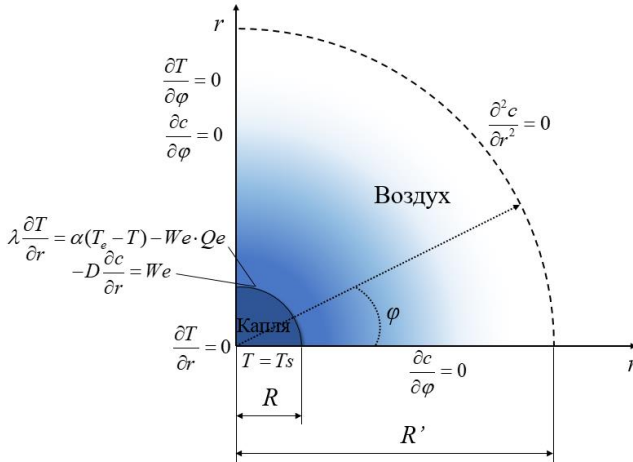


Рисунок 4 – Область решения задачи.

Принято, что теплоперенос в капле можно описать уравнением теплопроводности (1). При постановке задачи принято два допущения: 1) теплофизические свойства воды и водяного пара постоянны; 2) капля сохраняет форму шарового сегмента. С учетом сделанных допущений уравнение теплопроводности для капли имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right), \quad 0 < r < R; \quad 0 < \varphi < \pi / 2, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); C – теплоемкость, Дж/(кг·К).

Начальные условия для рассматриваемой задачи имели вид:

$$t = 0: \quad T = T_0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi / 2, \quad (2)$$

где t – время, с; T_0 – начальная температура воды, К.

На границах области решения задавались граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad t > 0, \quad 0 < \varphi < \pi / 2; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha(T_e - T) - We \cdot Qe, \quad t > 0, \quad \alpha > 0, \quad 0 < \varphi < \pi/2; \quad (4)$$

$$T \Big|_{\varphi=0} = Ts, \quad t > 0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\pi/2} = 0, \quad t > 0, \quad 0 < r < R, \quad (6)$$

где T_e – температура воздуха, К; T_s – температура поверхности подложки, К; Qe – теплота парообразования, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Задача (1) – (6) решена методом конечных разностей.

На каждом временном слое радиус капли воды изменялся вследствие ее испарения. Для решения сформулированной задачи координата положения границы раздела сред ($r=R$, $0^\circ < \varphi < \pi/2$) на каждом последующем временном слое рассчитывалась с помощью выражения:

$$R_{i+1} = R_i - \frac{We \cdot \Delta \tau}{\rho}, \quad (7)$$

где $\Delta \tau$ – шаг по времени, с; R_i и R_{i+1} – контактные радиусы капли воды на предшествующем и текущем временных слоях, соответственно, м.

Скорость испарения капли воды рассчитывалась с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена:

$$We = \frac{A \cdot (p_H - p)}{\sqrt{\frac{2\pi R^* T}{M}}}, \quad (8)$$

где A – коэффициент аккомодации; p_H и p – равновесное давление водяных паров и давление водяных паров в слое Кнудсена, Па; R^* – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M – молярная масса воды, кг/моль.

Равновесное давление водяных паров рассчитывалось с помощью выражения Клаузиуса-Клапейрона в экспоненциальной форме:

$$p_H = p_0 \cdot \exp\left(\frac{Qe \cdot M}{R^*} \cdot \left(\frac{T - T_0}{T \cdot T_0}\right)\right), \quad (9)$$

где p_0 – давление насыщения водяных паров при температуре кипения воды, Па; T_0 – температура кипения воды, К.

Давление водяных паров в слое Кнудсена рассчитывалось с помощью выражения:

$$p = c \cdot p_H, \quad (10)$$

где c – концентрация водяных паров вблизи поверхности капли воды.

Для определения концентраций водяных паров над испаряющейся каплей воды решена задача диффузии этих паров в слое заданной толщины ($\Delta = R' - R$):

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\rho D}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\rho D}{r^2 \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial c}{\partial \varphi} \right), \quad R < r < R'; \quad 0 < \varphi < \pi / 2 \quad (11)$$

Начальные условия для задачи диффузии водяных паров имели вид:

$$t = 0: \quad c = c_0, \quad R \leq r \leq R'; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi / 2, \quad (12)$$

где c_0 – начальная концентрация водяных паров; R' – радиус границы области решения, м (рис. 4).

