

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Войткова Ксения Артуровна

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

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук
Кузнецов Гений Владимирович

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ С ПОВЕРХНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ	14
1.1 Характеристики процесса испарения капли жидкости с поверхности твердого тела	15
1.1.1 Режимы испарения капли жидкости	18
1.1.2 Скорость испарения капли жидкости	21
1.1.3 Математическое моделирование процесса испарения капли жидкости с поверхности твердого тела.....	25
1.2 Испарение капель жидкостей с частицами.....	27
1.3 Испарение капель жидкостей с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек.....	29
Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ЖИДКОСТИ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	39
2.1 Изготовление подложек	39
2.2 Используемые для проведения экспериментов жидкости.....	44
2.3 Экспериментальная установка и методики исследований процесса испарения капель воды с поверхностей алюминиево-магниевого сплава.....	44
Выводы по главе 2.....	49
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ШЕРОХОВАТЫХ НАГРЕТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДЛОЖЕК	50
3.1 Режимы испарения капель воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек.....	57
3.2 Скорость испарения капель воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек.....	65
3.3 Испарение капель воды с частицами полистирола	69
Выводы по главе 3.....	86

ГЛАВА 4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ С ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ КАПЛЕ ЖИДКОСТИ.....	87
4.1 Математическая модель	87
4.2 Верификация математической модели	93
4.3 Локальные скорости испарения капли воды.....	95
4.4 Распределение температур в массиве испаряющейся капли воды.....	97
Выводы по главе 4.....	100
Основные результаты и выводы	101
Список литературы	105

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Развитие электроники связано с постоянно увеличивающимися требованиями повышения удельной мощности электронных устройств, расширения температурного диапазона их работы и уменьшения габаритов [1]. Увеличение энергонасыщенности электронного оборудования инициирует интенсивные локальные тепловыделения (плотность теплового потока может достигать 1000 Вт/см^2 и выше [2]) и возникновение термических напряжений, как правило, с нестационарным пространственным распределением [1]. 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 [3,4]. Плотность отводимого с помощью воздушного охлаждения теплового потока составляет не более 35 Вт/см^2 [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 [5]. В таких системах вычислительное оборудование работает в резервуарах с охлаждающей жидкостью. Погружная система жидкостного охлаждения используется для отвода тепла от теплонагруженных участков «майнинг ферм» [5] и центров обработки данных [5]. Активно развиваются технологии непрямого жидкостного охлаждения: тепловые трубки, микро- и миниканалы [3], испарительные камеры [1,6,7]. Перспективной технологией охлаждения является и подача охлаждающей жидкости на теплонагруженный участок энергонасыщенного оборудования (прямое жидкостное охлаждение) [3]. В эту группу входят технологии охлаждения, в

которых жидкость подается на разогретую поверхность в виде капель или струй [3]. Например, при использовании спреевого охлаждения плотность отводимого теплового потока может достигать 1200 Вт/см^2 [2]. В основе указанных выше технологий охлаждения лежит принцип наиболее эффективного применения тепловых эффектов фазовых переходов (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 [8]. 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. Гатаповой, 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 поверхности 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.

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. Подробное описание методик экспериментальных исследований, методов, использованных при проведении экспериментов, а также методов решения уравнений теплопроводности и диффузии представлено в главах 2 и 4.

Научная новизна работы. Новизна результатов заключается в обосновании возможности управления процессом охлаждения локальных участков нагретых поверхностей энергонасыщенного оборудования при испарении капель воды в результате изменения шероховатости поверхности алюминиево-магниевого сплава. Установлены режимы испарения, вычислены скорости испарения и установлены температуры испаряющихся с шероховатых нагретых поверхностей подложек капель воды. 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. Установлено влияние наночастиц полистирола в капле воды на выполнение условия ее нерастекания по поверхностям подложек из алюминиево-магниевого сплава.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в обосновании возможности управления процессом испарения капель жидкостей в результате изменения шероховатости поверхности алюминиево-магниевого сплава различными способами. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для разработки рекомендаций к нормативным методам расчета систем капельного охлаждения энергонасыщенного оборудования (электронной и радиоэлектронной техники, средств связи и управления, электронно-вычислительной техники).

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.

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 г.), III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020 г.), Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские 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 достаточно многочисленных 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 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 характеристиками процесса испарения капель жидкостей.

Во второй главе для установления характеристик процесса испарения (скорости и режимы испарения) капель воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек использована теневая методика. На основании анализа информации о температурных режимах типичных электронных устройств во время их работы выбраны температуры (323-343 К) до которых будет нагреваться подложка. Для исследования процесса испарения капель воды с частицами с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек выбраны полистирольные частицы с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований основных характеристик процесса испарения капель воды с шероховатых нагретых поверхностей алюминиево-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). На обработанной галтовкой относительно гладкой 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). Установлено, что при испарении капель воды с полистирольными частицами концентрацией 0,025 % с поверхностями исследуемых подложек образовывались твердые осадки в виде колец. На сатинированной и обработанных лазерным излучением поверхностях подложек образуются вытянутые параллельно вектору движения луча лазера или полировального инструмента твердые осадки. Увеличение концентрации относительно крупных полистирольных частиц диаметром 1000 нм даже до 0,3 % привело к изменению вида твердого осадка только на обработанной лазерным излучением с шагом 50 мкм гидрофобной поверхности вследствие многомодальной шероховатости.

В четвертой главе сформулирована автономная замкнутая математическая модель, в которой локальные скорости испарения рассчитывались в явном виде с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена. В результате математического моделирования процесса испарения капли воды с поверхности твердого тела в условиях ее нерастекания установлено, что температуры испаряющейся капли охлаждающей жидкости могут быть в течение достаточно длительного времени существенно ниже (на 10-15 %) температур поверхностей теплонагруженных элементов. 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).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Результаты исследований процесса испарения капель жидкостей с поверхностей твердых тел представлены в работах как российских так и зарубежных ученых [9–18]. Вклад в развитие этого научного направления внесли: коллектив лаборатории интенсификации процессов теплообмена Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН под руководством О. А. Кабова (Д. В. Зайцев, Е. Я. Гатапова, А. А. Семенов и др.), коллектив лаборатории процессов переноса в многофазных системах Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (С.А. Мисюра, В. С. Морозов), коллектив лаборатории теплофизики многофазных систем Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН по руководством В. В. Кузнецова, руководитель научно-исследовательской лаборатории фотоники и микрофлюидики Тюменского государственного университета Н. А. Иванова, научный коллектив Национального исследовательского университета «МЭИ» под руководством Ю. А. Кузма-Кичты, коллектив Санкт-Петербургского государственного университета (А. К. Щекин, А. Е. Кучма и др.), коллектив лаборатории поверхностных сил Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН под руководством Л. Б. Бойнович и А. М. Емельяненко, коллектив Томского политехнического университета под руководством Г. В. Кузнецова (Д. В. Феоктистов, Е. Г. Орлова, А. Г. Исламова) и др. В зарубежных научных лабораториях исследования описанных выше процессов проводятся под руководством Д. Брутина (Франция), Б. Собака (Франция), С. Семенова (Великобритания), В. Старова (Великобритания) и др.

Интерес ученых к исследованию протекающих на границе раздела жидкость/газ/твердое тело процессов подтверждается опубликованными за последнее десятилетие работами (обзоры на которые приведены в [18–20]) и обусловлен перспективностью реализации исследуемых процессов в устройствах

капельного и спреевого охлаждения [3], в микрофлюидных устройствах [21], в технологиях создания электронных схем, токопроводящих покрытий, пористых пленок [22] и др.

1.1 Характеристики процесса испарения капли жидкости с поверхности твердого тела

Испарение капли жидкости с поверхности твердого тела – сложный процесс [20], на характеристики которого (режимы испарения, времена, скорости испарения) помимо параметров окружающей среды (температур [23,24], давлений [25], концентраций паров испарившейся жидкости [26] и др.) влияют теплопроводность материала подложки [20], теплофизические свойства жидкости [27] и др. После дозирования капли жидкости на поверхность твердого тела она принимает форму шарового сегмента в случае, если силы поверхностного натяжения жидкости преобладают над силами гравитации [9]. При этом, контактный радиус капли, R , м меньше капиллярной длины, L_c , м [28,29]:

$$L_c = \sqrt{\frac{\sigma_{жг}}{\rho \cdot g}}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{жг}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость/газ, Дж/м²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения м/с².

Известно [30], что на характеристики процесса испарения капель жидкостей влияют и свойства смачиваемости поверхности твердого тела (характеризуются контактным (краевым) углом смачивания θ , ° [9]). Для вычисления контактного угла капли жидкости на гладкой химически однородной поверхности твердого тела используется уравнение Юнга [31]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}, \quad (1.2)$$

где $\sigma_{ТГ}$, $\sigma_{ТЖ}$, $\sigma_{ЖГ}$ – поверхностные натяжения на границах твердое тело/газ, твердое тело/жидкость, жидкость/газ, соответственно, Дж/м².

Связь между геометрическими характеристиками капли жидкости (контактный угол, контактный радиус и объем, V , м³) характеризуется выражением (1.3) [30]:

$$V = \frac{\pi \cdot R^3}{3} \frac{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)}{\sin^3 \theta}. \quad (1.3)$$

Поверхность твердого тела может быть супергидрофильной (при смачивании каплей воды контактный угол меньше 5°), гидрофильной (при смачивании каплей воды контактный угол лежит в пределах 5° < θ < 90°) или гидрофобной (при смачивании каплей воды контактный угол более 90°). Супергидрофобной называется шероховатая поверхность с θ более 150° и гистерезисом угла [32] (разность контактных углов при натекании и оттекании жидкости вследствие неоднородности поверхности твердого тела) менее 3° [20,33].

Известны [34] два режима смачивания шероховатой химически неоднородной поверхности твердого тела каплей жидкости: гомогенный (модель Венцеля) и гетерогенный (модель Касси–Бакстера) (рисунок 1.1).

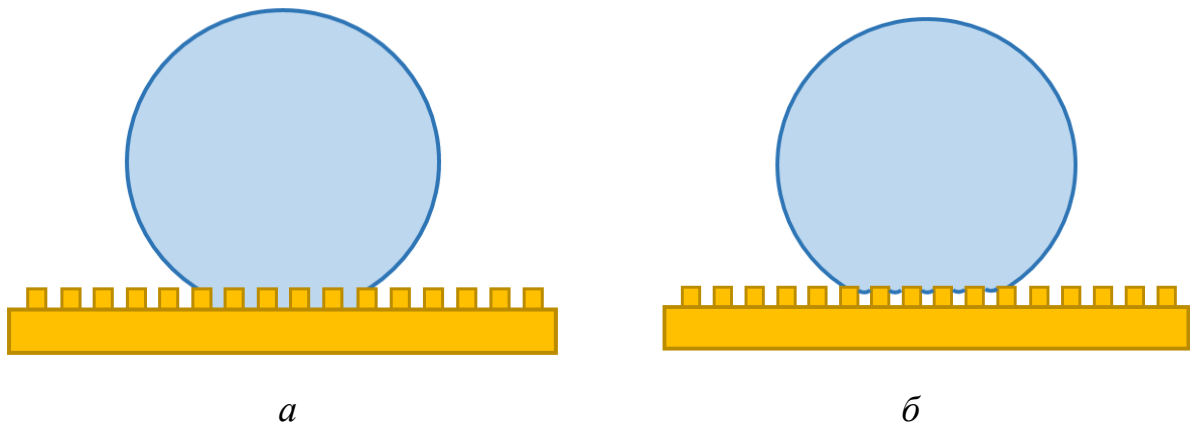


Рисунок 1.1 – Режимы смачивания поверхности твердого тела каплей жидкости:
a – гомогенный, *б* – гетерогенный

В условиях гомогенного режима смачивания жидкость проникает в расположенные на поверхности твердого тела каверны (рисунок 1.1 *a*). Такой режим описывается уравнением (1.4) [34]:

$$\cos \theta_B = r \cdot \cos \theta, \quad (1.4)$$

где θ_B – контактный угол капли жидкости на шероховатой поверхности; r – отношение площади межфазной поверхности «жидкость–твердое тело» к площади «видимой» межфазной поверхности (проекции на горизонтальную плоскость).

В гетерогенном режиме смачивания после дозирования капли жидкости на шероховатую поверхность твердого тела в кавернах остаются пузырьки газа (рисунок 1.1 *б*). Такой режим описывается уравнением (1.5) [34]:

$$\cos \theta_K = f_1 \cdot \cos \theta - f_2, \quad (1.5)$$

где f_1 – доля площади контакта «жидкость–твердое тело»; f_2 – доля площади контакта «жидкость–газ».

1.1.1 Режимы испарения капли жидкости

Ранее установлено [35], что при испарении капли жидкости с поверхности твердого тела могут изменяться как контактный угол, так и контактный диаметр капли. По характеру изменения геометрических характеристик капли жидкости выделяют режимы ее испарения [20,35] (рисунок 1.2). Р. Пикнетт и Р. Бексон впервые выделили два возможных режима испарения капель жидкостей с поверхностей твердых тел: режим постоянного контактного угла (депиннинг контактной линии) (рисунок 1.2 *а*) и режим постоянного контактного диаметра (пиннинг контактной линии) (рисунок 1.2 *б*) [35].

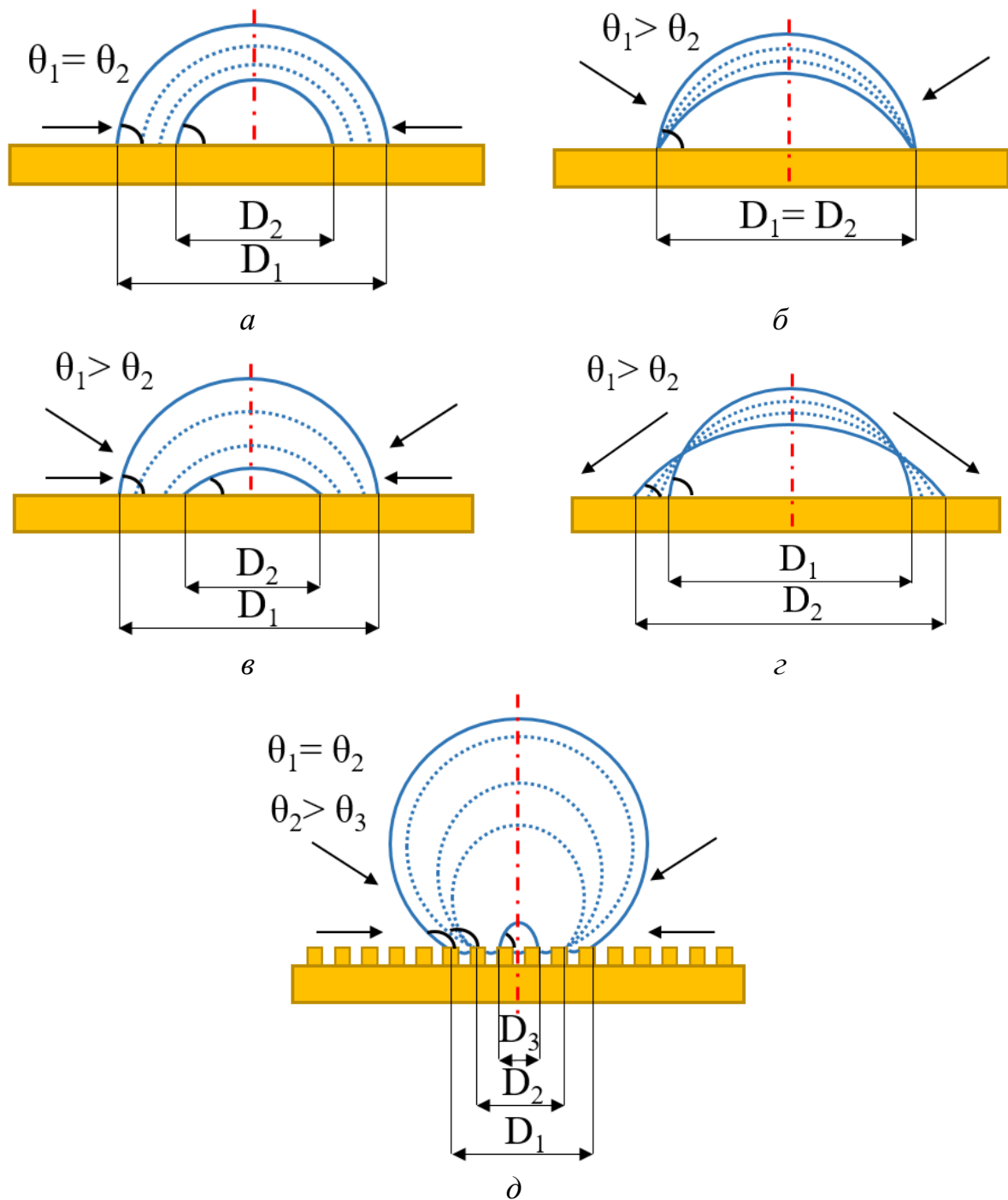


Рисунок 1.2 – Режимы испарения капель жидкостей с поверхностей твердых тел:
a – постоянного контактного угла; *б* – постоянного контактного диаметра; *в* – смешанный (уменьшающиеся контактный угол и контактный диаметр); *г* – с увеличивающимся контактным диаметром и уменьшающимся контактным углом;
д – «зацеplения и проскальзывания» контактной линии

Известно [20], что капля жидкости испаряется с гладкой химически однородной поверхности твердого тела в режиме постоянного контактного угла (рисунок 1.2 *a*). Авторами установлено [36], что после обработки поверхности стекла в плазменном очистителе и в растворах изопропанола, диметилдиметоксисилана и серной кислоты капли воды испарялись в режиме постоянного контактного угла. На поверхности стекла формировалось гидрофобное покрытие (контактный угол 101° - 106° , гистерезис контактного угла менее 2°).

При испарении капли жидкости режим постоянного контактного диаметра устанавливается вследствие наличия на поверхности твердого тела потенциальных энергетических барьеров [37,38]. Последние вызваны химической (химический состав приповерхностных слоев) или физической (шероховатость) неоднородностью поверхности [37,38]. Для анализа влияния режима испарения капли жидкости («пиннинг» и «депиннинг» контактной линии) на скорость ее испарения авторы [39] использовали квазистационарную диффузионную модель испарения. Установлено [39], что разница между скоростями испарения капли жидкости в режиме пиннинга и депиннинга контактной линии составляет не более 27 % (пиннинг контактной линии не оказывает существенного влияния на характеристики процесса испарения капли). Стоит отметить, что в [39] перепад температур между поверхностью твердого тела и окружающим каплю воздухом не учитывался.

Смешанный режим испарения характеризуется одновременным уменьшением и контактного диаметра и контактного угла испаряющейся капли жидкости [20] (рисунок 1.2 *в*). В работе [40] при дозировании капли воды на нагретую поверхность подложки авторами [40] зарегистрирован режим, характеризующийся увеличением контактного диаметра и уменьшением контактного угла (рисунок 1.2 *г*). При испарении капли воды с гидрофобных или супергидрофобных шероховатых поверхностей подложек может установиться

«sticks-and-slips» [20] (зацепление и проскальзывание) режим испарения, характеризующийся поочередным пиннингом и депиннингом контактной линии капли [20] (рисунок 1.2 д).

Установлено [41], что шероховатость поверхности твердого тела влияет на режимы испарения капли жидкости. Например, в [41] установлено, что капля воды испаряется с полированной поверхности полидиметилсилоксана в трех режимах (постоянного контактного диаметра, постоянного контактного угла и смешанном). Но после увеличения шероховатости поверхности полидиметилсилоксана капля воды испарялась в двух режимах (постоянного контактного диаметра и в смешанном) [41]. Авторами [41] сделан вывод о том, что с увеличением шероховатости поверхности твердого тела переход из режима с постоянным контактным диаметром может происходить сразу в смешанный режим испарения [41].

1.1.2 Скорость испарения капли жидкости

Известно [30], что на характеристики процесса испарения капель жидкостей с поверхностей твердых тел влияют их свойства смачиваемости (рис. 1.3). С увеличением контактных углов капель жидкостей на твердой поверхности скорости их испарения уменьшается [30]. Последнее связано со скоплением паров испаряющейся жидкости вблизи контактной линии (эффект «угла») [30]. В результате экспериментального исследования процесса испарения капли воды с анодированной щавелевой кислотой поверхности подложки с лунками установлено [42], что уменьшение контактного угла капли воды вследствие увеличения диаметра и глубины лунок при взаимодействии щавелевой кислоты с металлом привело к увеличению скорости ее испарения.

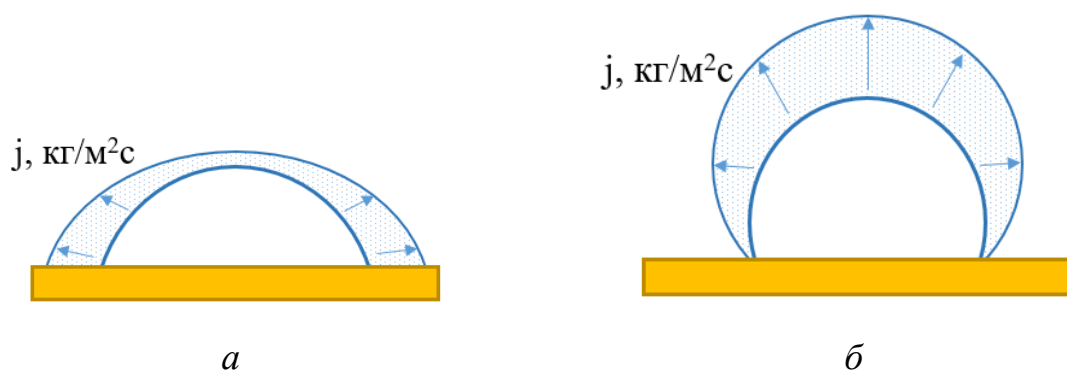


Рисунок 1.3 – Испарение капли жидкости с поверхности твердого тела: *a* – контактный угол менее 90° , *б* – контактный более 90°

Известно [9], что испарение жидкости – эндотермический процесс. В [43] авторами зарегистрирован «охлаждающий эффект» (уменьшение температуры поверхности подложки) при испарении капли жидкости с поверхности материала с относительно низкой теплопроводностью. Уменьшение температуры поверхности твердого тела под испаряющейся каплей жидкости приводит к снижению ее скорости испарения [11]. В [44] для расчета удельной скорости испарения (We , кг/м²с) использовалась формула 1.7:

$$We = \frac{\rho_{\text{ж}}(V_{i+1} - V_i)}{(t_{i+1} - t_i) \cdot (A_{i+1} + A_i) / 2}, \quad (1.7)$$

где V_{i+1} , V_i , A_{i+1} , A_i – объемы, м³ и площади, м² капли в момент времени t_{i+1} и t_i , с, соответственно. Площадь свободной поверхности капли (A , м²) может быть рассчитана с помощью выражения (1.8) [29,44]:

$$A = \frac{2\pi R^2}{1 + \cos \theta}. \quad (1.8)$$

Скорость испарения капли жидкости может быть рассчитана и с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена [45]:

$$We = \frac{A \cdot (p_H - p)}{\sqrt{\frac{2\pi R^* T}{M}}}, \quad (1.9)$$

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.

Как в зарубежной [20,30,46,47], так и в отечественной литературе [48] за скорость испарения капли жидкости с поверхности твердого тела может приниматься скорость убыли массы или объема испаряющейся капли (dm/dt , кг/с или dV/dt , м³/с). Скорость убыли массы капли жидкости может быть рассчитана с помощью математического выражения диффузионной модели испарения [30]:

$$-\frac{dm}{dt} = \pi R D (c_s - c_\infty) f(\theta), \quad (1.10)$$

где D – коэффициент диффузии паров испаряющейся жидкости в окружающую каплю среду, м²/с; c_s , c_∞ – массовые концентрации паров испаряющейся жидкости на границе жидкость/газ и в окружающем каплю газе, кг/м³; $f(\theta)$ – функция контактного угла, учитывающая отклонение капли от сферической формы. Для начальных контактных углов, лежащих в диапазоне $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $f(\theta)$ может быть рассчитана с помощью полученного Х. Ху и Р. Г. Ларсоном выражения [30]:

$$f_{HL}(\theta) = 1,3 + 0,27\theta. \quad (1.11)$$

Для расчета $f(\theta)$ в диапазоне $0^\circ < \theta < 180^\circ$ используется выражение Попова [49] (рисунок 1.4):

$$f_P(\theta) = \frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta} + 4 \int \frac{1 + \cosh 2\theta\tau}{\sinh 2\pi\tau} \tanh((\pi - \theta)\tau) d\tau. \quad (1.12)$$

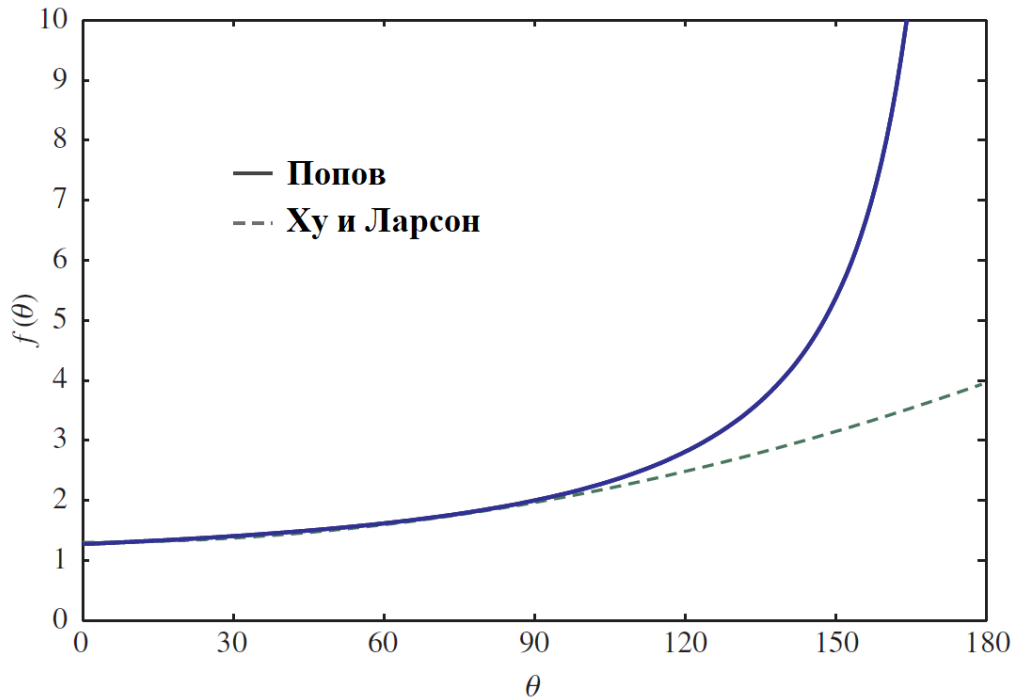


Рисунок 1.4 – Теоретические зависимости функции $f(\theta)$ от контактного угла [30]

Р. Дж. Пикнетт и Р. Дж. Бексон [49] также получили математическое выражение (1.13) для расчета скорости убыли массы капли жидкости. В отличие от (1.10) в (1.13) используется не контактный радиус капли (R , м), а условный радиус сферы (R_S , м) шаровым сегментом которой является капля.

$$-\frac{dm}{dt} = 4\pi R_S D(c_s - c_\infty) f(\theta). \quad (1.13)$$

Функция контактного угла $f(\theta)$ в уравнении (1.13) рассчитывается с помощью выражений (1.14) и (1.15) (при условии $0^\circ < \theta < 10^\circ$ (1.14) и при $10^\circ < \theta < 180^\circ$ (1.15)) [49]:

$$2f_{PB}(\theta) = 0,6366\theta + 0,09591\theta^2 - 0,06144\theta^3, \quad (1.14)$$

$$2f_{PB}(\theta) = 0,00008957 + 0,6333\theta + 0,116\theta^2 - 0,08878\theta^3 + 0,01033\theta^4. \quad (1.15)$$

В [47,50] приведена формула (1.16) для расчета скорости испарения капель жидкостей (испаряющихся в режиме постоянного контактного диаметра).

$$-\frac{dm}{dt} = 2\pi D \Delta P \frac{RM}{\rho R^* T \sin(\theta / \alpha)}, \quad (1.16)$$

где ΔP – разница между давлением насыщенного пара испаряющейся жидкости и давлением пара в окружающей среде, Па; M – молярная масса, кг/моль; R^* – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; α – безразмерный коэффициент, который может варьироваться от 0,64 при $\theta = 0^\circ$ до 1,0 при $\theta = 90^\circ$.

1.1.3 Математическое моделирование процесса испарения капли жидкости с поверхности твердого тела

Основными недостатками известных [39,51–58] математических моделей испарения капли жидкости с поверхности твердого тела является использование эмпирических выражений с несколькими постоянными, определяемыми по результатам экспериментальных исследований, для расчета локальных скоростей испарения. Например, в [54] и [55] использовано эмпирическое выражение Антуана [54,55], в которое входят три константы для расчета давления водяных паров. Эти три константы необходимо определять для каждой конкретной жидкости экспериментально. По рассчитанным таким образом давлениям водяных паров в [54] и [55] вычисляются концентрации. Последние, в свою очередь, используются для расчета локальных скоростей испарения в рамках математического выражения первого закона Фика [54,55]. В работах [39,51–53] для расчета концентраций водяных паров над испаряющейся каплей жидкости авторами также

использовалось выражение, включающее определяемые в экспериментах коэффициенты. В [56] сделано допущение, что локальные скорости испарения одинаковы по всей поверхности капли. Для вычисления локальных скоростей испарения капель жидкости авторы [57] использовали установленные экспериментально концентрации водяных паров. В сформулированной в [58] математической модели процесса испарения капли жидкости с поверхности твердого тела скорости испарения не рассчитывались. Сделано допущение, что в течении 40 секунд уменьшение объема капли при ее испарении пренебрежимо мало [58]. Охлаждение поверхности капли вследствие ее испарения также не учитывалось.

По результатам вычисления концентраций водяных паров над испаряющейся каплей жидкости рассчитывались скорости течений в капле [52]. Установлено [52], что с уменьшением концентрации водяных паров вблизи поверхности испарения скорости внутренних (термогравитационных) течений в капле жидкости увеличиваются. Последнее связано с увеличением интенсивности отвода водяных паров от поверхности капли в результате увеличения скорости ее испарения. После анализа рассчитанных скоростей внутренних течений в капле воды и этанола авторами [59] сделан вывод, что скорости течений вблизи линии трехфазного контакта пренебрежимо малы при испарении капли с поверхности подложки при нормальных по температуре и давлению условиях. По полученным с помощью инфракрасной камеры (FLIR T620) распределениям температур испаряющихся с нагретой до 55 °С поверхности подложки капель пентана, гексана и жидкости HFE710 авторами [60] идентифицировали конвективные течения жидкостей в каплях («конвективные ячейки» [60]). Установлено [60], что скорости конвективных течений в капле пентана являются максимальными (в сравнении с гексаном и HFE710). По рассчитанным скоростям потоков жидкости в капле установлено [61], что с уменьшением начального объема капли от 5 мкл до 0,5 мкл скорости конвективных течений в капле стремятся к нулю. Последнее связано с

уменьшением перепада температур по толщине капли. Аналогичный результат был получен при моделировании процесса испарения капли жидкости с текстурированной поверхности полидиметилсилоксана (ПДМС). В результате математического моделирования С. Семеновым и др. установлено [62], что диффузионная модель испарения может применяться для расчета скорости испарения капли жидкости с контактным радиусом более 10^{-6} м.

1.2 Испарение капель жидкостей с частицами

Исследование процесса «самосборки» [63] органических или неорганических частиц (осаждение частиц на твердой поверхности) при испарении капель коллоидных растворов (высокодисперсной системы с частицами от 1 нм до 1000 нм [64]) с поверхностей твердых тел является актуальным в связи с возможностью применения образующихся структур для производства изделий фотоники [22], оптики [65], электроники [66] и др. Возникающие при испарении капель коллоидных растворов эффекты применяются при проведении медицинских или генетических исследований [67]. С помощью коллоидных растворов на поверхности материалов могут наноситься токопроводящие покрытия и пористые пленки [22]. Коллоидные растворы используются для производства искусственных фотонных кристаллов, являющихся альтернативой природным фотонным кристаллам (опалам), которые формировались в результате «самосборки» [63] частиц диоксида кремния вследствие геологических процессов [63]. Еще одно направление исследований связано с развитием жидкостных технологий охлаждения энергонасыщенного оборудования [13]. Так в [68], добавление в дистиллированную воду наночастиц Si/Ag (0,006 % от общей массы получившегося раствора) привело к увеличению скорости испарения капель коллоидного раствора с поверхности твердого тела на 55,5% (в сравнении со скоростью испарения капли дистиллированной воды в аналогичных условиях). Но при критической концентрации частиц в жидкости (которая определяется для

конкретного коллоидного раствора) скорость испарения существенно снижается [69].

После испарения капли коллоидного раствора может образоваться как однослойный, так и многослойный осадок [63]. Выделены [70] виды возможных осадков: кристаллы, диск, «колпачок» [50], кольцо (кофейное кольцо), несколько колец разного диаметра и др. (Рисунок 1.5). Кристаллы на поверхности твердого тела образуются при испарении капель водных растворов солей [13,71]. Симметричные осадки образуются только на предварительно очищенной от возможных загрязнений поверхности подложки [72]. «Самосборка» частиц при испарении капли коллоидного раствора впервые была зарегистрирована Робертом Д. Диганом с соавторами при исследовании процесса испарения капель кофе [73,74].

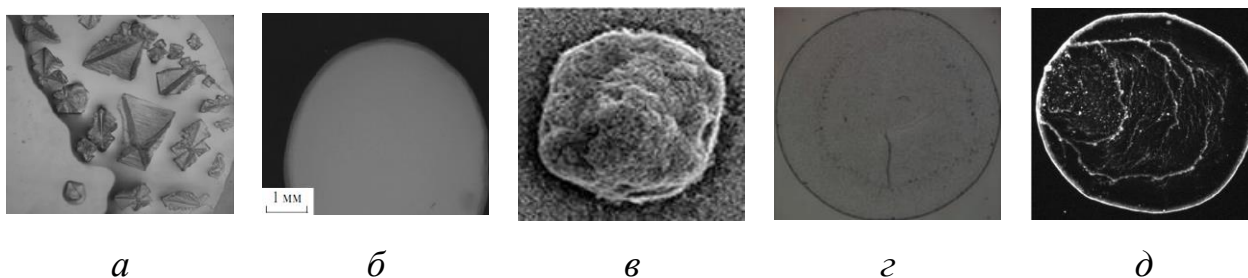


Рисунок 1.5 – Образовавшиеся при испарении капель коллоидных растворов осадки: *a* – кристаллы [13], *б* – диск [75], *в* – «колпачок» [50], *г* – кольцо [70], *д* – несколько колец разного диаметра [68]

На вид образующегося на поверхности подложки осадка влияют размеры, форма частиц (шар, эллипсоид и др.) [76], их концентрация [76]. Для управления видом осадка предложено [67] использовать устройство электросмачивания на диэлектрике (DC-EWOD), поверхностные акустические волны (SSAW) [77], метод лазерно-индуцированных микропузырьков (LIMBT) [78] или добавление различных поверхностно-активных веществ [73,79]. Установлено [75], что вид образующегося при испарении капель коллоидного раствора осадка зависит и от

шероховатости поверхности подложки. Увеличение шероховатости поверхности подложки может приводить к уменьшению скорости движения частиц вблизи границы жидкость/твердое тело при перемещении радиальных потоков жидкости в капле. В результате образуется осадок с равномерным распределением частиц (диск) [75]. Уменьшение контактного диаметра капли коллоидного раствора при ее испарении с поверхности подложки приводит к образованию осадка в виде «колпачка» [50]. В результате испарения в режиме постоянного контактного диаметра образуются кольцевые структуры.

1.3 Испарение капель жидкостей с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек

Известно [30], что на характеристики процесса испарения капель жидкостей с поверхностей твердых тел влияют их свойства смачиваемости. С увеличением контактных углов скорости испарения капель жидкостей уменьшаются [30]. Свойства смачиваемости поверхности твердого тела зависят от шероховатости и химического состава материалов приповерхностных слоев [80]. Например, в [81] после нанесения гидрофобизирующего покрытия на обработанную лазерным излучением поверхность стали контактный угол увеличился от 0° (полное смачивание) до 168° . Нанесение монослоя гидрофобного агента не влияло на обработанную лазером текстуру [81]. Хранение обработанных лазерным излучением подложек из меди (рисунок 1.6 [82]) и латуни в воздушной среде в течение 44 дней [82] и нержавеющей стали в течение 22 дней [83] привело к инверсии свойств смачиваемости от гидрофильности к супергидрофобности вследствие изменения химического состава приповерхностных слоев.

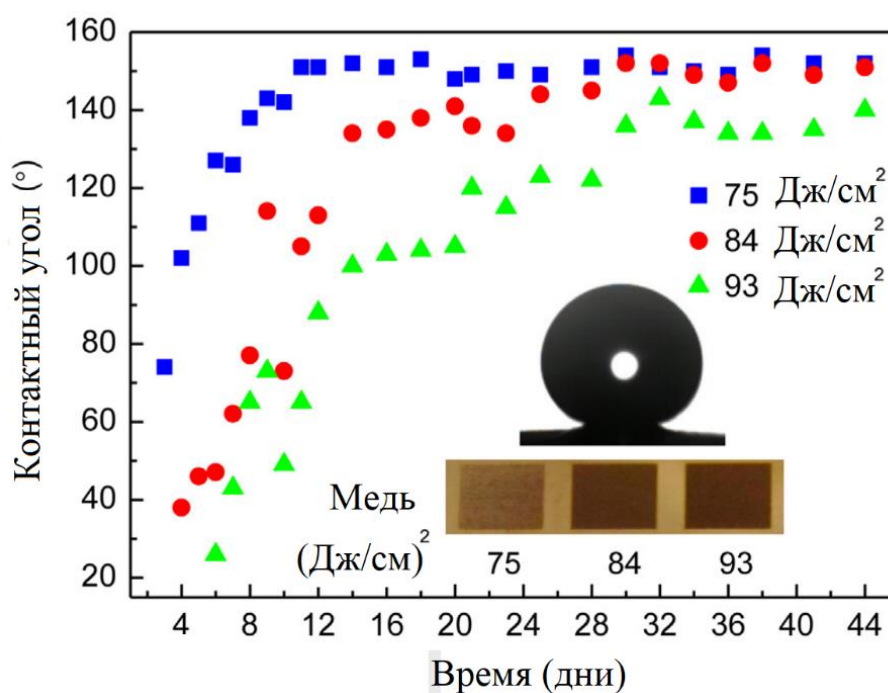


Рисунок 1.6 – Зависимости контактных углов от времени после обработки поверхностей меди импульсным лазерным излучением с плотностью энергии импульса 75 Дж/см², 84 Дж/см² и 93 Дж/см² [82]

Традиционно, поверхности основных элементов конструкций теплообменного оборудования полируют для уменьшения шероховатости и адгезии. Кроме того, для повышения производительности технических устройств разрабатываются и применяются новые материалы и покрытия с улучшенными функциональными свойствами [84,85]. Например, К.А. Емельяненко с соавторами [81] предложили перспективный способ обработки поверхностей металлов лазерным излучением с последующим нанесением гидрофобного агента для повышения эффективности сбора воды из аэрозолей. В другой работе авторов [86] лазерная обработка нержавеющей стали применялась для получения износостойкого супергидрофобного покрытия, характеризующегося высокой стойкостью функциональных свойств при длительном контакте с водой.

Процедура оценки характеристик поверхности подложки после ее модификации включает анализ текстуры по фотоизображениям, полученным

одним из способов [80,85,87–89]: сканирующей электронной микроскопией (SEM), атомной силовой микроскопией (АСМ или AFM), 3D оптической профилометрией (бесконтактным профилометром) и т.д. После воздействия на металлы и сплавы лазерным излучением или механическим трением изменяется как текстура поверхности, так и химический состав материалов приповерхностных слоев [90,91]. Последний определяется с помощью анализов [80,87–89]: энергодисперсионного (EDS или EDX), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS), волновой дисперсионной рентгеновской спектроскопии (WDS) и др.

После обработки металлов и сплавов для характеристики шероховатости их поверхностей используются двумерные (R_i) и трехмерные (S_i) характеристики шероховатости [80,89,92–95]. Последние определяются по профилям, полученным в пределах базовой длины (двумерные характеристики) или области (трехмерные характеристики шероховатости). На основании анализа результатов [80,89,92–95] установлено, что основной характеристикой шероховатости поверхностей металлов и сплавов является среднее арифметическое отклонение профиля, полученное в пределах базовой длины (Ra), мкм (1.17) или области (Sa), мкм (1.18):

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx, \quad (1.17)$$

$$Sa = \frac{1}{A} \int_0^L \int_0^L |Z(x, y)| dx dy. \quad (1.18)$$

Для получения профилей, трехмерных изображений и определения характеристик шероховатости поверхностей подложек используются контактные (с щупом) или бесконтактные (оптические) профилометры [80,89,92–95].

Перед проведением экспериментов поверхности подложек металлов и сплавов обычно выравниваются одним из известных способов (например, химическим травлением карбида кремния [94], полировкой с помощью лазерного излучения сплава «Inconel 718» [96] и нержавеющей стали [95], плазменной полировкой нержавеющей стали [93]). В [94] после химического травления карбида кремния в расплавленном гидроксиде калия в течении 30 секунд при 700 °С значение Sa уменьшилось от 250 нм до 25 нм. Плазменная полировка поверхности подложки из нержавеющей стали привела к уменьшению Sa от 8,67 нм (необработанная поверхность) до 0,79 нм.

Перед модификацией поверхностных свойств металлов и сплавов, например, лазерным излучением, важным условием является полировка их поверхностей, т.к. установлено [97], что микронеровности на поверхности твердого тела (каверны, включения металлов, царапины и др.) и неоднородные слои загрязнений (окалины, технические масла и пр.) влияют на поглощение лазерного излучения твердым телом. Установлено [95], что после полировки поверхностей подложек из нержавеющей стали импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм, мощностью 15 Вт и частотой 30 кГц значение Sa уменьшилось от 9,4 нм, 15,8 нм, 24,8 нм и 40,9 нм (Sa поверхностей подложек до лазерной полировки) до 1,5 нм, 2,3 нм, 5,2 нм и 15,1 нм, соответственно. Последнее объясняется тем, что при воздействии электромагнитной волны на шероховатую поверхность возникают поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ), которые существенно влияют на процессы рассеяния света адсорбированными на поверхности частицами и генерации высших гармоник при отражении лазерного излучения от поверхности металлов [97].

Несмотря на растущую популярность современных немеханических способов полировки, традиционные (механические) способы обработки поверхностей металлов и сплавов с использованием шлифовально-полировальных смесей (абразивом которых являются оксиды хрома и алюминия, алмазная

крошка), мягких тканей [92], галтовочных станков [89] и др. остаются актуальными и применяются как для обработки технологических поверхностей, так и при подготовке поверхностей подложек для экспериментальных исследований [23,24]. Полированные поверхности принимаются за «условно гладкие» [98,99]. Например, А. Е. Кучма и соавторы [11] применяли зеркальную полировку кварцевой пластины для ее последующей гидрофобизации в парах гексаметилдисилазана для исследований режимов испарения капли воды с гидрофобной поверхности. Для установления влияния температур поверхности подложки на характеристики процесса испарения капли воды в [14] использована полированная подложка с золотым покрытием (11-ый класс шероховатости поверхности). Для проведения экспериментов по испарению капель водно-солевых растворов (LiBr, CaCl₂, LiCl, NaCl) использована полированная подложка из алюминиевого сплава с Ra = 0,056 мкм [40].

Обработкой шлифовально-полировальными материалами можно как уменьшить шероховатость поверхности металлов и сплавов, так и увеличить ее за счет создания анизотропной или упорядоченной текстуры. Например, в [16] для создания супергидрофобного защитного покрытия перед плазменным электролитическим оксидированием (ПЭО) поверхности магниевое сплава МА8 [100] и сплава алюминия АМг3 обрабатывали наждачной бумагой различной зернистости. Варьированием размерами зерен абразива шлифовальных дисков от 8,5 мкм до 35 мкм на поверхности полированных подложек из алюминиевого сплава авторами [99] созданы четыре неупорядоченные текстуры, отличающихся между собой характеристиками шероховатости. С увеличением шероховатости поверхностей исследуемых подложек контактный угол капель воды уменьшался. Установлено [101], что характеристика шероховатости Kr (средний наклон профиля шероховатости) оказывает наибольшее влияние на характеристики процесса растекания капли деионизированной воды по шлифованным наждачной бумагой поверхностям алюминиевого сплава АА7064, титанового сплава Ti-6Al-

4V, стали AISI 8630 и медного сплава UNS C17000. Текстура последних представляла собой однонаправленные канавки.

После обработки поверхностей металлов и сплавов возможные изменения поверхностных свойств вследствие воздействия полировальных смесей, нагрева или плавления приповерхностных слоев металлов и сплавов трением, лазерным излучением, как правило, в дальнейшем не учитываются [87,88]. Последнее затрудняет прогнозирование характеристик смачивания и испарения капель жидкостей с таких поверхностей с применением известных математических моделей [102]. Например, в моделях Венцеля [34] и Касси-Бакстера [34] (в уравнениях, описывающих характеристики процесса смачивания шероховатых поверхностей каплями жидкостей) используются коэффициенты шероховатости поверхностей. Но эти коэффициенты не учитывают возможные изменения химического состава материалов приповерхностных слоев металлов и сплавов после их обработки. В тоже время установлено [103,104], что увеличение шероховатости гидрофильных поверхностей алюминия, нержавеющей стали и стеклоуглерода улучшило водоотталкивающие свойства их поверхностей. Такой результат не вытекает из теории [34].

Обработка металлов и сплавов лазерным излучением является перспективным способом придания их поверхностям новых уникальных функциональных свойств [84,85] (супергидрофильные/супергидрофобные [105], коррозионностойкие [91,106], антиобледенительные [88]). Преимуществами применения лазерных установок являются: отсутствие требований к условиям окружающей среды, высокая скорость работы, прецизионное варьирование параметров излучения в широком диапазоне (плотность мощности лазерного излучения, длительность импульса, частота) [107]. После лазерной обработки на поверхности материала образуется текстура с элементами микро- и наноразмера [84,85,105,106]. При варьировании параметров лазерного излучения были получены текстуры в виде полос и квадратов [108], систем кратеров [109],

пчелиных сот [110], пористые анизотропные [91] и др. Обработанные поверхности металлов и сплавов проявляют аналогичные свойства [105]: после обработки гидрофильные (контактный угол $< 90^\circ$), супергидрофильные ($< 5^\circ$) или в насыщенном режиме Венцеля [111], с течением времени меняются на гидрофобные ($> 90^\circ$) или супергидрофобные (контактный угол $> 150^\circ$, гистерезис контактного угла $< 3^\circ$) вследствие адсорбции гидрофобных химических веществ из атмосферы [112] и накопления на обработанной поверхности металла или сплава неполярных углеводородных групп ($-\text{CH}_3$ и графитовый углерод) (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Свойства смачиваемости обработанных лазерным излучением материалов при контакте с водой

Источник	Материал	Контактные углы	Дополнительная обработка
[84]	полимер	$153,5 \pm 0,6^\circ$; гистерезис $12,3 \pm 1,2^\circ$	фторалкилсилан
[85]	медь	$111^\circ - 167^\circ$	нет
[105]	алюминий	150°	нет
[108]	нержавеющая сталь	$158^\circ - 171^\circ$	низкотемпературный нагрев в печи
[109]	алюминий	$100^\circ - 140^\circ$	нет
[110]	титан	натекающий: от $39,3^\circ$ до $147,4^\circ$; оттекающий: от $36,1^\circ$ до $145,8^\circ$	нет
[91]	алюминиевый сплав	$173,2^\circ$	фтороксисилан
[113]	стали	$130^\circ - 150^\circ$	нет
[112]	медь	до 160°	низкотемпературный нагрев в печи с этанолом
[83]	нержавеющая сталь	154° ; гистерезис 4°	нет
[114]	титан	до 161°	низкотемпературный нагрев в печи

[115]	алюминиевый сплав	155°	фторсилан
[82]	медь	150°	нет
[83]	нержавеющая сталь	до 156°	нет
[116]	медь	131,9°	нет
[117]	алюминий	>150°	химическое осаждение из паровой фазы
[118]	медь	158°	полидиметилсилоксан (ПДМС)

На инверсию свойств смачиваемости обработанной лазерным излучением поверхности металла или сплава влияют как ее морфология, так и химический состав приповерхностных слоев [113]. Например в [108,112], при варьировании расстояния между элементами текстуры в виде квадратов на поверхности нержавеющей стали от 100 мкм до 500 мкм [108] и на поверхности меди от 50 мкм до 100 мкм [112] контактные углы уменьшались от 175° до 161° и от 160° до 151°, соответственно. Установлено [119], что доминирующую роль играет химический состав приповерхностного слоя, а не шероховатость поверхности после лазерной обработки.