Граничные условия:

$$-\rho D \left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=R} = We, \quad t > 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi / 2; \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right|_{r=R'} = 0, \quad t > 0, \quad 0 < \varphi < \pi / 2; \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad t > 0, \quad R < r < R'; \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi/2} = 0, \quad t > 0, \quad R < r < R'. \quad (16)$$

Т.к. при постановке задачи принято, что капля воды испарялась в неизолированной камере (рис. 1) на границе $r=R'$ задавалось «мягкое» граничное условие (14). Последнее используется в случае, если параметры среды на выходе из области решения не известны и не оказывают существенного влияния на характеристики основного моделируемого процесса.

Системы уравнений теплопроводности (1) и диффузии водяных паров (11) с соответствующими краевыми условиями решены методом конечных разностей. Разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы. Нелинейные алгебраические уравнения решены методом итераций. Тестирование метода решения проведено на последовательности сгущающихся сеток. Расчетная область включала 500 шагов (узлов) по угловой координате и 500 шагов по радиальной координате. Шаг по времени составлял 0,001 с. Задача решалась в программном пакете MATLAB (версия R2021b).

С целью обоснования достоверности результатов математического моделирования проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений объемов капель воды (рис. 5) и зависимостей скоростей испарения капель воды от температуры сатинированной

поверхности подложки (с текстурой в виде параллельно направленных микроканалов) (рис. 6). Контактный угол капли воды на поверхности подложки составил $87 \pm 2^\circ$.

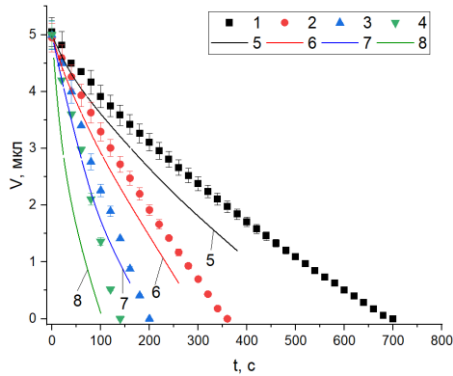


Рисунок 5 – Экспериментальные (1-4) и теоретические (5-8) зависимости объемов капель воды от времени ее испарения при температуре поверхности подложки: 1, 5 – 313 К; 2, 6 – 323 К; 3, 7 – 333 К; 4, 8 – 343 К.

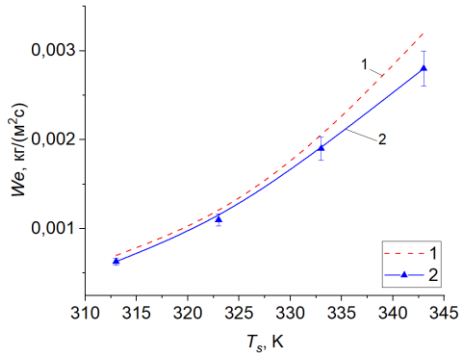


Рисунок 6 – Зависимости скоростей испарения капли воды от температуры поверхности подложки: 1 – результаты численного моделирования; 2 – результаты экспериментального исследования

Анализ зависимостей объемов капель воды от времени ее испарения (рис. 5) и скоростей испарения капель воды от температуры поверхности подложки (рис. 6) показал, что результаты численного моделирования хорошо соответствуют результатам экспериментов в исследуемом диапазоне температур поверхности подложки. Разница между

теоретическими и экспериментальными значениями объемов и скоростей испарения не превышают 25% и 15 %, соответственно.

По результатам математического моделирования установлено, что при испарении капли воды с начальным контактным радиусом 1,3 мм с нагретой поверхности перепад температур по контуру свободной поверхности капли может достигать 35 К и выше (рис. 7).