Для ускорения стабилизации влияющего на характеристики процесса смачивания химического состава поверхностного слоя обработанных лазерным излучением металлов и сплавов предложено [108] применять низкотемпературный (473 К) нагрев в печи. Необходимое на стабилизацию химического состава поверхностного слоя обработанной лазерным излучением нержавеющей стали время при этом уменьшается с 14 дней до 4 часов [108]. В более поздней работе установлено [114], что текстурированная лазерным излучением поверхность титана проявляла супергидрофобные свойства после низкотемпературного нагрева в загрязненной гидрофобным полидиметилсилоксаном (компонент термостойких смазок) печи. При этом поверхность титана проявляла супергидрофильные

свойства после его нагрева в незагрязненной печи, т.е. инверсия свойств смачиваемости не происходила [114].

Характеристики процесса испарения капель жидкостей с обработанных лазерным излучением поверхностей металлов и сплавов зависят от характеристик процесса смачивания и характеристик шероховатости [83,120]. Установлено [120], что поля скоростей течений жидкостей более неоднородны в испаряющихся каплях воды с обработанной лазерным излучением гидрофильной поверхности, чем с гидрофобной. При увеличении контактных углов от 77 градусов до 154 градусов после нанесения текстуры на поверхность нержавеющей стали авторы [83] установили, что время испарения капель воды увеличилось в 1,5 раза. Изменение гидрофильных свойств поверхности меди на гидрофобные оказывало влияние на характеристики процесса кипения [116]: увеличивало задержку начала пузырькового кипения. Но в [117] текстурирование поверхности алюминиевых подложек с последующим нанесением гидрофобизатора привело к уменьшению времени начала пузырькового кипения.

Выводы по главе 1

По результатам анализа работ, посвященных исследованиям характеристик процесса испарения капель жидкостей с поверхностями твердых тел, можно сделать следующие выводы:

1. Основными недостатками известных [39,51–58] математических моделей испарения капли жидкости с поверхности твердого тела является использование эмпирических выражений с несколькими постоянными, определяемыми по результатам экспериментальных исследований, для расчета локальных скоростей испарения.

2. Испарение капли жидкости с поверхности твердого тела – сложный процесс [20], на характеристики которого (режимы испарения, времена, скорости испарения) помимо параметров окружающей среды (температур [23,24], давлений

[25], концентраций паров испарившейся жидкости [26] и др.) влияет шероховатость поверхности подложки.

3. До настоящего времени не установлены функциональные связи между способами обработки поверхностей металлов и сплавов и характеристиками процесса испарения капель жидкостей (режимы и скорости испарения). Обработка металлов и сплавов лазерным излучением является перспективным способом придания их поверхностям новых уникальных функциональных свойств (супергидрофильные/супергидрофобные, коррозионностойкие, антиобледенительные). Полировка поверхностей подложек из металлов и сплавов применяется как для их выравнивания перед проведением экспериментов, так и для подготовки к последующей модификации одним из способов (например, лазерным излучением). Процедура оценки характеристик поверхности подложки после ее модификации включает анализы фотоизображений текстуры, химического состава материалов приповерхностных слоев и характеристик шероховатости.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ЖИДКОСТИ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Планирование экспериментальных исследований процесса испарения капель жидкостей с металлических поверхностей включало выбор жидкостей, материала и способов его обработки, диапазона температур поверхности подложки и окружающего каплю жидкости воздуха. Кроме того, для обоснования изменений характеристик процессов смачивания и испарения капель жидкостей до и после модификаций поверхностей подложек различными способами проводились анализы микроструктуры, химического состава приповерхностных слоев, шероховатости поверхностей подложек.

2.1 Изготовление подложек

Экспериментальные исследования процессов смачивания и испарения капель жидкостей проведены на подложках из алюминиево-магниевого сплава АМгб (Al 91,2; Mg 6,8; Mn 0,8; Fe 0,4; Si 0,4; Zn 0,2; Ti 0,1; Cu 0,1 масс %), плотность 2640 кг/м³. Последний является конструкционным материалом и применяется во многих отраслях промышленности (авиационной, аэрокосмической, энергетической). Алюминиевые сплавы используются в качестве материала для изготовления изделий мощной электроники вследствие их высокой электропроводности, механической прочности и эффективного рассеивания тепла [3]. Теплофизические свойства алюминиево-магниевого сплава АМгб представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Теплофизические свойства алюминиево-магниевого сплава АМгб

Коэффициент температурного (линейного) расширения, 1/Град 10 ⁶	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	Удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град)
24,7	122	922

Образцы размерами 10x15x3 мм изготавливались из листового проката АМг6 толщиной 3 мм. Перед модификацией поверхности подложек очищались изопропанолом (C_3H_8O) и водой. Для исследования влияния способа обработки на характеристики процессов смачивания и испарения капель жидкостей созданы две группы подложек. Первая группа включает подложки, поверхности которых обрабатывались лазерным излучением. Поверхности второй группы подложек обрабатывались широко используемыми в машиностроении механическими способами: шлифование, сатинирование, галтовка, полировка шлифовально-полировальными кругами и алмазными пастами. По технологии очистки поверхностей металлов и сплавов после их механической обработки от полировальных и шлифовальных материалов использовалась дистиллированная вода. Также перед проведением экспериментов подложки были дополнительно очищены в ультразвуковой ванне с изопропиловым спиртом (180 секунд) и дистиллированной водой (180 секунд) для удаления возможных загрязнений (появившихся при хранении подложек).

Для исследования влияния механической обработки поверхностей металлов и сплавов на характеристики процессов смачивания и испарения капель жидкостей подложки полировались и шлифовались следующими способами:

1) На шлифовально-полировальном станке «Grinding Polishing Machine MP1B» (LAIZHOU ZIYU MACHINERY, Китай) вращающимися шлифовальными кругами зернистостью 180P, 400P, 600P, 1200P, 2500P, 4000P (абразив – оксид алюминия). С увеличением номера шлифовального круга размер абразивных элементов уменьшался. После обработки шлифовальными кругами поверхности подложки предавался зеркальный блеск полировкой мягкими тканями с алмазной пастой АСМ 0,1/0.

2) в галтовочном центробежном станке «ОТЕС CF 50 Element» (ОТЕС, Германия) с использованием галтовочного наполнителя «ОТЕС Н1-100» из ореховой скорлупы и особо тонкой полировальной пасты ГОИ № 1. Абразивом

последней являлся оксид хрома. Во время обработки в барабане галтовочного станка происходило движение ореховой скорлупы по поверхности подложки. Паста ГОИ использовалась для придания поверхности подложки зеркального блеска.

3) Прямой шлифовальной машиной с кругом из нетканого материала, абразивом которого являлся оксид алюминия. В результате однонаправленного движения инструмента по поверхности подложки создавались параллельные канавки микрометровой глубины (сатинирование поверхности подложки).

4) Шлифовальным кругом зернистостью 1500Р (абразив – оксид алюминия) на шлифовально-полировальном станке «Grinding Polishing Machine MP1B».

Известно [97], что изъяны на поверхности твердого тела существенно влияют на процессы рассеяния света и генерации высших гармоник при отражении электромагнитной волны от поверхности металлов. Вследствие этого, перед обработкой лазерным излучением поверхности подложек из АМгб полировались на шлифовально-полировальном станке вращающимися шлифовальными кругами и мягкими тканями с алмазной пастой для уменьшения влияния шероховатости необработанного проката на создаваемые лазерными импульсами текстуры.

После полировки поверхности подложек из АМгб обрабатывались одиночными лазерными импульсами длительностью 200 нс при средней выходной мощности 20 Вт, частоте излучения 20 кГц с помощью лазерной установки «МинниМаркер 2 M20» (Laser Center, Россия). Последняя включала иттербиевый импульсный наносекундный волоконный лазер «IPG-Photonics» (ИРЭ-Полюс, Россия) с длиной волны 1064 нм и двухосевой (X, Y) гальваносканер. Установлено [121,122], что при воздействии одиночного лазерного импульса образовывался чашеобразный кратер диаметром 60 ± 5 мкм и глубиной 6 ± 2 мкм с кромкой высотой 2 ± 0.5 мм (рисунок 2.1).

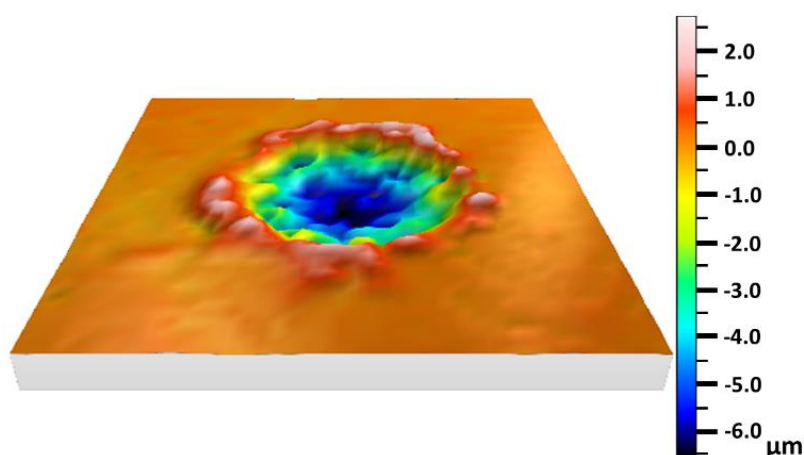


Рисунок 2.1 – Трехмерное изображение поверхности алюминиево-магниевого сплава с образованным лазерным импульсом кратером, полученные с использованием профилометрического комплекса «Micro Measure 3D station» (STIL, Франция) [122]

Лазерный импульс соответствовал Гауссовому профилю $M^2 < 2$ и фокусировался в пятно диаметром 40 мкм. При обработке поверхностей подложек варьировались скорости перемещения луча, мм/с (4000, 1320 и 1000) и количество штрихов на миллиметр, 1/мм (5, 15 и 20).

Известно [105], что после обработки поверхностей металлов и сплавов гидрофильные (контактный угол $< 90^\circ$) или супергидрофильные ($< 5^\circ$) свойства с течением времени меняются на гидрофобные ($> 90^\circ$) или супергидрофобные (контактный угол $> 150^\circ$, гистерезис контактного угла $< 3^\circ$). Для стабилизации свойств смачиваемости после лазерной обработки подложки выдерживались в течении 6 месяцев в воздушной среде. Перед проведением экспериментов, как и в [108], подложки нагревались в течении 6 часов при 100°C . При низкотемпературном нагреве интенсифицировался процесс адсорбции из окружающего воздуха гидрофобных органических веществ в приповерхностные слои подложек.

При обработке поверхностей металлов и сплавов как механическими, так и немеханическими способами возможны изменения их поверхностных свойств

вследствие воздействия полировальных смесей, нагрева или плавления материалов приповерхностных слоев трением, лазерным излучением и др. Для обоснования изменений характеристик процессов смачивания и испарения капель жидкостей после модификации поверхностей сплава АМгб обработкой механическими способами и лазерным излучением получены фотоизображения микроструктуры и определены характеристики шероховатости поверхностей, химического состава материалов приповерхностных слоев и свободной поверхностной энергии.

Для получения фотоизображений микроструктуры, текстурированных лазерным излучением, полированных и шлифованных поверхностей АМгб использован сканирующий электронный микроскоп «Hitachi TM 3000» (Hitachi, Япония). Химический состав материалов приповерхностных слоев подложек получен с помощью JEOL JSM-7500FA (JEOL, Japan) сканирующего электронного микроскопа, оборудованного системой JED 2300 EDS. Инструментальная погрешность прибора не превышала 5%.

Шероховатость поверхностей подложек характеризовалась зарегистрированным с помощью контактного профилометра «НОММЕЛ-ЕТАМИС Т1000» (НОММЕЛ-ЕТАМИС GmbH, Германия) средним арифметическим отклонением профиля поверхности (R_a , мкм) (среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля от средней линии в пределах базовой длины) и высотой неровностей профиля (R_z , мкм) (сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин). Инструментальная погрешность профилометра не превышала 5%.

Во время работы контактного профилометра «НОММЕЛ-ЕТАМИС Т1000» алмазный щуп перемещался по поверхности подложки в пределах базовой линии. Для измерения шероховатости выбраны три произвольных направления движения щупа профилометра по поверхности подложки. При анализе профиля каждой подложки длина базовой линии определялась согласно ISO 4288:1996: 4 мм для необработанных, шлифованных, сатинированных и текстурированных лазерным

излучением подложек; 1,25 мм для полированных галтовкой и шлифовально-полировальными кругами с алмазной пастой. При движении щупа профилометра по шероховатой поверхности возникали его механические колебания, которые преобразовывались в электрический сигнал.

2.2 Используемые для проведения экспериментов жидкости

При проведении экспериментов по исследованию процессов смачивания и испарения капель жидкостей с поверхностей подложек использовалась деионизированная вода (далее по тексту – вода). В отличие от дистиллированной, помимо очистки от органических веществ, примесей и минеральных солей вода была очищена и от ионов с помощью прибора «Milli-Q» (Merck Millipore, США).

Для анализа влияния различных способов обработки поверхностей АМГб на морфологию твердых осадков коллоидные растворы монодисперсных частиц полистирола с –COOH функциональной группой в поверхностном слое с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм приготавливались из 10 % коллоидных растворов («НЦ Ленхром», Россия) разбавлением водой. Объемные концентрации получившихся коллоидных растворов составили 0,025 %, 0,05 %, 0,1 %, 0,3 %, 0,5 %, 0,7 % и 1,0 %.

2.3 Экспериментальная установка и методики исследований процесса испарения капель воды с поверхностей алюминиево-магниевого сплава

Эксперименты по исследованию процессов смачивания и испарения капель жидкостей проведены на установке «DSA100E» (Kruss, Германия), схема которой представлена на рисунке 2.2.

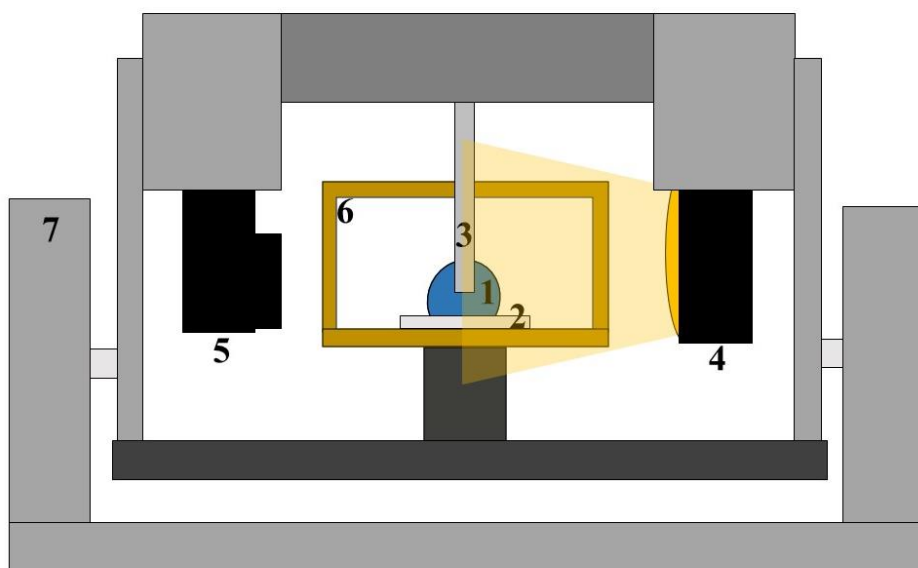


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки «DSA100E»: 1 – капля жидкости; 2 – подложка из АМГб; 3 – игла дозирующего устройства; 4 – источник света; 5 – видеокамера; 6 – экспериментальная камера «ТС40»; 7 – механизм для выравнивания установки относительно горизонтальной оси [122]

Для анализа формы капли применена теневая методика [121]. Капли воды и коллоидных растворов (1) объемами 5 мкл выдавливались на поверхности подложек (2) через иглу (3) 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 (4) и видеокамеры (5) (рисунок 2.2). Последние обрабатывались в программном комплексе «Advance» (Kruss, Германия) в два этапа. На первом этапе на фотоизображении лежащей на поверхности подложки капли выделялся ее контур и базовая линия (линия на границе раздела «жидкость – твердое тело») (рисунок 2.3).

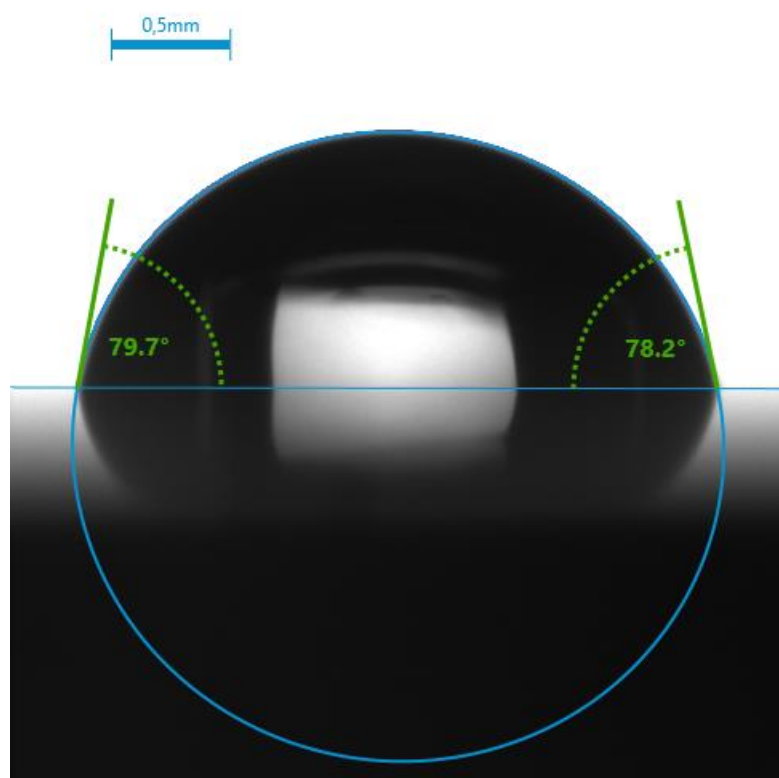


Рисунок 2.3 – фотоизображение капли воды на поверхности твердого тела в программном комплексе «Advance»

На втором этапе контур капли описывался методами: конического сечения (Tangent method 1), круга (Circle method), полиномиального (Tangent method 2) и Юнга-Лапласа (Young-Laplace method). Для определения геометрических характеристик осесимметричных капель воды на модифицированных различными способами поверхностях подложек использован метод Юнга-Лапласа. Систематические погрешности метода не превышали 5%. Гистерезис контактных углов определен как разность наступающих и отступающих контактных углов. Динамические контактные углы определены при притоке (наступающий контактный угол) и оттоке (отступающий контактный угол) воды объемом 2 мкл на установке «DSA100E». Относительная погрешность определения динамических углов не превышала 7 %.

Эксперименты с каплями воды проводились в камере «TC40» (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 (таблица 2.2). При температуре выше 343 К в капле зарегистрировали процесс образования пузырьков пара (рисунок 2.4). Сделан вывод, что этот процесс приводил к увеличению ее объема и контактного угла на теневых фотоизображениях. В этом случае, теневая методика не может быть применима для определения размеров капель.

Таблица 2.2 – Рабочие температуры поверхностей типичного энергонасыщенного технического и технологического оборудования

Источник	Оборудование	Температуры поверхностей, К
[123]	Процессоры Xenon и Core i7	358 и 341, соответственно (при максимальной расчетной тепловой мощности 130 Вт)
[3]	Микрочип	398
[4]	Лазерный диод	333
[4]	Микроконтроллер	373
[124]	Аккумуляторные батареи	318

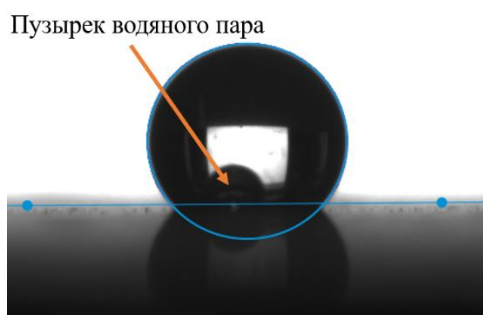


Рисунок 2.4 – типичное фотоизображение капли воды на нагретой до 363 К поверхности подложки

Перед проведением экспериментов температура и относительная влажность воздуха в помещении лаборатории и в экспериментальной камере измерялись с помощью термо-гигрометра «Venetech GM1361» (Китай) и составляли 293 ± 1 К и

30±10 %, что соответствует массовой концентрации пара $0,05\pm 0,02$ кг/м³. В условиях нагрева термостатируемой камеры температуры ее внутренних поверхностей были выше температуры точки росы, соответственно, уменьшение концентрации водяного пара в воздухе камеры вследствие его конденсации не происходило. Увеличение массовой концентрации водяных паров в камере из-за их поступления в результате испарения капли не оказывало существенного влияния на характеристики процесса парообразования т.к. ее объем (5 мкл) был много меньше объема камеры 0,858 л. Также, в верхней части термостатируемой камеры было просверлено отверстие диаметром 1 мм для введения иглы дозирующего устройства. После каждого одиночного эксперимента термостатируемая камера открывалась для удаления избыточных водяных паров.

Эксперименты с каплями воды с частицами проводились на установке, в основе работы которой лежит теневая методика (рисунок 2.5).

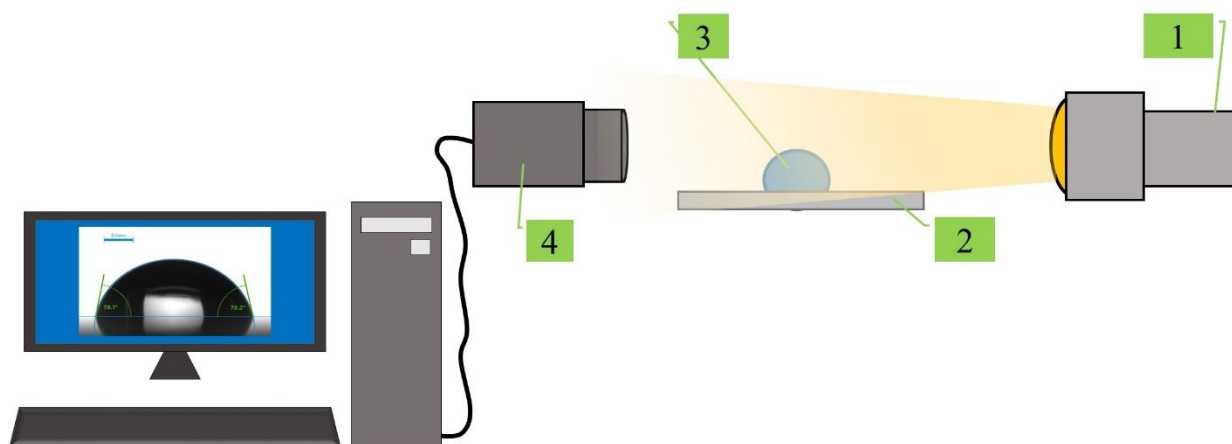


Рисунок 2.5 – Схема экспериментальной установки: 1 – источник направленного света; 2 – подложка из алюминий-магниевого сплава; 3 – капля коллоидного раствора; 4 – видеокамера

Источник света (1) освещал лежащую на поверхности подложки (2) каплю коллоидного раствора (3). Ее теневое изображение регистрировалось видеокамерой FastVideo 500M (FastVideo, Россия) (4). Уровень серого и размер кадра изменялись

в программе XnView (XnSoft, Франция). Геометрические характеристики капель (объем, контактный угол (θ , °), контактный диаметр (D , мм)) определены по их теневым фотоизображениям в программе DropShapeAnalyses (Kruss, Германия) методом Юнга-Лапласа.

Капли воды с частицами испарялись с поверхностей подложек в прозрачном боксе из оргстекла (не показан на рисунке 2.5). После выпаривания из капли растворителя в результате «самосборки» на поверхности подложки формировался слой частиц. Фотоизображения образованных слоев были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа «Hitachi TM 3000» (Hitachi, Япония) с высокочувствительным полупроводниковым детектором обратно рассеянных электронов (BSE) с ускоряющим напряжением 15 кВ.

Выводы по главе 2

1. В результате планирования и подготовки к экспериментальным исследованиям процесса испарения капель воды с шероховатых нагретых поверхностей изготовлены экспериментальные подложки.

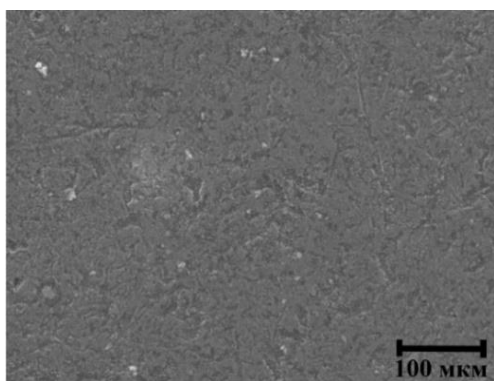
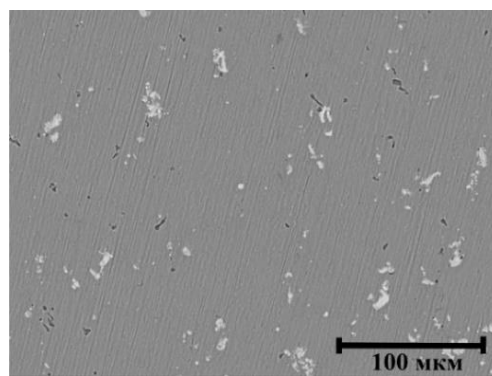
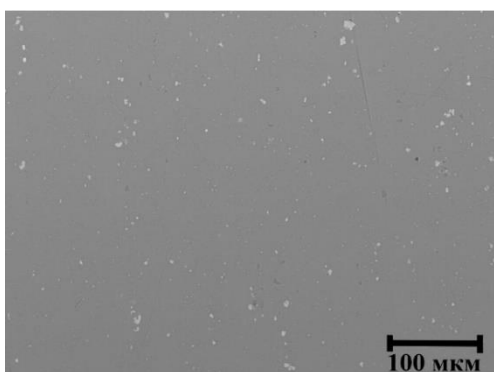
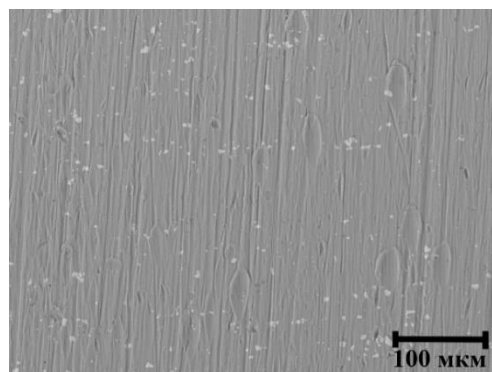
2. На основании анализа температурного режима типичных электронных устройств во время их работы выбраны температуры (323-343 К) нагрева подложки.

3. Для установления характеристик процесса испарения (скорости и режимы испарения) капель воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек применена теневая методика, реализованная в установке «DSA100E».

4. Для исследования процесса испарения капель воды с частицами с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек выбраны полистирольные частицы с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм.

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ШЕРОХОВАТЫХ НАГРЕТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДЛОЖЕК

В данной Главе представлены результаты экспериментального исследования процесса испарения капли воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей алюминиевого сплава. Установлены режимы испарения испарения капле воды и скорости испарения. С целью анализа характерных температур в массиве испаряющейся капли проведено численное моделирование процесса теплопереноса в капле и диффузии паров вблизи ее поверхности. Для определения в экспериментах характеристик процесса испарения капле воды с модифицированных поверхностей алюминиево-магниевого сплава использованы восемь обработанных различными методами подложек (рисунок 3.1).

*a**б**в**г*

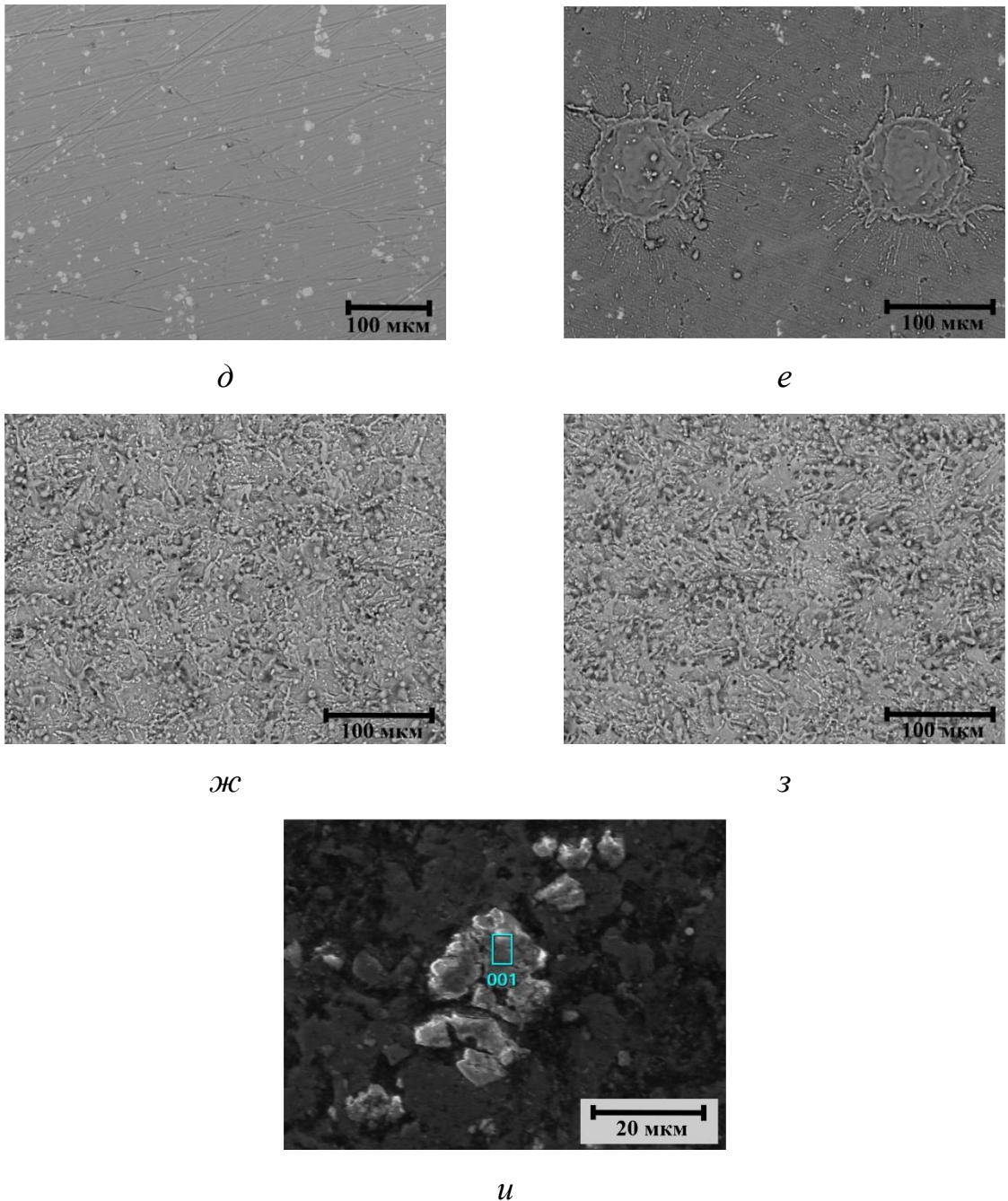


Рисунок 3.1 – Фотоизображения микроструктуры поверхностей подложек, полученных с помощью электронного сканирующего микроскопа: *а* – необработанная, *б* – полированная шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой, *в* – галтованная, *г* – сатинированная, *д* – шлифованная, *е-з* – обработанные лазерными импульсами с шагом 200 мкм, 66 мкм и 50 мкм, соответственно, *и* – включение

Установлено (рисунок 3.1), что после полировки подложки шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой на ее поверхности формировались разнонаправленные канавки. Во время полировки подложки в барабане галтовочного станка происходило движение ореховой скорлупы по ее поверхности. После полировки особо тонкой пастой ГОИ №1 поверхности придавался зеркальный блеск. Установлено, что при таком способе обработки в отличие от полировки шлифовально-полировальными дисками и алмазными пастами на поверхности алюминиево-магниевого сплава отсутствовали разнонаправленные канавки. После направленной шлифовки подложки (сатинирования) на ее поверхности формировалась текстура в виде параллельных канавок. Шлифовка подложки шлифовальным кругом привела к формированию текстуры в виде разнонаправленных канавок. После обработки поверхности подложки лазерным излучением с использованием наносекундного импульсного лазера «IPG-Photonics» со скоростью перемещения луча 4000 мм/с и количеством штрихов на миллиметр 5 1/мм формировалась состоящая из кратеров текстура. После обработки подложек лазерным излучением со скоростью перемещения луча 1320 мм/с и 1000 мм/с и количеством штрихов на миллиметр 15 1/мм и 20 1/мм формировались текстуры с наложением кратеров.

После модификации поверхностей подложек описанными выше способами проведен анализ влияющих на процессы испарения капель жидкостей свойств смачиваемости (таблица 3.1), характеристик шероховатости (таблица 3.1) и химического состава приповерхностного слоя (таблица 3.2) [122,125].

Таблица 3.1 – Среднее арифметическое отклонение профиля поверхностей подложек, геометрические характеристики капель воды на поверхностях подложек

№	Способ обработки	Ra , мкм	θ , °	Гистерезис, °	D , мм
1	Необработанный	0,20±0,01	66±3,3	54±3,8	3,25±0,2
2	Шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой	0,06±0,003	76±3,8	31±2,1	3,00±0,1
3	Галтовка	0,02±0,001	82±4,1	25±1,8	2,75±0,1
4	Сатинирование	0,34±0,02	87±4,3	50±3,5	2,71±0,1
5	Шлифовка	0,36±0,02	80±4,0	53±3,7	2,91±0,1
6	Лазерными импульсами с шагом 200 мкм	0,69±0,03	87±4,3	56±4	2,92±0,1
7	Лазерными импульсами с шагом 66 мкм	1,73±0,09	145±7,2	2±0,1	1,20±0,06
8	Лазерными импульсами с шагом 50 мкм	>1,75	147±7,3	4±0,3	1,08±0,05

Установлено (таблица 3.1) [122,125], что обработка поверхностей подложек указанными выше способами привела к изменению свойств смачиваемости. После сатинирования необработанной подложки из алюминиево-магниевого сплава контактный угол увеличивался от 66° (гистерезис контактного угла 54°) до 87° (гистерезис контактного угла 50°). В результате полировки с поверхности сплава был удален образовавшийся при межоперационном хранении микрометровый слой гидрофильных химических соединений. Удаление неоднородно распределенного по поверхности гидрофильного слоя привело к уменьшению разницы между наступающим и отступающим контактными углами (гистерезиса контактного угла).

После воздействия на поверхность подложки лазерным излучением с шагом между лазерными импульсами 50 мкм и выдерживания в течении длительного времени в воздушной среде (более 6 месяцев) контактный угол увеличился от 66° до 147° (гистерезис контактного угла 4°). Поверхность стала гидрофобной. Стоит отметить, что гидрофобные свойства обработанных лазерным излучением поверхностей улучшались при уменьшении расстояния между центрами кратеров от 200 мкм до 50 мкм (увеличивалось количество импульсов на единицу площади – от 36 импульсов на мм² до 441 импульсов на мм²). На рисунке 3.2 представлены

квазистатические и динамические контактные углы капель воды на обработанных лазерным излучением гидрофильной и гидрофобных поверхностях подложек.

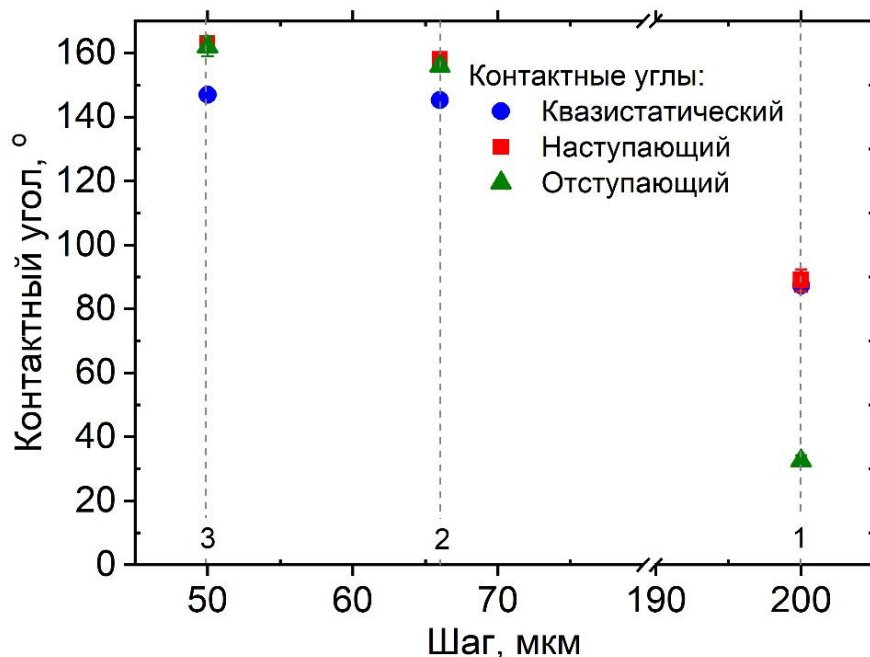


Рисунок 3.2 – Зависимости контактных углов капель воды на обработанных лазерным излучением поверхностях подложек от шага между лазерными импульсами: 1 – обработанная лазерным излучением с шагом 200 мкм, 1 – обработанная лазерным излучением с шагом 66 мкм, 1 – обработанная лазерным излучением с шагом 50 мкм

Установлено (рисунок 3.2) [122], что квазистатические контактные углы капель воды на гидрофильной поверхности алюминиево-магниевого сплава расположены между соответствующими наступающими и отступающими контактными углами. Но для обработанных лазерным излучением гидрофобных подложек квазистатический контактный угол меньше и наступающего и отступающего контактных углов. Последнее объясняется тем, что при измерении динамических контактных углов на обработанных лазерным излучением

гидрофобных поверхностях капля воды скользила по выступам и по «воздушным подушкам» (оставшемуся в кратерах и кавернах воздуху) (рисунок 3.3).

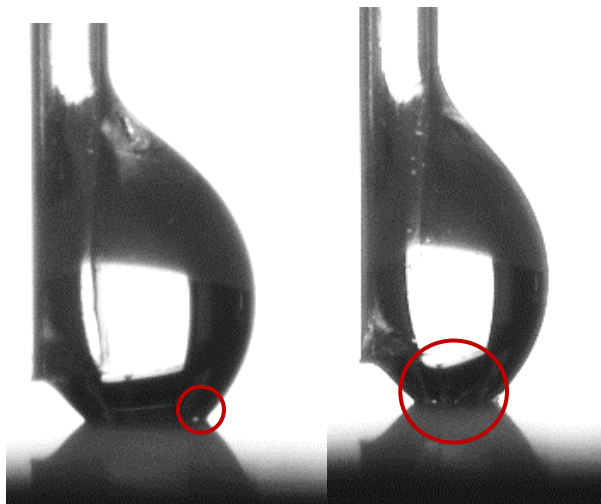


Рисунок 3.3 – Типичные фотоизображения капли при определении отступающих контактных углов с выделенными кругом «воздушными подушками»

При измерении квазистатического контактного угла жидкость заполняла каверны вследствие высокой скорости дозирования и разрушения воздушных подушек при длительном контакте с водой (более 5-10 секунд). В результате контактный угол уменьшался до некоторого постоянного значения. В случае подложек с гидрофобной поверхностью при кратковременном контакте (менее 5 секунд) капли коллоидных растворов скатывались с обработанной лазерным излучением поверхности подложки или оставались на наконечнике дозирующего устройства – поверхность характеризовалась супергидрофобными свойствами. Установлено [122,125], что изменение свойств смачиваемости сплава после шлифовки, полировки или обработки лазерным излучением связано с изменениями как рельефа поверхности, так и химического состава приповерхностного слоя.

Химический состав приповерхностного слоя необработанного проката зависел от условий его транспортировки и хранения (таблица 3.2). После очистки

в ультразвуковой ванне доли кислорода и кремния составили 27,8% и 7,4%, соответственно.

Таблица 3.2 – Химический состав приповерхностных слоев модифицированных поверхностей подложек из алюминиево-магниевого сплава

№	Способ обработки	Химический состав приповерхностного слоя масс%				
		Al	Mg	O	Si	Mn
1	Необработанный	64,4	0,4	27,8	7,4	-
2	Шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой	91,6	4,1	3,8	0,5	-
3	Галтовка	96,3	3,1	0,6	-	-
4	Сатинирование	93,0	3,9	2,8	-	0,3
5	Шлифовка	94,1	4,8	0,6	-	0,5
6	Лазерными импульсами с шагом 200 мкм	83,1	5,4	10,8	0,6	-
7	Лазерными импульсами с шагом 66 мкм	60,6	5,5	33,4	0,5	-
8	Лазерными импульсами с шагом 50 мкм	61,6	4,9	33,0	0,5	-

После обработки подложек указанными выше способами содержание кремния в приповерхностном слое было уменьшено с 7,4% (необработанный прокат) до 0%. Полировка и шлифовка подложек абразивами привела к снижению содержания кислорода в приповерхностных слоях с 27,8% до 3,8% 2,8% 0,6% и 0,6 % (полированный абразивными дисками и алмазными пастами, сатинированный, полированный галтовкой и пастой ГОИ, шлифованный абразивными дисками, соответственно). Обработка поверхности лазерным излучением, напротив, привела к увеличению содержания кислорода от 27,8% (необработанный прокат) до 10,8%, 33,4% и 33,0% (обработанный лазерным излучением с шагом между импульсами 200 мкм, 66 мкм и 50 мкм, соответственно). Но свойства смачиваемости поверхности необработанного проката и обработанных лазерным излучением поверхностей подложек значительно различаются (таблица 3.1). Сделан вывод об отсутствии явной связи между свойствами смачиваемости и содержанием в приповерхностных слоях кислорода. Анализируя результаты химического анализа установлено [125], что светлые включения на фотоизображениях микроструктуры

поверхностей подложек (рисунок 3.1) представляли собой оставшиеся после механической обработки металла частицы алюминия (Al – 45,6 масс%, O – 53,9 масс% и Si – 0,5 масс%).

Установлено (таблица 3.1) [122,125], что обработка поверхности металла как механическими способами, так и лазерным излучением с различными параметрами лазера привела к изменению характеристик шероховатости следующим образом. Среднее арифметическое отклонение профиля (Ra) уменьшилось от 0,20 мкм (необработанный прокат) до 0,02 мкм (галтованный). Среднее арифметическое отклонение профиля (Ra) поверхностей подложек, обработанных лазерным излучением с энергией выше порога абляции, увеличилось от 0,20 мкм до 1,45 мкм за счет формирования на поверхности состоящей из кратеров текстуры. Текстура обработанной лазерным излучением подложки с наложением лазерных импульсов (шаг между импульсами лазера 50 мкм) представляла собой пористый слой металла. Характеристики шероховатости такой поверхности не могут быть определены контактным профилометром с удовлетворительной точностью.

3.1 Режимы испарения капель воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек

После обработки подложек из алюминиево-магниевого сплава описанными выше способами на их поверхностях оставались царапины, кратеры, частицы абразивов и др., которые являются потенциальными энергетическими барьерами при движении контактной линии испаряющихся капель жидкостей. Потенциальные энергетические барьеры на поверхностях подложек влияют на режимы испарения капель воды и их длительности. В данном разделе исследовано влияние финишной обработки поверхности алюминиево-магниевого сплава (полировка, шлифовка, обработка лазерным излучением) на режимы испарения капель воды. После выдавливания на поверхности всех подложек капли принимали форму шаровых сегментов, т.к. силы поверхностного натяжения жидкости

преобладали над силами гравитации. Последнее подтверждалось характеризующими отношением сил гравитации и поверхностного натяжения жидкости ($\sigma_{ЖГ}$, мН/м) числами Бонда (Bo) < 1 [28,126]:

$$Bo = (\Delta\rho \cdot R^2 \cdot g) / \sigma_{ЖГ}, \quad (3.4)$$

где $\Delta\rho$ – разница плотностей воды и воздуха, м³/кг; R – контактный радиус капли, м; g – ускорение свободного падения м²/с.

Зависимости контактных углов капель воды от времени (рисунок 3.4) представлены в безразмерном виде с целью дальнейшего масштабирования результатов экспериментов, т.к. на характеристики процесса испарения капель жидкостей влияет множество факторов (температура, концентрация водяных паров и т.д.) [20]. Зависимости контактных диаметров от времени испарения не представлены, т.к. большую часть времени капли воды испарялись с постоянным контактным диаметром (рисунок 3.5 и 3.6). Начальные геометрические характеристики капель воды (контактные углы и контактные диаметры) на поверхностях подложек представлены в таблице 3.1.

Известно [127,128], что с увеличением температуры жидкости контактный угол лежащей на поверхности капли линейно уменьшается вследствие снижения ее поверхностного натяжения ($\sigma_{ЖГ}$, мН/м). По результатам анализа контактных углов и контактных диаметров испаряющихся капель жидкостей установлено, что, нагрев подложки до исследуемых температур (293 К, 313 К, 323 К и 333 К и 343 К) не влияет на начальные геометрические характеристики капель воды [129], т.к. в проведенных экспериментах температура воды во время дозирования на поверхности подложек равнялась температуре воздуха в помещении лаборатории (293±1 К). После уравнивания действующих на каплю сил наступал пиннинг ее контактной линии. Выделены режимы испарения. При испарении капель воды с полированной шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой 2,

сатинированной 3, шлифованной 4 поверхностей подложек (рисунки 3.4, 3.5 и 3.6) выделены два режима испарения: постоянного контактного диаметра [130] (контактная линия капли неподвижна, контактный угол уменьшается) и смешанный [130] (контактный диаметр и контактный угол уменьшаются) [125].