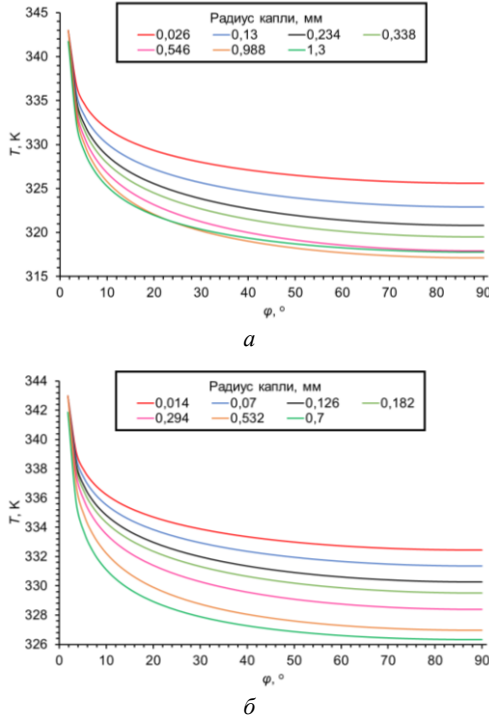
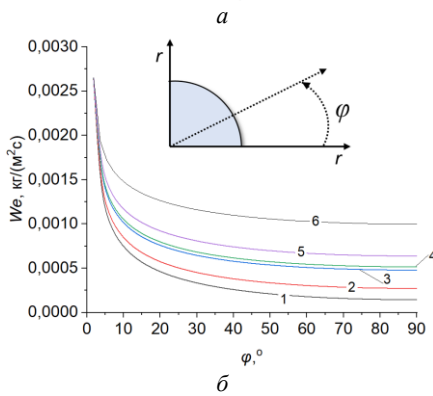
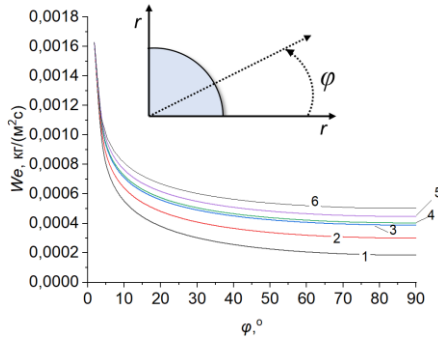


Рисунок 7 – Типичные распределения температур испаряющейся капли воды с нагретой до 343 К поверхности подложки. Времена испарения капли: а – 5 с; б – 100 с.

Также установлено, что температуры испаряющейся капли воды изменяются не только по радиальной, но и по угловой координате на протяжении всего времени существования капли. Немонотонное пространственное распределение температуры капли воды в горизонтальном относительно поверхности подложки направлении можно объяснить теплообменом не только между нагретой поверхностью подложки и жидкостью, но и между жидкостью и окружающим каплю нагретым воздухом. Установлено, что через 5 с и 100 с после начала

испарения максимальный перепад температур по контуру свободной поверхности капли уменьшился на 15 К (рис. 7). Что связано с уменьшением толщины капли вследствие ее испарения. Можно сделать вывод, что при охлаждении поверхностей теплонагруженных участков оборудования каплями жидкостей их температуры могут в течение достаточно длительного времени значительно отличаться от температур охлаждаемых поверхностей. Следовательно, если принимается допущение о том, что температура поверхности испаряющейся капли жидкости соответствует температуре поверхности теплонагруженного элемента оборудования, рассчитываемые скорости испарения капель жидкостей могут быть существенно завышены.

В результате анализа распределений локальных скоростей испарения капель в типичных условиях нагрева можно сделать вывод, что при увеличении угловой координаты локальные скорости испарения капли с нагретой поверхности подложки уменьшаются более чем в 10 раз (рис. 8).



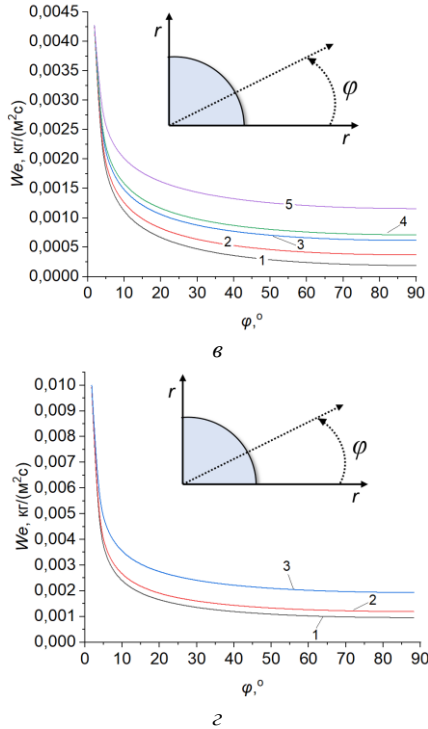


Рисунок 8 – Распределения локальных скоростей испарения каплей воды с нагретой до 313 К, 323 К, 333 К и 343 К поверхности подложки (а, б, в и г, соответственно) по угловой координате в различные моменты времени: 1 – 5 с; 2 – 10 с; 3 – 60 с; 4 – 100 с; 5 – 200 с; 6 – 300 с.