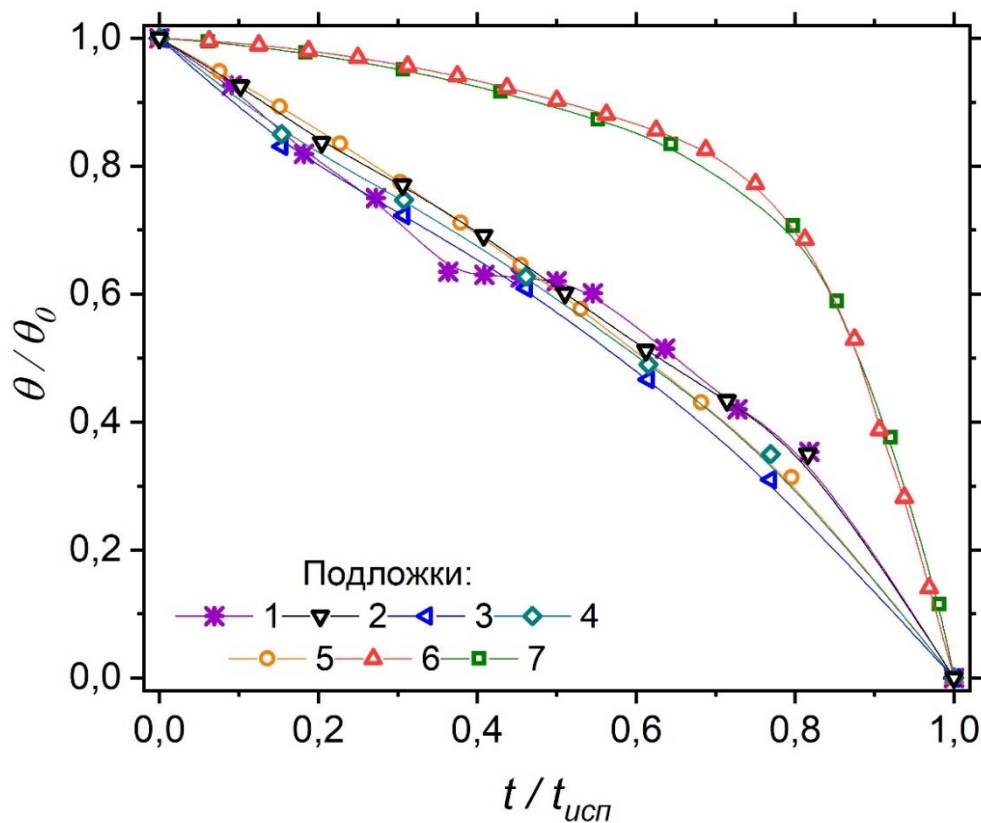


Рисунок 3.4 – Зависимости геометрических характеристик капель воды от времени их испарения с поверхностями подложек: 1 – галтованная, 2 – полированная шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой, 3 – сатинированная, 4 – шлифованная, 5-7 обработанные лазерными импульсами с шагом 200 мкм, 66 мкм и 50 мкм, соответственно

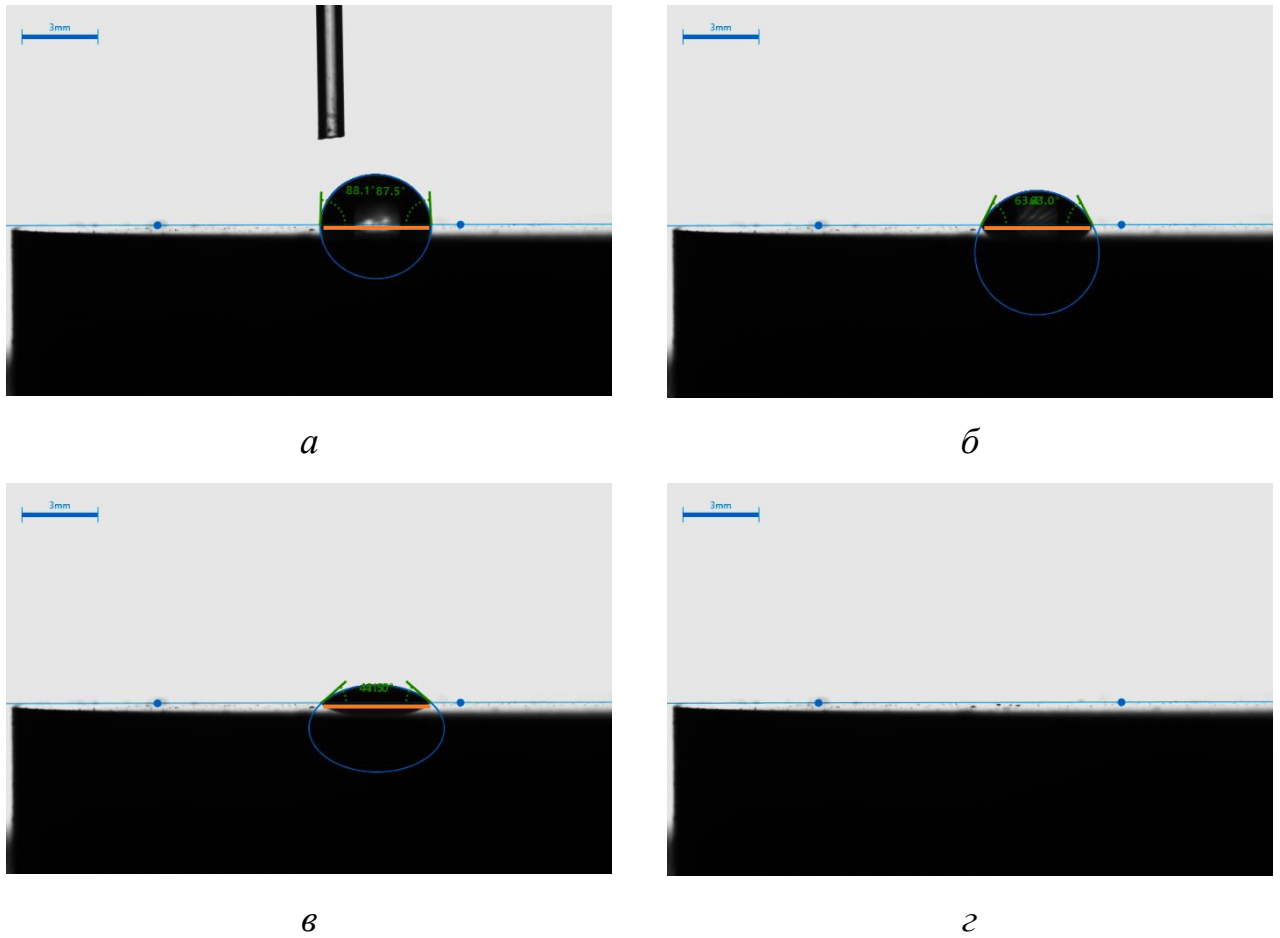


Рисунок 3.5 – Типичные фотоизображения испаряющихся капель воды с обработанной лазерными импульсами с шагом 200 мкм гидрофильной поверхности подложки: *a* – $\tau=0$ с; *б* – $\tau=900$ с; *в* – $\tau=1800$ с; *г* – $\tau=2700$ с

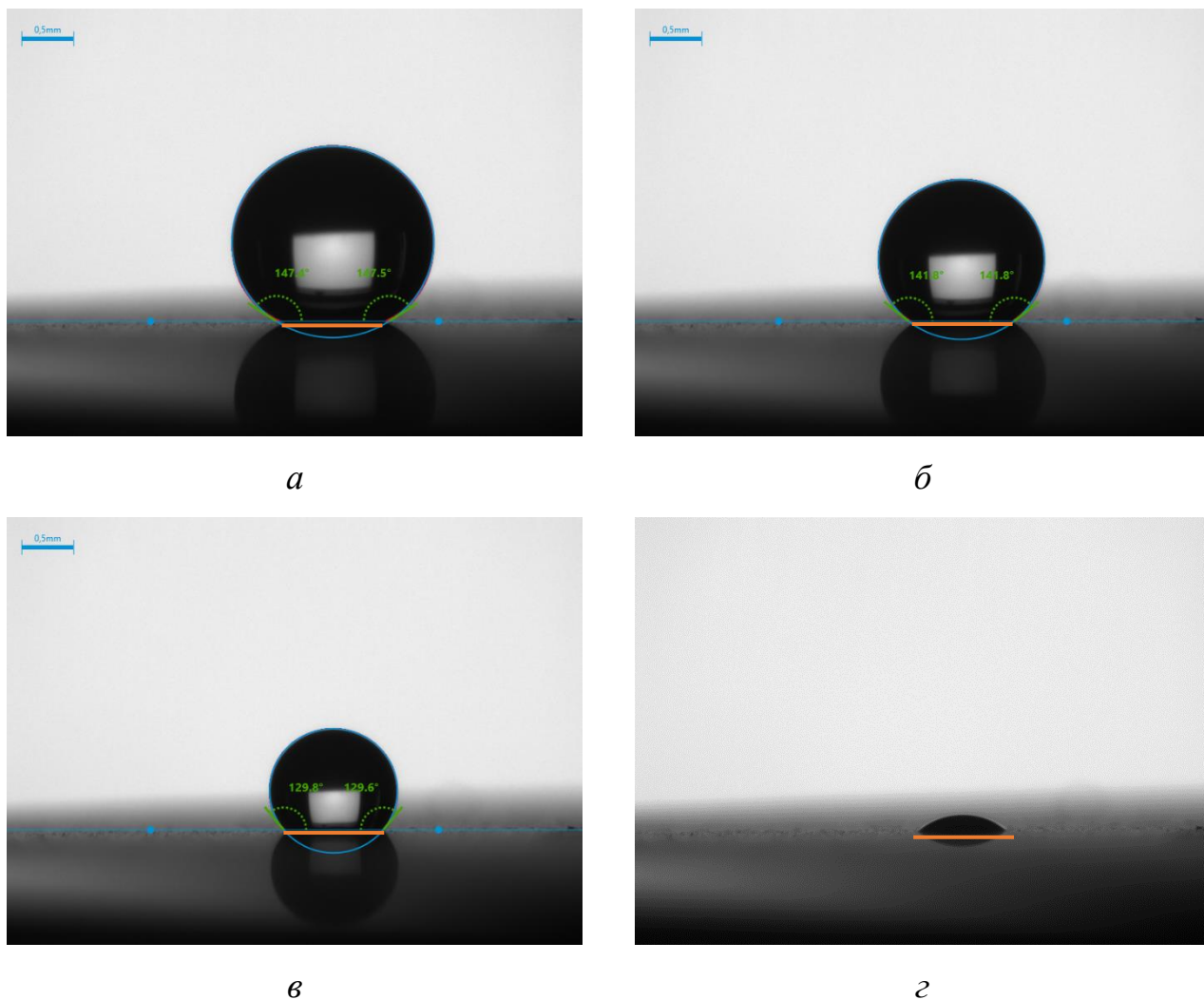


Рисунок 3.6 – Типичные фотоизображения испаряющихся капель воды с обработанной лазерными импульсами с шагом 50 мкм гидрофобной поверхности подложки: *a* – $\tau=0$ с; *б* – $\tau=900$ с; *в* – $\tau=1800$ с; *г* – $\tau=2700$ с

После дозирования капли воды на поверхности указанных выше подложек пиннинг контактной линии регистрировался в течение более 90% времени испарения капли (таблица 3.3). После наступления смешанного режима контактный угол начинал уменьшаться (отступающий контактный угол составил $<10^\circ$).

Таблица 3.3 – 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

Движению контактной линии препятствовали потенциальные энергетические барьеры. Анализируя фотоизображения поверхностей подложек (рисунок 3.1) можно сделать вывод, что длительный пиннинг обусловлен канавками, царапинами, изъянами и включениями абразивных материалов площадью до 200 мкм² (на рисунке 3.1 белое пятно) на поверхностях подложек. Уменьшение шероховатости поверхности подложки после их полировки шлифовально-полировальными кругами и алмазными пастами от Ra 0,20 мкм до 0,060 мкм (таблица 3.1) не привело к существенному снижению времени пиннинга контактной линии капли воды.

В отличие от полированной шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой 2, сатинированной 3, шлифованной 4 поверхностей подложек на обработанной галтовкой 1 поверхности выделены три режима испарения капель воды (рисунки 3.4 и 3.7): постоянного контактного диаметра (контактная линия капли неподвижна, контактный угол уменьшается); постоянного контактного угла

[130] (контактный диаметр уменьшается) и смешанный (контактный диаметр и контактный угол уменьшаются) [125].

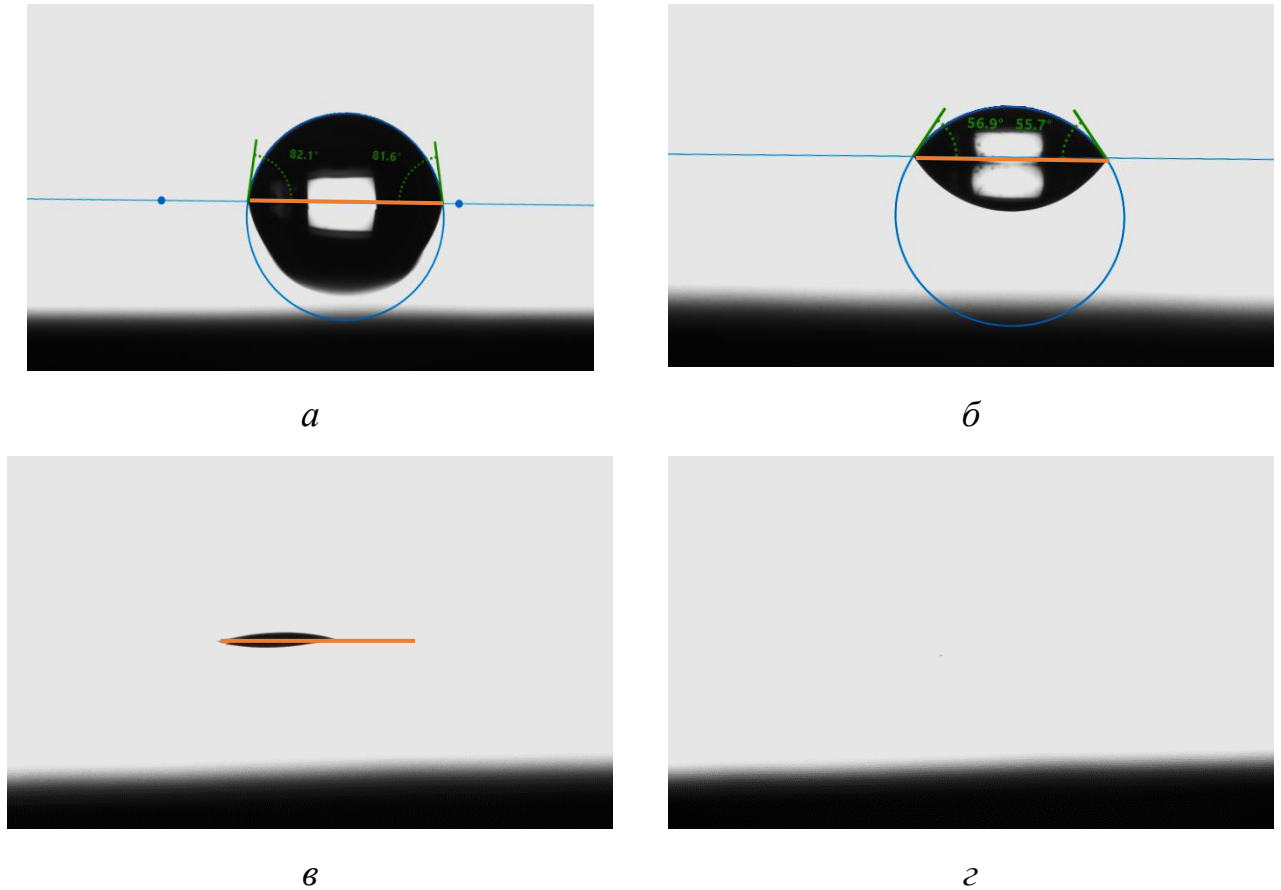


Рисунок 3.7 – Типичные фотоизображения испаряющихся капель воды с обработанной галтовкой поверхности подложки: *a* – $\tau=0$ с; *б* – $\tau=900$ с; *в* – $\tau=1800$ с; *г* – $\tau=2700$ с

Известно [125], что при испарении капли жидкости с поверхности твердого тела в режиме с постоянным контактным диаметром в области контактной линии накапливается потенциальная энергия. При достижении достаточной для преодоления потенциальных энергетических барьеров энергии наступает режим с постоянным контактным углом. Но при увеличении шероховатости поверхности твердого тела может происходить переход из режима с постоянным контактным

диаметром сразу в смешанный режим испарения. Установлено (рисунок 3.1), что в отличие от полировки шлифовально-полировальными дисками при обработке поверхности подложки в барабане галтовочного станка на поверхности алюминиево-магниевого сплава отсутствовали разнонаправленные канавки. Поверхность характеризовалась Ra равным 0,02 мкм (таблица 3.1). Можно сделать вывод, что последнее являлось условием для перехода из режима с постоянным контактным диаметром в режим с постоянным контактным углом. Химический состав приповерхностных слоев и его однородность не оказывали существенного влияния на режимы испарения капель воды, т.к. ранее установлено [131], что доминирующую роль в процессе испарения микролитровых капель жидкости играет шероховатость поверхности.

После наступления смешанного режима контактный угол начинает уменьшаться (отступающий контактный угол составлял $52 \pm 1^\circ$). Разница между начальным и отступающим контактными углами (гистерезис угла) составила 30° .

Можно сделать вывод, что при использовании алюминиево-магниевого сплава в качестве материала технических устройств исследованные способы финишной обработки поверхностей должны быть выбраны исходя из поставленных задач. Полировка шлифовальными кругами и алмазными пастами, шлифовка или сатинирование могут применяться в случае, если необходимо контролировать расположение капель жидкостей на рабочих поверхностях и не допускать появления сухих участков вследствие отступления контактной линии капли, т.е. при испарении в режиме с постоянным контактным диаметром. Для прецизионного контроля шероховатости поверхности и химического состава материала приповерхностного слоя предпочтительнее обработка подложек в галтовочных станках.

Исследовано влияние лазерной обработки поверхностей подложек из алюминиево-магниевого сплава на режимы испарения капель воды. По результатам проведенных экспериментов (рисунки 3.4, 3.5 и 3.6) выделены два

режима испарения: постоянного контактного диаметра (контактная линия капли неподвижна, контактный угол уменьшается) и смешанный (контактный диаметр и контактный угол уменьшаются) [122].

Уменьшение расстояния между лазерными импульсами во время нанесения текстуры от 200 мкм до 50 мкм привело к увеличению доли времени регистрирования пиннинга контактной линии от общего времени испарения капли от 93% до 99%. Последнее связано с увеличением адгезии между каплей воды и текстурированной поверхностью подложки вследствие заполнения каверн жидкостью. В условиях проведенных экспериментов характерный для гидрофобных шероховатых поверхностей «sticks-and-slips» режим не зарегистрирован вследствие высокой адгезии при длительном контакте воды с обработанными лазерным излучением гидрофобными поверхностями подложек и заполнения каверн жидкостью.

3.2 Скорость испарения капель воды с относительно гладких и шероховатых поверхностей подложек

Особый интерес вызывает совершенствование финишной обработки поверхностей металлов и сплавов с целью управления процессами испарения капель жидкостей с нагретых поверхностей промышленного оборудования, систем охлаждения и др. В связи с этим скорости испарения одиночных капель воды (dm/dt , кг/с) с необработанной, полированной шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой и обработанных лазерным излучением поверхностей алюминиево-магниевого сплава определены при перепаде температур в экспериментальной камере. Средняя температура воздуха в камере (T_a) составляла 310,5 К, 318 К, 326,5 К и 334 К при температурах поверхностей используемых подложек (T_s) 313 К, 323 К, 333 К и 343 К, соответственно.

С целью определения доминирующего механизма испарения капель жидкостей в условиях проведенных экспериментов определены характерные

времена диффузии (3.5) и конвекции (3.6) при испарении каплей воды с поверхностей подложек (таблица 3.4):

$$\tau_d = \frac{l^2}{D}, \quad (3.5)$$

$$\tau_c = \frac{l}{u}, \quad (3.6)$$

где l – характерный размер, м; D – коэффициент диффузии молекул воды в окружающий каплю воздух, м²/с; u – скорость оттока водяного пара, м/с:

$$u = \frac{We}{\rho_{II}}, \quad (3.7)$$

где We – средняя скорость испарения капли воды, кг/м²·с; ρ_{II} – плотность пара, кг/м³.

В проведенных экспериментах в качестве характерного размера каплей воды выбрана высота, т.к. ранее установлено [122,125], что капли воды испаряются в режиме с постоянным контактным диаметром более 93% времени испарения. Характерные времена рассчитаны для двух предельных случаев: максимальная высота лежащей на подложке капли воды (обработанная лазерным излучением поверхность подложки с шагом между лазерными импульсами 50 мкм) и минимальная высота капли (необработанный прокат) при температуре поверхности подложки 343 К (таблица 3.4). Коэффициент диффузии водяного пара в воздух камеры при температуре 343 К был равен $3,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с, плотность воздуха 1,029 кг/м³ [132]. Для определения характерных времен конвекции средняя скорость испарения каплей воды рассчитывалась как [44]:

$$We = \frac{m}{t \cdot \bar{S}}, \quad (3.8)$$

где m – масса испарившейся жидкости, кг; t – время испарения, с; \bar{S} – средняя площадь свободной поверхности капли, м² [133]:

$$\bar{S} = \frac{2\pi R^2}{(1 + \cos \theta)}. \quad (3.9)$$

Таблица 3.4 – Характерные времена диффузии и конвекции капель воды с нагретых до 343 К поверхностей подложек

№	Способ обработки	l , мм	Времена диффузии, с	Времена конвекции, с
1	Необработанный	1,16	0,039	0,131
2	Шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой	1,21	0,043	0,131
3	Галтовка	1,25	0,046	0,135
4	Сатинирование	1,30	0,050	0,139
5	Шлифовка	1,23	0,045	0,133
6	Лазерными импульсами с шагом 200 мкм	1,30	0,050	0,139
7	Лазерными импульсами с шагом 66 мкм	3,37	0,335	0,415
8	Лазерными импульсами с шагом 50 мкм	3,59	0,380	1,053

Анализируя характерные времена диффузии и конвекции при испарении капель воды с нагретых до 343 К поверхностей подложек (таблица 3.4) установлено, что в условиях проведенных экспериментов процесс испарения капли являлся диффузионным.

Определены скорости испарения капель воды с необработанной, полированной шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой и обработанных лазерным излучением поверхностей алюминиево-магниевого сплава (рисунок 3.8) [122].

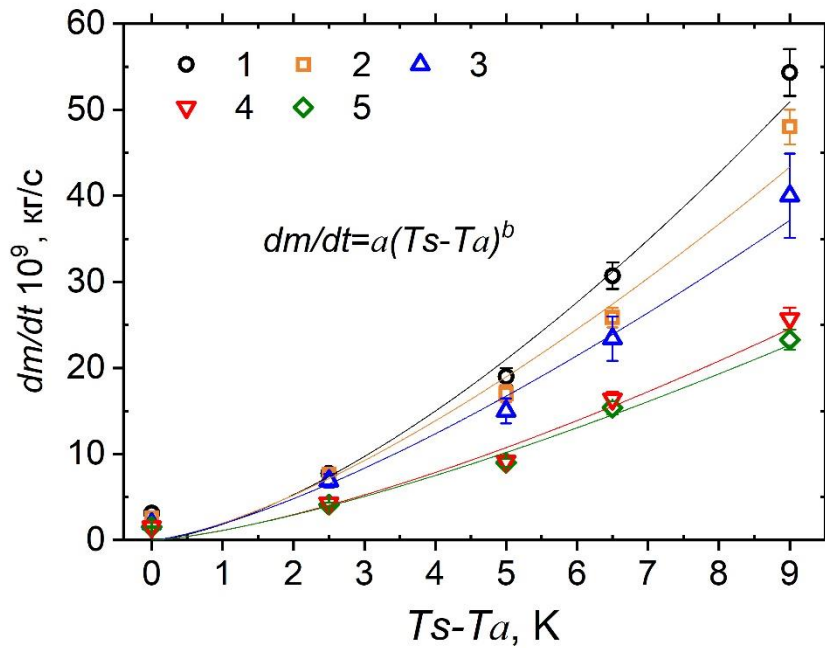


Рисунок 3.8 – Зависимости скоростей испарения капель воды (dm/dt) от разности температур воздуха в камере и поверхностей подложек: 1 – необработанная, 2 – полированная шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой, 3-5 – обработанные лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 200, 66, 50 мкм, соответственно

Результаты выполненных экспериментов (рисунок 3.8) иллюстрируют существенное влияние свойств смачиваемости поверхностей подложек на интенсивность испарения капель воды. Анализируя зависимости (рисунок 3.8) можно сделать вывод, что обработка лазерным излучением поверхностей алюминий-магниевого сплава приводит к уменьшению скоростей испарения капель воды. Зависимости скоростей испарения капель воды от перепада температур в камере описывается аппроксимационным выражением [30] (3.10), параметры которого представлены в таблице 3.5.

$$\frac{dm}{dt} = a(T_s - T_a)^b, \quad (3.10)$$

где a – параметр, зависящий от начальных контактных углов испаряющихся с поверхностей исследуемых подложек капель воды; b – параметр, характеризующий интенсивность увеличения скоростей испарения капель воды при увеличении перепада температур между поверхностью подложки и воздухом в экспериментальной камере.

Таблица 3.5. Результаты обработки экспериментальных данных

№	Способ обработки	a	b	R^2
1	Необработанный	1,85	1,51	0,99
2	Шлифовально-полировальными дисками и алмазной пастой	1,97	1,41	0,98
3	Лазерными импульсами с шагом 200 мкм	1,88	1,36	0,99
4	Лазерными импульсами с шагом 66 мкм	1,12	1,40	0,98
5	Лазерными импульсами с шагом 50 мкм	1,14	1,36	0,99

3.3 Испарение капель воды с частицами полистирола

При испарении капель жидкостей, содержащих твердые частицы, на поверхностях твердых тел образуются осадки. В данном разделе проведен анализ влияния шероховатости поверхностей подложек на морфологию образующихся осадков при испарении капель воды с полистирольными частицами с помощью сканирующей электронной микроскопии. Объемные концентрации частиц в воде составили 0,025 %, 0,05 %, 0,1 %, 0,3 %, 0,5 %, 0,7 % и 1,0 %, соответственно. Сила тяжести не влияла на движение полистирольных частиц в капле воды, т.к. разница плотностей воды (1000 кг/м^3) и частицы (1050 кг/м^3) пренебрежимо мала [50]. Скорости седиментации сферических частиц (U_s , м/с) определены по формуле [70]:

$$U_s = \frac{d^2(\rho_{PS} - \rho)g}{18\mu}, \quad (3.11)$$

где d – диаметр частицы, м; ρ_{PS} и ρ – плотность частицы и плотность воды, м³/кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; μ – динамическая вязкость воды, Па·с.

Скорости седиментации частиц с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм в дистиллированной воде составили $7,6 \cdot 10^{-11}$ м/с, $3,1 \cdot 10^{-10}$ м/с и $3,1 \cdot 10^{-8}$ м/с, соответственно. В случае относительно малых частиц с характерными размерами 50 нм и 100 нм седиментация компенсировалась броуновским движением. Добавление в дистиллированную воду полистирольных частиц не влияло на геометрические характеристики лежащих на поверхностях подложек капель, т.к. поверхностное натяжение воды не изменялось [50].

Известно [50], что на формирование осадков при испарении капель жидкости с частицами влияют как свойства смачиваемости поверхности твердого тела, так и режимы в которых испарялась капля. По результатам анализа теневых изображений и геометрических характеристик испаряющихся капель воды с частицами установлено [134], что в отличии от капель воды без частиц (рисунки 3.1) после дозирования капель воды с частицами полистирола на поверхностях подложек (обработанных всеми использовавшимися способами) они испарялись в режиме постоянного контактного диаметра (рисунок 3.9, 3.10). Во время испарения капель воды полистирольные частицы накапливались вблизи контактной линии, что приводило к увеличению времени пиннинга. Пиннинг контактной линии регистрировался более 90 % времени существования капли.

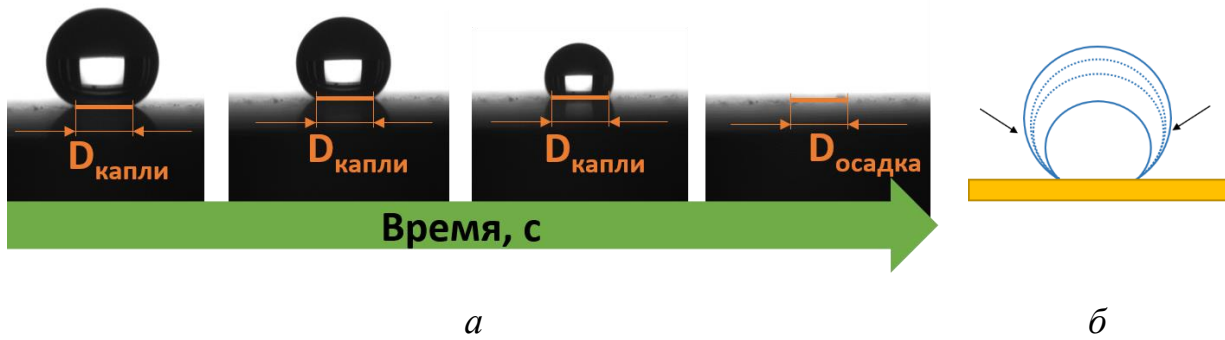


Рисунок 3.9 – Типичные изображения процесса испарения каплей воды с частицами с характерным размером 100 нм с обработанной лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 50 мкм поверхности подложки: *а* – фотоизображения; *б* – схематичное изображение

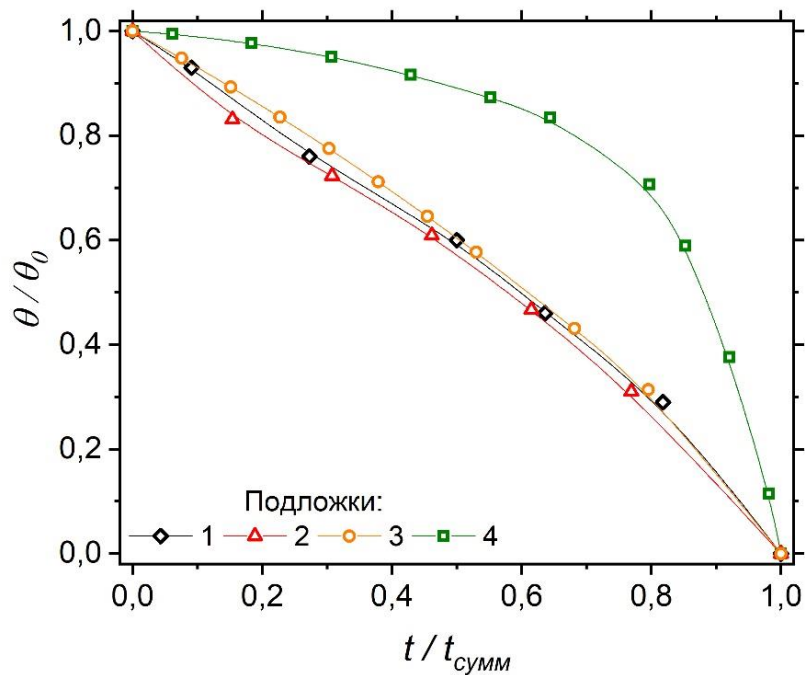
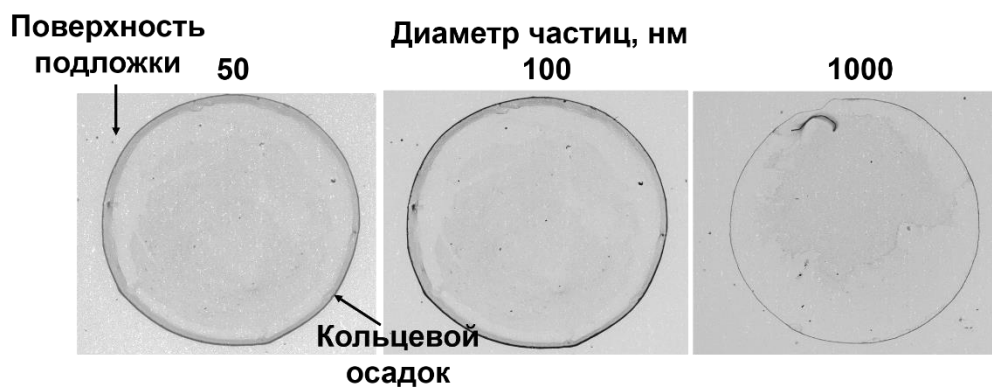


Рисунок 3.10 – Типичные зависимости безразмерных контактных углов капли воды с частицами с характерным размером 100 нм от времени ее испарения с поверхностей подложек: 1 – гальванизированная, 2 – сатиновая, 3 и 4 – обработанные лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 200 мкм и 50 мкм, соответственно

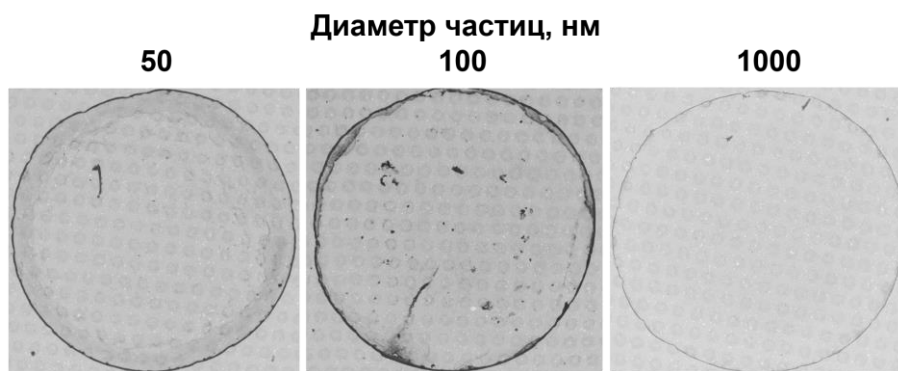
По результатам анализа фотоизображений поверхностей подложек после испарения на них капель воды с полистирольными частицами с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм установлено, что на поверхностях образовывались твердые осадки в виде кольца (рисунок 3.11) [134].



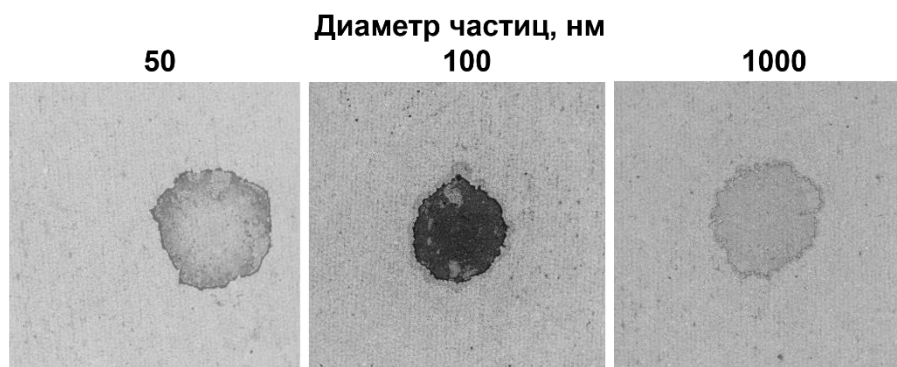
a



б



в



г

Рисунок 3.11 – Типичные фотоизображения образованных при испарении капель воды с частицами кольцевых осадков на поверхностях исследуемых подложек (объемная концентрация частиц в воде 0,025 %): *а* – полированная галтовкой; *б* – сатинированная; *в* и *г* – обработанные лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 200 и 50 мкм, соответственно

Диаметры образующихся при испарении капель воды с частицами колец не зависели от концентраций частиц и их размера и соответствовали начальным диаметрам капель воды. В таблице 3.6 представлены типичные контактные диаметры капель воды с частицами на относительно гладких и шероховатых поверхностях подложек, полученные экспериментально ($D_{\text{эксп}}$, мм) и теоретически ($D_{\text{теор}}$, мм), максимальные (D_{max} , мм) и минимальные (D_{min} , мм) диаметры кольцевых осадков (рисунок 3.12).

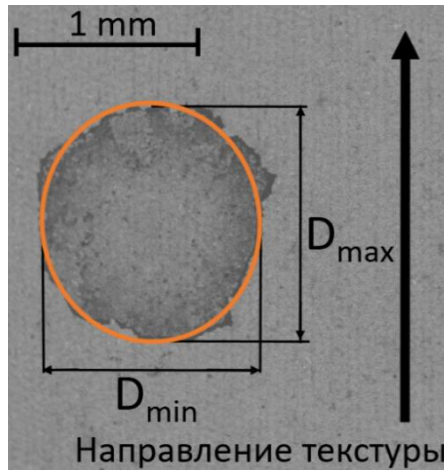


Рисунок 3.12 – Типичное фотоизображение кольцевого осадка на обработанном лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 50 мкм

Теоретические значения контактных диаметров капель коллоидного раствора рассчитаны с помощью выражения (3.12) [36]:

$$D = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3V \sin^3 \theta}{\pi(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)}} \quad (3.12)$$

Таблица 3.6. Типичные контактные диаметры капель воды с частицами и кольцевых осадков

№	Способ обработки	D_{\max} , мм	D_{\min} , мм	$D_{\text{эксп}}$, мм	$D_{\text{теор}}$, мм
1	Галтовка	2,72±0,1	2,68±0,1	2,75±0,1	2,86
2	Сатинирование	2,67±0,1	2,78±0,1	2,71±0,1	2,74
3	Лазерными импульсами с шагом 200 мкм	2,90±0,1	3,01±0,2	2,92±0,1	3,00
4	Лазерными импульсами с шагом 50 мкм	1,03±0,05	1,18±0,06	1,08±0,05	1,23

Разница между минимальными и максимальными диаметрами кольцевых осадков обусловлены деформацией контактных линий капель воды с частицами после их дозирования на шероховатые поверхности исследуемых подложек.

При испарении капли воды с частицами с полированной галтовкой поверхности подложки (характеризующейся относительно малым средним

арифметическим отклонением профиля (R_a) равным 0,02 мкм), образовывалось радиально-симметричное кольцо (рисунок 3.11): разница между максимальными и минимальными диаметрами колец составила менее 15 % (таблица 3.6). После дозирования на сатинированную и обработанные лазерным излучением поверхности подложек капли коллоидных растворов вытягивались параллельно текстуре под действием капиллярных сил. Разность между измеренными параллельно и перпендикулярно вектору движения луча лазера и полировального инструмента диаметрами осадков составили 0,11 мм, 0,11 мм и 0,15 мм для сатинированной, обработанной лазерными импульсами с шагом 200 мкм и 50 мкм, соответственно, поверхности (таблица 3.6). Такой же эффект растекания капли параллельно канавкам под действием капиллярной силы зарегистрирован и в [135] при испарении капель воды с полистирольными частицами с характерными размерами 50 нм и 100 нм с покрытой политетрафторэтиленом поверхности стекла. Можно сделать вывод, что обработка поверхностей подложек направленными движениями инструмента приводит при испарении капель к формированию вытянутых параллельно направлению текстуры твердых осадков.

Исследовано влияние увеличения концентрации полистирольных частиц в капле воды на образование осадков. Установлено [134] (рисунок 3.13), что увеличение концентрации частиц в коллоидном растворе до 0,1 % не влияло на вид образующихся при испарении капель коллоидных растворов осадков. После выпаривания из капель растворителя образовывались кольцеобразные осадки: радиально-симметричные на полированном галтовкой поверхности подложки и вытянутые параллельно текстуре на сатинированном и обработанных лазерным излучением поверхностях подложек.

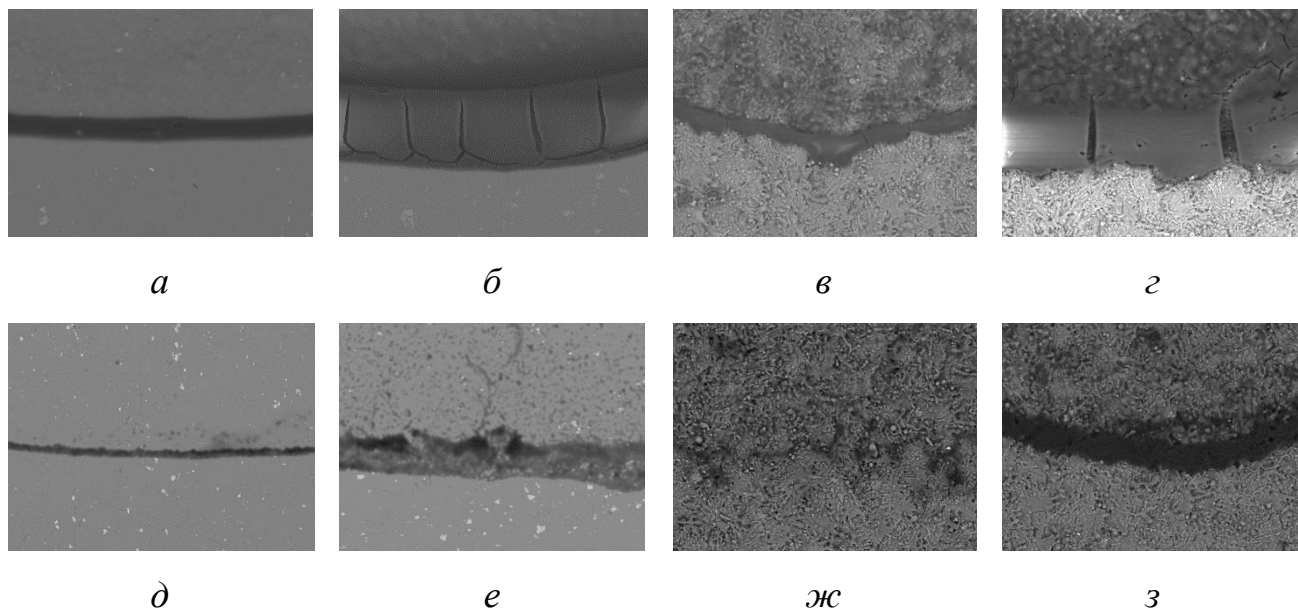


Рисунок 3.13 – Типичные фотоизображения образовавшихся при испарении капель воды с частицами частей колец на поверхностях подложек: *а, б, д, е* – полированная галтовкой; *в, г, ж, з* обработанная лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 50 мкм, соответственно

Установлено (рисунок 3.14), что дальнейшее увеличение концентрации частиц с характерными размерами 50 нм и 100 нм нецелесообразно, т.к. с увеличением концентрации на кольцах образовывались радиально-направленные трещины [136].

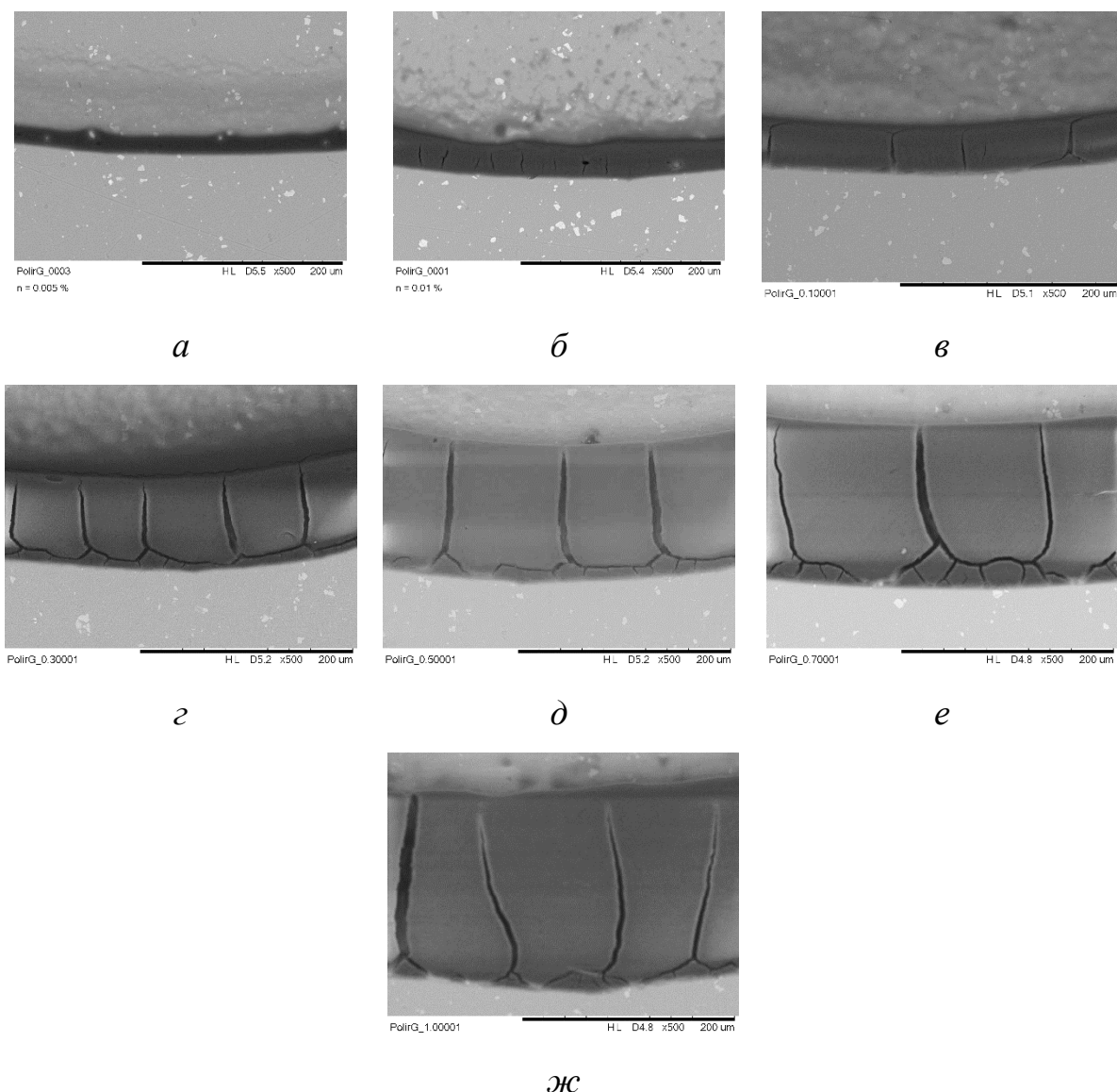


Рисунок 3.14 – Типичные фотоизображения фрагментов колец, образовавшихся при испарении капле коллоидного раствора с частицами диаметром 100 нм с полированной поверхности образца при объемной концентрации раствора: *a* – 0,025 %; *б* – 0,05 %; *в* – 0,1 %; *г* – 0,3 %; *д* – 0,5 %; *е* – 0,7 %; *ж* – 1,0 %

Растрескивание колец происходило на финальной стадии испарения [22,70]. После растрескивания фрагменты образованных колец отслаивались и осыпались (рисунок 3.15) [137]. Последнее характерно только для текстурированных сатинированием и обработкой лазерным излучением поверхностей подложек.

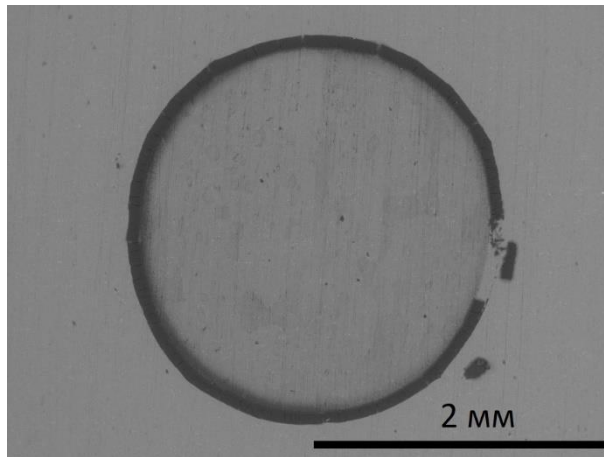
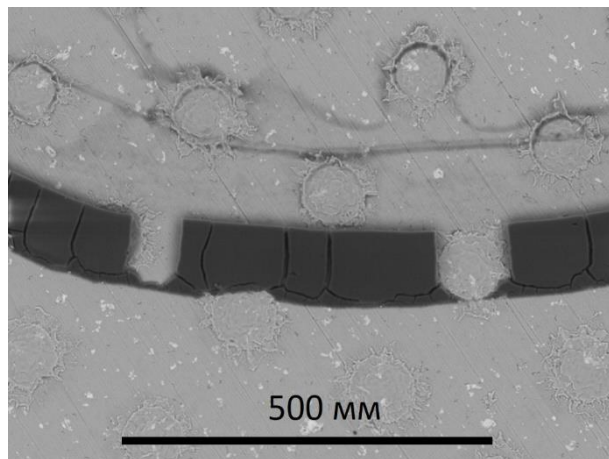
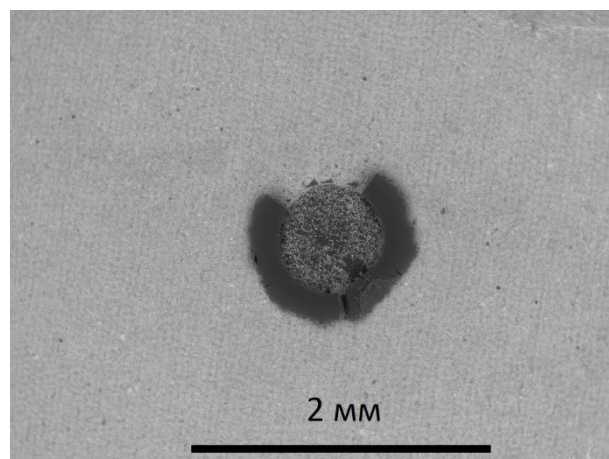
*a**б**в*

Рисунок 3.15 – Фотоизображение кольцевых осадков, образовавшихся при испарении капель содержащих полистирольные частицы диаметром 100 мкм коллоидных растворов с поверхностей подложек: *a* – сатинированная; *б* и *в* –

обработанные лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 200 и 50 мкм, соответственно

При относительно малых концентрациях частиц в коллоидных растворах (до 0,3 %) текстура поверхности оказывала влияние на интенсивность растрескивания следующим образом. При испарении капель коллоидных растворов с частицами диаметром 100 нм с гидрофильных поверхностей подложек с увеличением шероховатости от 0,02 мкм (обработанная галтовкой) до 0,69 мкм (лазерными импульсами с шагом 200 мкм) расстояние между соседними трещинами на кольце уменьшалось от $1,2 \pm 0,1$ мм до $0,4 \pm 0,1$ мм. С ростом концентрации частиц в коллоидном растворе от 0,3 % до 1,0 % расстояние между соседними трещинами на кольце оставалось постоянным. В случае осаждения частиц во время испарения капель коллоидных растворов с гидрофобной поверхности подложки вследствие многомодальной текстуры на ее поверхности кольцо из осажденных частиц разделялось на несколько крупных частей. Их количество уменьшалось от 17 ± 2 шт до 5 ± 2 шт с увеличением концентрации от 0,1 % до 1,0 %. Можно сделать вывод, что несмотря на то, что одним из способов повышения стойкости наносимого покрытия является увеличение шероховатости поверхности покрываемого материала, последнее приводит к усилению растрескивания и отслаиванию фрагментов образовавшихся при испарении капель коллоидных растворов колец.