Можно сделать вывод, что при испарении каплей жидкостей с поверхностей теплонагруженных участков оборудования усредненные по поверхности каплей скорости испарения не обеспечивают возможность адекватной оценки интенсивности теплоотвода от охлаждаемой поверхности. Для достижения регламентного температурного режима энергонасыщенного оборудования необходимо вычисление распределений температур по контуру капли при прогнозировании скоростей их испарения.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при обработке поверхности подложки из алюминиевого сплава шлифовальной машиной, шлифовально-полировальными дисками и лазерным излучением выполняется условие нерастекания капли воды –

более 90 % времени своего существования капля воды испаряется в режиме постоянного контактного диаметра (пиннинг контактной линии).

2. Установлено, что при испарении капель воды с полистирольными частицами (при концентрации 0,025 %) на нагретой поверхности подложек образовывались твердые осадки в виде колец.
3. После добавления полистирольных частиц с характерными размерами 50 нм, 100 нм или 1000 нм в дистиллированную воду условие нерастекания капли воды с частицами объемной концентрацией 0,025% выполняется как на шероховатых, так и на относительно гладких поверхностях подложек из алюминиевого сплава.
4. Сформулирована математическая модель теплопереноса в испаряющейся с поверхности твердого тела капле, в которой локальные скорости испарения рассчитывались в явном виде с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена.
5. По результатам математического моделирования установлено, что температуры испаряющейся капли охлаждающей жидкости могут быть в течение достаточно длительного времени существенно ниже (на 10-15 %) температур поверхностей теплонагруженных элементов.
6. Перепад температур по угловой координате испаряющейся с нагретой от 313 К до 343 К поверхности подложки капли воды может достигать 35 К. Последнее приводит к существенному снижению (более чем в 10 раз) локальных скоростей испарения капли охлаждающей жидкости при увеличении угловой координаты от $\varphi = 0^\circ$ (контактная линия) до $\varphi = 90^\circ$ (точка, соответствующая максимальной толщине капли).
7. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований иллюстрируют возможность управления процессами охлаждения локальных нагретых до высоких температур участков поверхностей элементов конструкции энергонасыщенного оборудования при специальной обработке этих участков и последующем осаждении на эти участки капель испаряющихся при нагреве жидкостей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

Статьи в международных научных журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»:

1. Zaitsev D.V. Prediction of water droplet behaviour on aluminium alloy surfaces modified by nanosecond laser pulses / D.V. Zaitsev, K.A. Batishcheva, G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova // Surface and Coating Technology. – 2019. – V. 399. – p. 126206.
2. Batishcheva K.A. Evaporation of colloidal droplets from aluminium-magnesium alloy surfaces after laser-texturing and mechanical processing / K.A. Batishcheva, G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova, Yu.N. Vympina // Colloids and Surfaces A. – 2021. – V. 629. – p. 127301.
3. Zaitsev D.V. Effect of mechanical polishing of aluminium alloy surfaces on wetting and droplet evaporation at constant and cyclically varying pressure in the chamber / D.V. Zaitsev, K.A. Batishcheva, G.V. Kuznetsov, E.G. Orlova, O.A. Kabov // Journal of material Science. – 2021. – V. 56. – p. 20154-20168.

Статьи в журналах из Перечня ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

4. Батищева К.А. Испарение капель воды в изолированной от внешней среды камере / К.А. Батищева, А.Е. Нурпейис // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6, № 3 (23). – С. 8-22
5. Батищева К.А. Влияние способа обработки алюминиево-магниевого сплава на структуру кольцевых осадков, формирующихся при испарении капель коллоидных растворов / К.А. Батищева, Ю.Н. Вымпина // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2021. – Т. 77, № 1. – С. 15-18.
6. Батищева К.А. Влияние лазерной обработки поверхности алюминиево-магниевого сплава на «самосборку» наночастиц при испарении капель коллоидных растворов / К.А. Батищева, Ю.Н. Вымпина, Е.Г. Орлова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2021. – Т. 7, № 1(25). – С. 26-43.