Растрескивание образовавшихся при испарении капель коллоидных растворов с частицами диаметром 1000 нм твердых осадков не зарегистрировано на всех исследуемых поверхностях подложек. Последнее соответствует результатам [22,70] в которых установлено, что трещины образуются при испарении коллоидных растворов с частицами диаметром 100 мкм и меньше.

Установлено [134], что увеличение концентрации относительно крупных полистирольных частиц диаметром 1000 нм приводит к изменению формы твердых осадков, образовавшихся на гидрофобной поверхности подложки. При испарении

коллоидных растворов с концентрациями до 0,3 % с обработанной лазерным излучением гидрофобной поверхности подложки образовывались кольца, но дальнейшее увеличение концентрации приводило к формированию однородного слоя частиц. Типичные фотоизображения осадков на полированной и обработанной лазерным излучением поверхностях подложек представлены на рисунке 3.16. Аналогичные результаты (формирование колец при испарении растворов относительно крупных частиц концентрациями до 1,0 %) были получены на гидрофильной поверхности стекла при испарении 1,1 мкл капель коллоидных растворов с частицами диаметром 1100 нм и 3000 нм [70].

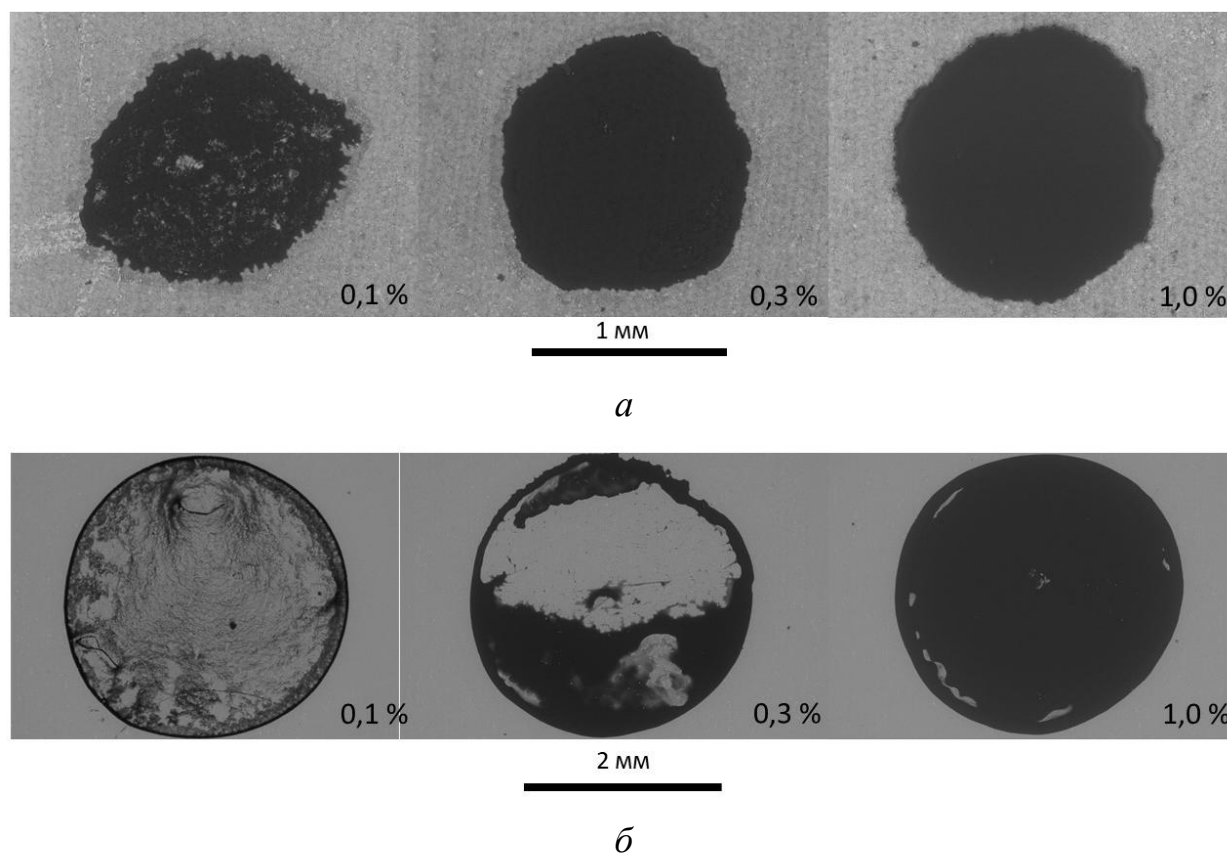
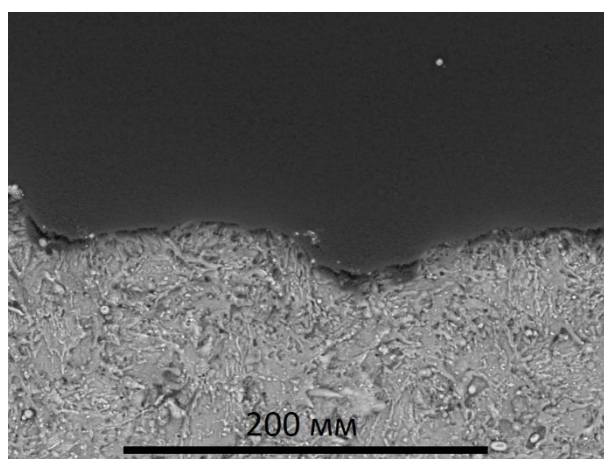
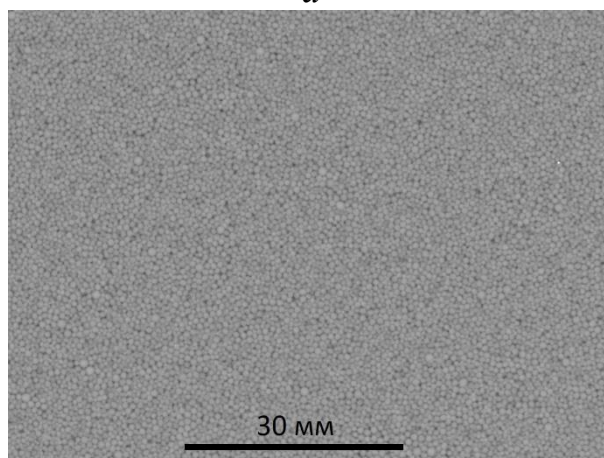
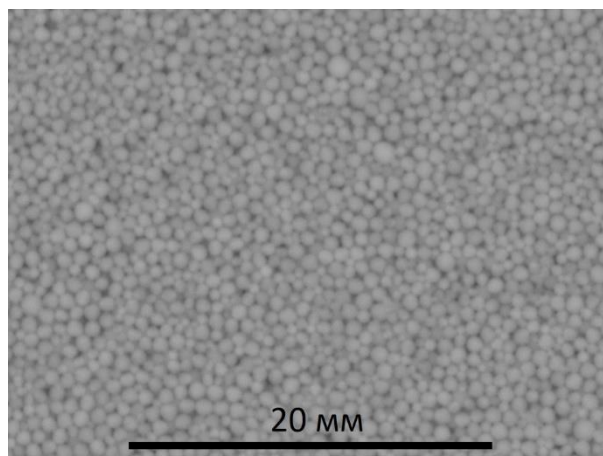


Рисунок 3.16 – Типичные фотоизображения кольцевых осадков, образованных при испарении капель коллоидных растворов с полистирольными частицами диаметром 1000 нм с поверхностями исследуемых подложек:

a – обработанная лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 50 мкм; *б* – полированная галтовкой

Формирование слоя частиц (несмотря на пиннинг контактной линии испаряющейся капли жидкости) связано с образованной при обработке поверхности подложки лазерным излучением многомодальной текстурой. Увеличение шероховатости поверхности подложки в результате нанесения текстуры привело к уменьшению скорости движения частиц вблизи границы жидкость/твердое тело при перемещении радиальных потоков жидкости в испаряющейся капле коллоидного раствора [75]. При движении вблизи поверхности подложки относительно крупные частицы осаждались в углублениях. Последующие частицы «приклеивались» к уже осевшим, формируя слой (рисунок 3.17). В результате чего образовалась структура с равномерным распределением частиц.

*a**б*



в

Рисунок 3.17 – Фотоизображения слоя частиц с характерным размером 1000 нм, образованного на обработанной лазерным излучением гидрофобной поверхности подложки при испарении капли коллоидного раствора концентрацией 1,0 %, масштабom: *a* – 500:1; *б* – 2000:1; *в* – 5000:1

С ростом концентрации частиц с характерными размерами 50 нм, 100 нм и 1000 нм также увеличивалась и ширина кольцевого осадка, при этом текстура поверхностей подложек и их свойства смачиваемости не оказывали влияние на их размеры. На рисунке 3.18 представлены зависимости ширины образовавшихся на поверхностях подложек колец (W , мкм) от начальной концентрации полистирольных частиц в коллоидном растворе, x , % [134]. Вследствие деформации контактной линии капли раствора при натекании на выступы или заполнении впадин на обработанной лазерным излучением гидрофобной поверхности подложки ширина образовавшихся колец определялась как среднее арифметическое минимальной (W_1 , мкм) и максимальной (W_2 , мкм) ширины (рисунок 3.19).

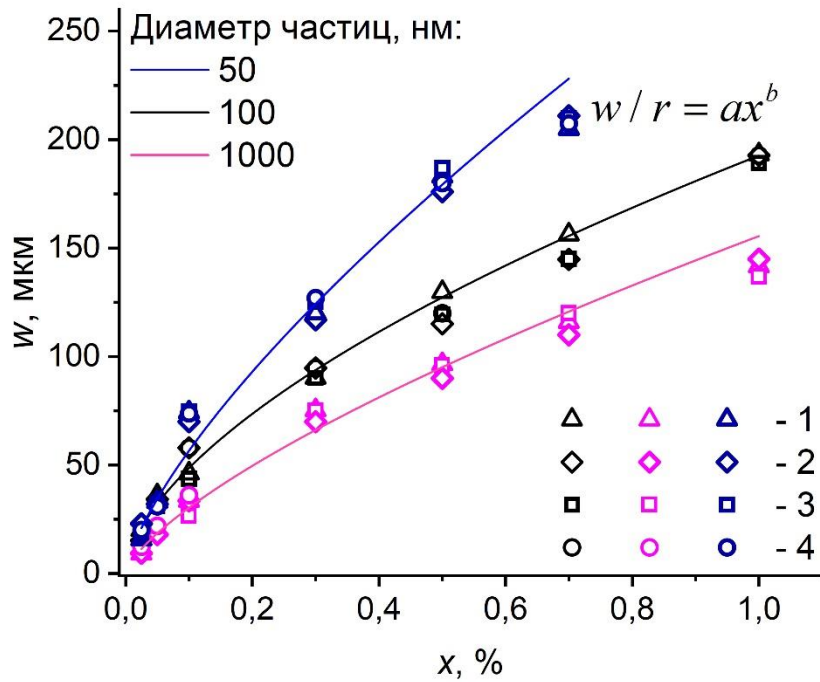


Рисунок 3.18 – Зависимости толщины образованных при испарении капель коллоидных растворов колец от концентраций частиц в растворах на поверхностях подложек: 1 – полированная; 2 – сатирированная; 3 и 4 – обработанные лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 200 и 50 МКМ, соответственно

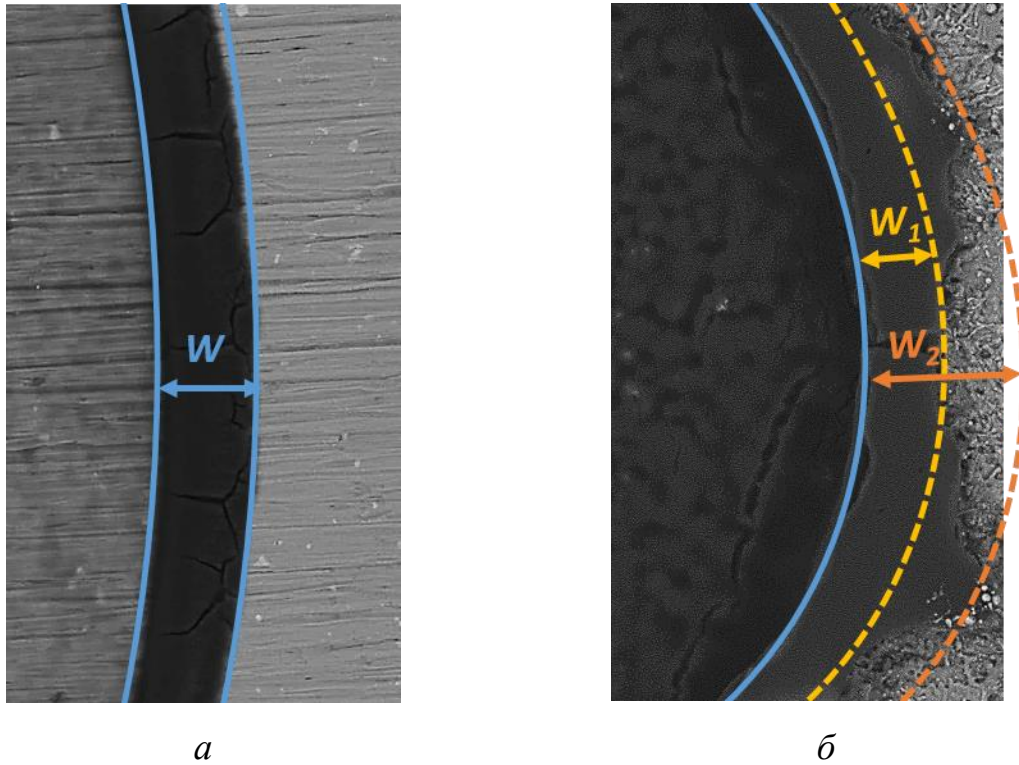


Рисунок 3.19 – определение ширины образовавшихся на поверхностях подложек колец: *a* – сатинированный; *б* – обработанной лазерным излучением с шагом между центрами кратеров 50 мкм

Степенные зависимости ширины образовавшихся на полированной и текстурированной поверхностях подложек колец от концентрации частиц в коллоидном растворе аппроксимируются выражением 3.13 [67]:

$$W / r = ax^b, \quad (3.13)$$

где r – радиус частицы, мкм. Параметры аппроксимационного выражения a и b представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Параметры, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных

Диаметр частиц, нм	a	b	R^2
50	$11,7 \cdot 10^3$	0,7	0,98
100	$2,6 \cdot 10^3$	0,6	0,99
1000	$0,3 \cdot 10^3$	0,7	0,99

Полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных параметры (таблица 3.9) согласуются с полученными в работе [67]: a равные $9,7 \cdot 10^3$, $1,8 \cdot 10^3$ и $0,98 \cdot 10^3$ и b равные 1,26, 0,54 и 0,53, соответственно, при описании ширины колец, образованных на условно-гладкой поверхности тефлона при испарении капель водных растворов полистирольных частиц объемом 40 мкл с характерными размерами 20 нм, 100 нм и 600 нм.

Анализируя результаты проведенных экспериментов (таблица 3.8 и таблица 3.9) можно сделать вывод о том, что способ обработки поверхности алюминиево-магниевого сплава влияет только на диаметр кольца из осажденных частиц. Ширина образованных в результате испарения капель коллоидных растворов колец остается постоянной, т.к. режим с постоянным контактным диаметром является доминирующим.

Выводы по главе 3

1. По результатам экспериментального исследования 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.

ГЛАВА 4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ С ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ КАПЛЕ ЖИДКОСТИ

С целью анализа характерных температур в массиве испаряющейся капли проведено численное моделирование процесса теплопереноса в капле и диффузии паров вблизи ее поверхности. Определить эти характеристики экспериментально весьма сложно по целому ряду причин, основными из которых являются кривизна поверхности капли и испарение со смещением границы раздела «капля – внешняя среда». Математическое моделирование проведено в рамках физической модели, сформулированной по результатам анализа и обобщения установленных в проведенных экспериментах закономерностей.

4.1 Математическая модель

На рисунке 4.1 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.

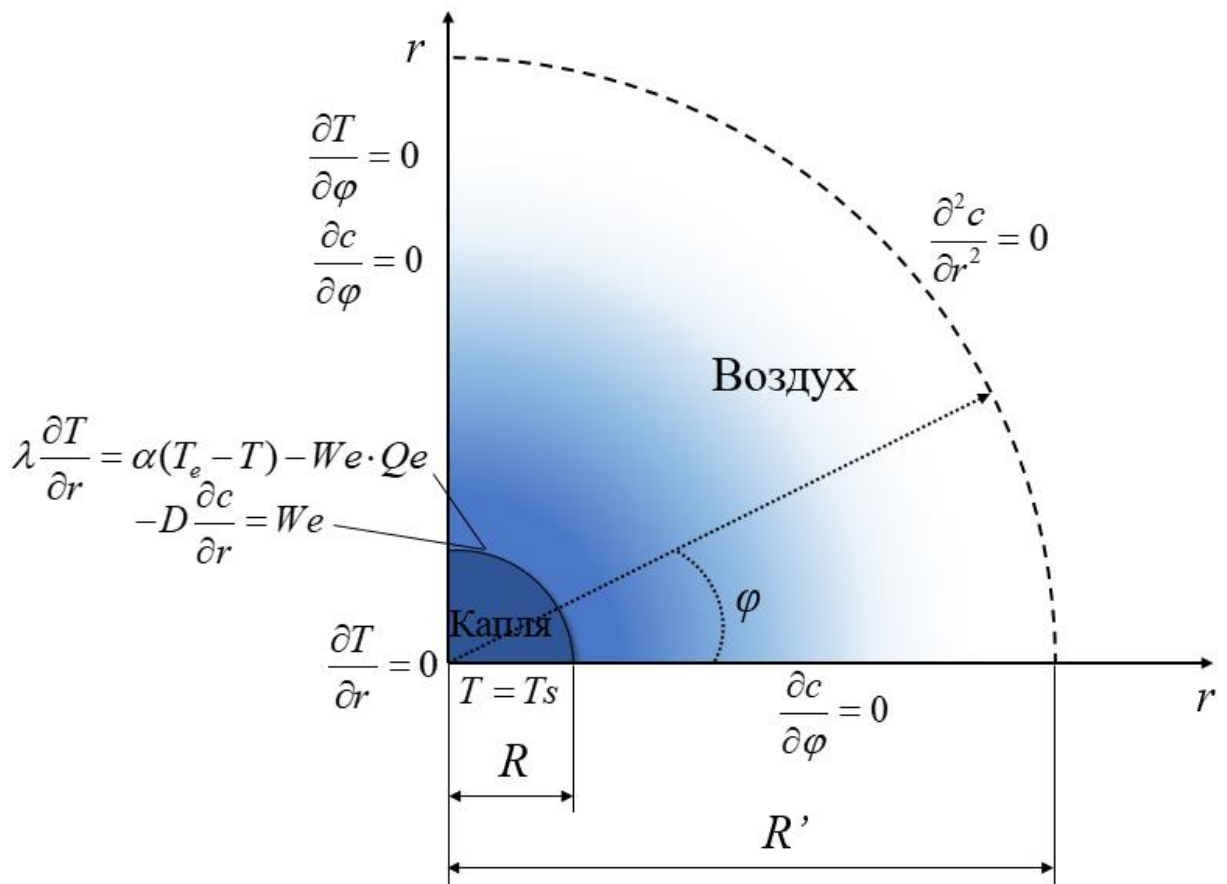


Рисунок 4.1 – Область решения задачи.

Принято, что теплоперенос в капле можно описать уравнением теплопроводности (4.1). Конвекция в испаряющейся капле воды не рассматривалась, т.к. ранее установлено [51,138,139], что термогравитационные течения в капле не оказывают существенного влияния на температуры жидкости. 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:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right), \quad 0 < r < R; \quad 0 < \varphi < \pi / 2, \quad (4.1)$$

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

Начальные условия для рассматриваемой задачи имели вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq r \leq R; 0 \leq \varphi \leq \pi / 2, \quad (4.2)$$

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

На границах области решения задавались граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, t > 0, 0 < \varphi < \pi / 2; \quad (4.3)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha(T_e - T) - We \cdot Qe, t > 0, \alpha > 0, 0 < \varphi < \pi / 2; \quad (4.4)$$

$$T|_{\varphi=0} = Ts, t > 0, 0 \leq r \leq R; \quad (4.5)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi/2} = 0, t > 0, 0 < r < R, \quad (4.6)$$

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

Задача (4.2) – (4.6) решена методом конечных разностей.

На каждом временном слое радиус капли воды изменяется 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:

$$R_{i+1} = R_i - \frac{We \cdot \Delta \tau}{\rho}, \quad (4.7)$$

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 [62]:

$$We = \frac{A \cdot (p_H - p)}{\sqrt{\frac{2\pi R^* T}{M}}}, \quad (4.8)$$

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.

По аналогии с [62] коэффициент аккомодации A принят 0,03. Равновесное давление водяных паров рассчитывалось с помощью выражения Клаузиуса-Клапейрона в экспоненциальной форме [140,141]:

$$p_H = p_0 \cdot \exp\left(\frac{Qe \cdot M}{R^*} \cdot \left(\frac{T - T_0}{T \cdot T_0}\right)\right), \quad (4.9)$$

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 [141]:

$$p = c \cdot p_H, \quad (4.10)$$

где c – концентрация водяных паров вблизи поверхности капли воды.

Толщина слоя Кнудсена рассчитывалась как средняя длина пробега молекулы воды [142]:

$$l_c = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} d^2 p}, \quad (4.11)$$

где k – постоянная Больцмана, Дж/К; d – диаметр молекулы воды, м.

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

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\rho D}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\rho D}{r^2 \sin \varphi} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial c}{\partial \varphi} \right), \quad R < r < R'; \quad 0 < \varphi < \pi / 2. \quad (4.12)$$

Начальные условия для задачи диффузии водяных паров имели вид:

$$t = 0: \quad c = c_0, \quad R \leq r \leq R'; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi / 2, \quad (4.13)$$

где c_0 – начальная концентрация водяных паров; R' – радиус границы области решения, м (рис. 4.1).

Граничные условия:

$$-\rho D \frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r=R} = We, \quad t > 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi / 2; \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \Big|_{r=R'} = 0, \quad t > 0, \quad 0 < \varphi < \pi / 2; \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial c}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = 0, \quad t > 0, \quad R < r < R'; \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial c}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\pi/2} = 0, \quad t > 0, \quad R < r < R'. \quad (4.17)$$

Т.к. при постановке задачи принято, что капля воды испарялась в неизолированной камере (в отличии от [39,51,52]) на границе $r=R'$ задавалось «мягкое» граничное условие (4.15) [143]. 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 (4.1) и диффузии водяных паров (4.12) с соответствующими краевыми условиями решены методом конечных разностей [140,144]. Разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [145]. Нелинейные алгебраические уравнения решены методом итераций [145]. Начальные концентрации водяных паров и температуры воздуха в камере задавались соответствующими условиям проведения выполненных автором экспериментов (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Показания термомпар и гигрометра

T1, К	T2, К	c , %
313	310,5	44
323	318	31
333	326,5	20
343	334	15

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).

4.2 Верификация математической модели

С целью обоснования достоверности результатов математического моделирования проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений объемов капель воды (рис. 4.2) и зависимостей скоростей испарения капель воды от температуры сатинированной поверхности подложки (с текстурой в виде параллельно направленных микроканалов) (рис. 4.3). Контактный угол капли воды на поверхности подложки составил $87 \pm 2^\circ$.

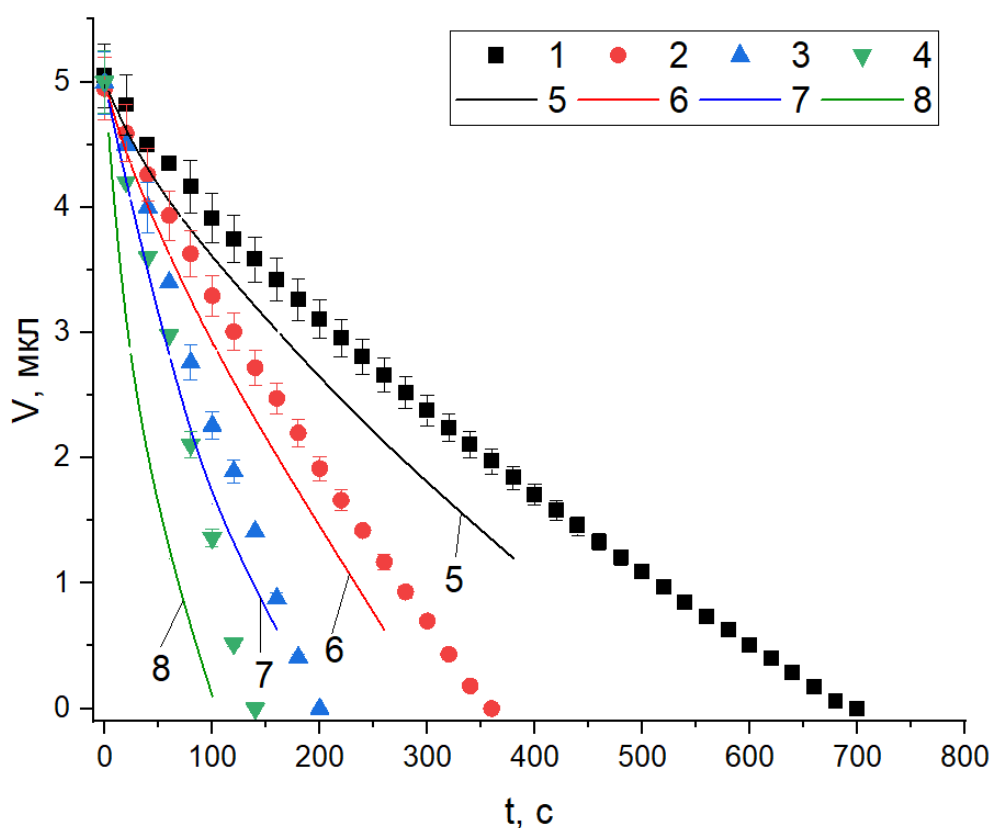


Рисунок 4.2 – Экспериментальные (1-4) и теоретические (5-8) зависимости объемов капель воды от времени ее испарения при температуре поверхности подложки: 1, 5 – 313 К; 2, 6 – 323 К; 3, 7 – 333 К; 4, 8 – 343 К.

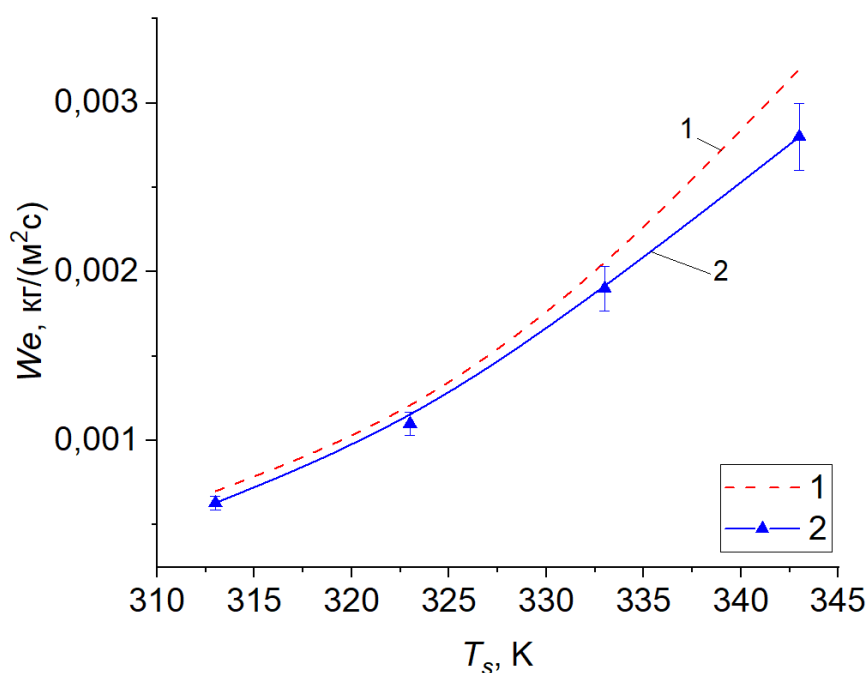
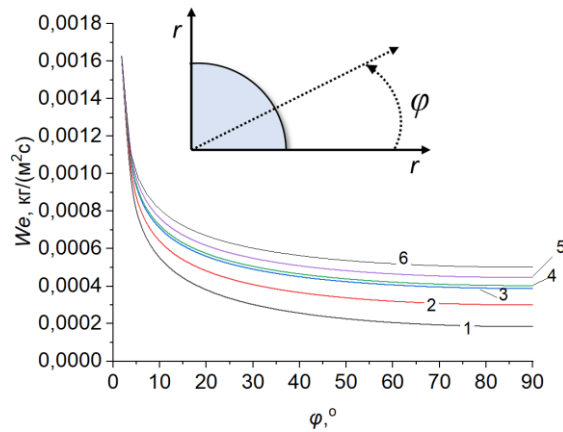


Рисунок 4.3 – Зависимости скоростей испарения капли воды от температуры поверхности подложки: 1 – результаты численного моделирования; 2 – результаты экспериментального исследования

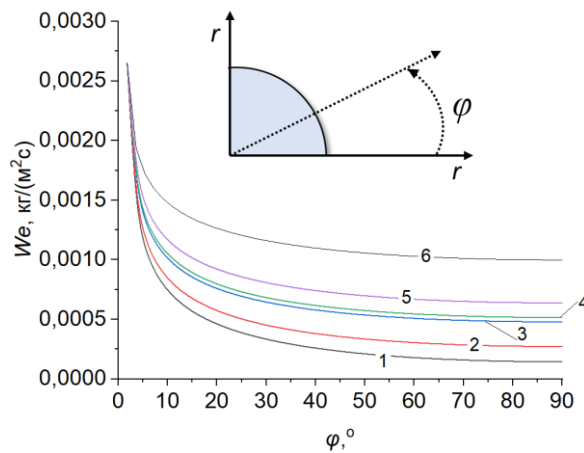
Анализ зависимостей объемов капель воды от времени ее испарения (рис. 4.2) и скоростей испарения капель воды от температуры поверхности подложки (рис. 4.3) показал, что результаты численного моделирования хорошо соответствуют результатам экспериментов в исследуемом диапазоне температур поверхности подложки. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями объемов и скоростей испарения не превышают 25% и 15 %, соответственно. На рисунке 4.3 приведены рассчитанные в результате численного моделирования скорости испарения капли воды, которые были усреднены по поверхности капли и времени испарения для сравнения с результатами экспериментальных исследований.

4.3 Локальные скорости испарения капли воды

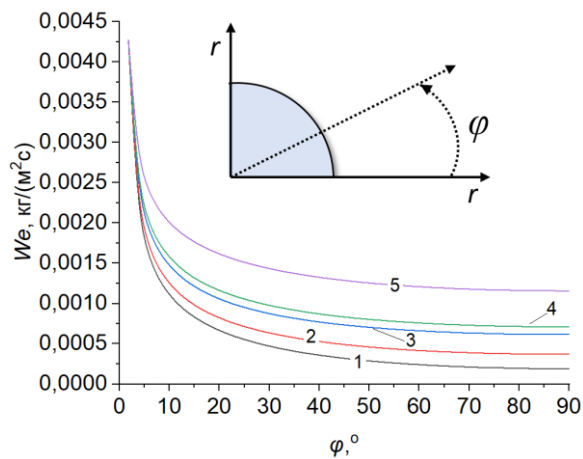
Типичные распределения по угловой координате локальных скоростей испарения каплей воды представлены на рисунке 4.4.



a



б



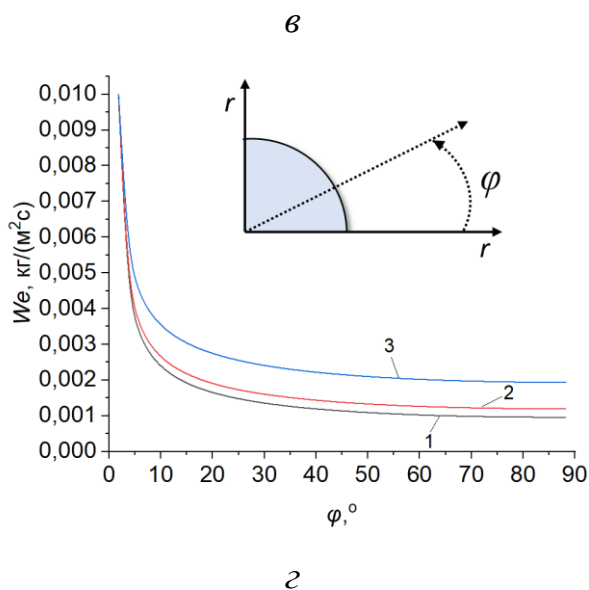


Рисунок 4.4 – Распределения локальных скоростей испарения каплей воды с нагретой до 313 К, 323 К, 333 К и 343 К поверхности подложки (а, б, в и г, соответственно) по угловой координате в различные моменты времени: 1 – 5 с; 2 – 10 с; 3 – 60 с; 4 – 100 с; 5 – 200 с; 6 – 300 с.

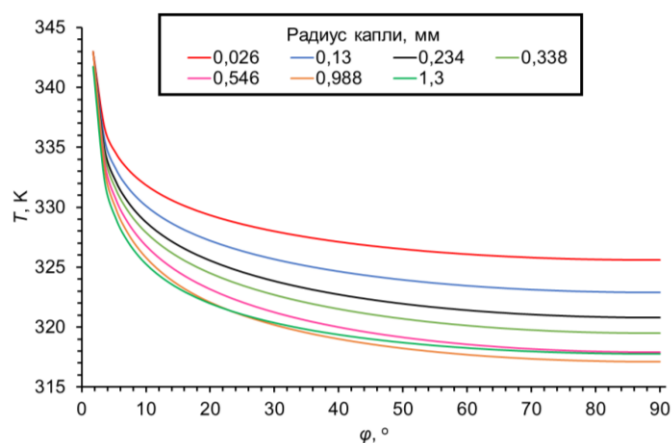
В результате анализа распределений $We(\varphi)$ (рис. 4.4) можно сделать вывод, что при увеличении угловой координаты от $\varphi = 0^\circ$ (контактная линия) до $\varphi = 90^\circ$ (точка, соответствующая максимальной толщине капли) локальные скорости испарения капли с нагретой поверхности подложки уменьшаются более чем в 10 раз.

Также установлено (рис. 4.4), что локальные скорости испарения на протяжении времени существования капли монотонно увеличивались. Например, при испарении капли воды с нагретой до 323 К поверхности подложки локальные скорости испарения в точке, соответствующей максимальной толщине капли ($\varphi = 90^\circ$), увеличились в 2, 3, 3,5, 4,5 и 7 раз через 10 с, 60 с, 100 с, 200 с и 300 с после начала испарения, соответственно (рис. 4.4). Локальные скорости испарения вблизи контактной линии оставались постоянными на протяжении всего процесса испарения капли. Увеличение локальных скоростей испарения связано с ростом температур по контуру свободной поверхности капли воды. Можно сделать вывод,

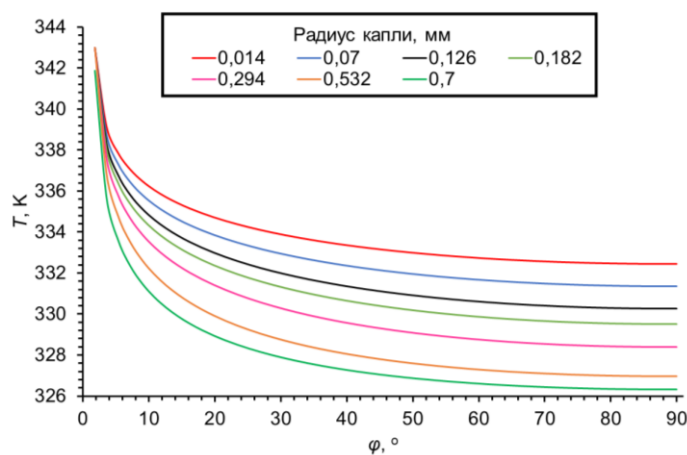
что при испарении охлаждающих жидкостей с поверхностей теплонагруженных участков оборудования усредненные по поверхности капель скорости испарения монотонно увеличиваются при постоянной температуре подложки. Для достижения регламентного температурного режима энергонасыщенного оборудования необходимо вычисление распределений температур по контуру капли при прогнозировании скоростей их испарения.

4.4 Распределение температур в массиве испаряющейся капли воды

В результате численного моделирования вычислены распределения температур в массиве испаряющейся с нагретой поверхности подложки капли воды. Типичные распределения температур приведены на рисунке 4.5.



a



б

Рисунок 4.5 – Типичные распределения температур испаряющейся капли воды с нагретой до 343 К поверхности подложки. Времена испарения капли:

a – 5 с; *б* – 100 с.

По результатам математического моделирования установлено, что при испарении капли воды с начальным контактным радиусом 1,3 мм с нагретой поверхности подложки (при разных температурах поверхности, с которой испаряется капля, и окружающего каплю воздуха) перепад температур по контуру свободной поверхности капли может достигать 35 К (рис. 4.5). Также установлено (рис. 4.5), что температуры в каждой точке 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 окружающем каплю нагретым воздухом (температуры воздуха в камере определялись экспериментально и представлены в таблице 4.1). Кроме того, установлено (рис. 4.5), что температуры капли воды увеличивались на протяжении всего процесса ее испарения. Например, через 5 с и 100 с после начала испарения максимальный перепад температур по контуру свободной поверхности капли уменьшился от 35 К до 20 К, соответственно (рис. 4.5). Последнее 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. В случае, если принимается допущение о том, что температура поверхности испаряющейся капли жидкости соответствует температуре поверхности теплонагруженного элемента оборудования, рассчитываемые скорости испарения капель охлаждаемых жидкостей могут быть существенно (многократно) завышены.

Выводы по главе 4

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. 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). Результаты выполненных теоретических 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 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.

Список принятых сокращений и условных обозначений

L_c	капиллярная длина, м
$\sigma_{ТГ}$	поверхностное натяжение на границе твердое тело/газ, Дж/м ²
$\sigma_{ТЖ}$	поверхностное натяжение на границе твердое тело/жидкость, Дж/м ²
$\sigma_{ЖГ}$	поверхностное натяжение на границе жидкость/газ, Дж/м ²
Bo	число Бонда
d	диаметр частицы, м
ρ_{PS}	плотность частицы, м ³ /кг
μ	динамическая вязкость воды, Па·с
W	ширина образовавшихся на поверхностях подложек колец, мкм
x	начальная концентрация полистирольных частиц в коллоидном растворе, %
D	коэффициент диффузии молекул воды в окружающий каплю воздух, м ² /с
ρ_B	плотность воздуха, кг/м ³
dm/dt	скорость убыли массы испаряющейся с поверхности твердого тела капли жидкости кг ³ /с
c_s ,	массовые концентрации молекул воды на границе жидкость/газ, кг/м ³
c_∞	массовые концентрации молекул воды в окружающем каплю газе, кг/м ³
$f(\theta)$	функция контактного угла с учетом отклонения капли от сферической формы
θ_O	отступающий контактный угол, °
θ_H	наступающий контактный угол, °
a, b	эмпирические коэффициенты
D	контактный диаметр капли, м

R	контактный радиус капли, м
g	ускорение свободного падения, м/с ²
l	высота лежащей на подложке капли, м
m	масса, кг
A	площадь поверхности капли, м ²
T	температура, К
V	объем капли, м ³
We	удельная скорость испарения, кг/(м ² ·с)
σ	коэффициент поверхностного натяжения, Н/м
θ	контактный угол, °
ρ	плотность жидкости, кг/м ³
Ra	среднее арифметическое отклонение профиля, мкм
Sa	среднее арифметическое высоты, мкм

Список литературы

1. Ait Saada M., Chikh S., Tadrist L. Evaporation of a sessile drop with pinned or receding contact line on a substrate with different thermophysical properties // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. T. 58. № 1–2. С. 197–208.
2. Al-Sharafi A., Yilbas B. S. Heat transfer and internal fluidity a droplet located in between parallel hydrophobic surfaces with varying spacing // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2018. T. 73. № June. С. 1–15.
3. Al-Sharafi A., Yilbas B. S., Ali H. Droplet heat transfer on micro-post arrays: Effect of droplet size on droplet thermal characteristics // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2017. T. 68. № September. С. 62–78.
4. Allahyari E., JJ Nivas J., Oscurato S. L., Salvatore M., Ausanio G., Vecchione A., Fittipaldi R., Maddalena P., Bruzzese R., Amoruso S. Laser surface texturing of copper and variation of the wetting response with the laser pulse fluence // *Appl. Surf. Sci.* 2019. T. 470. № September 2018. С. 817–824.
5. Allred T. P., Weibel J. A., Garimella S. V. Enabling highly effective boiling from superhydrophobic surfaces // *Phys. Rev. Lett.* 2018. T. 120. № 17. С. 174501.
6. Amjad M., Yang Y., Raza G., Gao H., Zhang J., Zhou L., Du X., Wen D. Deposition pattern and tracer particle motion of evaporating multi-component sessile droplets // *J. Colloid Interface Sci.* 2017. T. 506. С. 83–92.
7. Armon N., Greenberg E., Layani M., Rosen Y. S., Magdassi S., Shpaisman H. Continuous Nanoparticle Assembly by a Modulated Photo-Induced Microbubble for Fabrication of Micrometric Conductive Patterns // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. T. 9. № 50. С. 44214–44221.
8. Armstrong S., McHale G., Ledesma-Aguilar R., Wells G. G. Pinning-free evaporation of sessile droplets of water from solid surfaces // *Langmuir.* 2019. T. 35. № 8. С. 2989–2996.

9. Bagehorn S., Wehr J., Maier H. J. Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts // *Int. J. Fatigue*. 2017. T. 102. C. 135–142.
10. Bai X., Yang Qing, Fang Yao, Zhang J., Yong J., Hou X., Chen F. Superhydrophobicity-memory surfaces prepared by a femtosecond laser // *Chem. Eng. J.* 2020. T. 383. № June 2019. C. 123143.
11. Barmi M. R., Meinhart C. D. Convective flows in evaporating sessile droplets // *J. Phys. Chem. B*. 2014. T. 118. № 9. C. 2414–2421.
12. Batishcheva K. A., Kuznetsov G.V., Orlova E.G., Vympina Yu. N. Evaporation of colloidal droplets from aluminum-magnesium alloy surfaces after laser-texturing and mechanical processing // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2021. T. 628. № August. C. 127301.
13. Boinovich L. B., Emelyanenko A. M., Emelyanenko K. A., Domantovsky A. G., Shiryayev A. A. Comment on «Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications» by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard (Ap // *Appl. Surf. Sci.* 2016. T. 379. C. 111–113.
14. Boinovich L. B., Emelyanenko K. A., Domantovsky A. G., Emelyanenko A. M. Laser Tailoring the Surface Chemistry and Morphology for Wear, Scale and Corrosion Resistant Superhydrophobic Coatings // *Langmuir*. 2018. T. 34. № 24. C. 7059–7066.
15. Bonn D., Eggers J., Indekeu J., Meunier J. Wetting and spreading // *Rev. Mod. Phys.* 2009. T. 81. № 2. C. 739–805.
16. Boreyko J. B., Chen C. H. Vapor chambers with jumping-drop liquid return from superhydrophobic condensers // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. T. 61. № 1. C. 409–418.
17. Bottini J. L., Kumar V., Hammouti S., Ruzic D., Brooks C. S. Influence of wettability due to laser-texturing on critical heat flux in vertical flow boiling // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. T. 127. C. 806–817.

18. Bouchenna C., Ait Saada M., Chikh S., Tadrist L. Generalized formulation for evaporation rate and flow pattern prediction inside an evaporating pinned sessile drop // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. T. 109. C. 482–500.
19. Brown M. S., Arnold C. B. *Laser Precision Microfabrication* // 2010. T. 135. C. 91–120.
20. Brutin D., Sobac B. Triple line motion and evaporation // *Droplet Wetting and Evaporation* / под ред. D. Brutin. : Elsevier Inc., 2015. C. 25–30.
21. Brutin D., Starov V. Recent advances in droplet wetting and evaporation // *Chem. Soc. Rev.* 2018. T. 47. № 2. C. 558–585.
22. Care E. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed.* CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2009–2010, 90th ed . Edited by David R. Lide , Editor-in-Chief, and W. M. “Mickey” Haynes , Associate Editor (National Institute of Standards and Technology, // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. T. 131. № 35. C. 12862–12862.
23. Chakraborty S., Rosen M. A., MacDonald B. D. Analysis and feasibility of an evaporative cooling system with diffusion-based sessile droplet evaporation for cooling microprocessors // *Appl. Therm. Eng.* 2017. T. 125. C. 104–110.
24. Chang F. M., Cheng S. L., Hong S. J., Sheng Y. J., Tsao H. K. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of CuO nanowire films // *Appl. Phys. Lett.* 2010. T. 96. № 11. C. 2008–2011.
25. David S., Sefiane K., Tadrist L. Experimental investigation of the effect of thermal properties of the substrate in the wetting and evaporation of sessile drops // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2007. T. 298. № 1–2. C. 108–114.
26. Deegan R. D., Bakajin O., Dupont T. F., Huber G., Nagel S. R., Witten T. A. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops // *Nature.* 1997. T. 389. № 23. C. 827–829.
27. Deng T., Ran Y., Yin, Y., Chen X., Liu P. Multi-objective optimization design of double-layered reverting cooling plate for lithium-ion batteries // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. T. 143. C. 118580.

28. Deng T., Xie F., Li J., Zheng Z., Zhang W. Effect of overlapped adjacent tracks on surface morphology in plasma beam polishing of austenitic stainless steel // *Appl. Surf. Sci.* 2020. T. 512. № February. C. 145739.
29. Erbil H. Y. Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: A review // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2012. T. 170. № 1–2. C. 67–86.
30. Erkselius S., Wadsö L., Karlsson O. J. Drying rate variations of latex dispersions due to salt induced skin formation // *J. Colloid Interface Sci.* 2008. T. 317. № 1. C. 83–95.
31. Fathi F., Chaghamirzaei P., Allahveisi S., Ahmadi-Kandjani S., Rashidi M. R. Investigation of optical and physical property in opal films prepared by colloidal and freeze-dried microspheres // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2021. T. 611. C. 125842.
32. Fernandez-Toledano J. C., Blake, T. D., Lambert P., De Coninck J. On the cohesion of fluids and their adhesion to solids: Young's equation at the atomic scale // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2017. T. 245. C. 102–107.
33. Gatapova E. Y., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2014. T. 441. C. 776–785.
34. Gatapova E. Y., Shonina A. M., Safonov A. I., Sulyaeva V. S., Kabov O. A. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: Focusing on the final stage of thin droplet evaporation // *Soft Matter.* 2018. T. 14. № 10. C. 1811–1821.
35. Gavrilina A. A., Barash L. Y. Modeling Unsteady Bénard-Marangoni Instabilities in Drying Volatile Droplets on a Heated Substrate // *J. Exp. Theor. Phys.* 2021. T. 132. № 2. C. 302–312.
36. Ghosh S. Three-dimensional microplate formation with evaporating nanoparticle suspensions on superhydrophobic surfaces // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2017. T. 529. № February. C. 901–906.

37. Girard F., Antoni M., Sefiane K. On the effect of Marangoni flow on evaporation rates of heated water drops // *Langmuir*. 2008. T. 24. № 17. C. 9207–9210.
38. Gregorčič P. Comment on “bioinspired reversible switch between underwater superoleophobicity/superaerophobicity and oleophilicity/aerophilicity and improved antireflective property on the nanosecond laser-ablated superhydrophobic titanium surfaces” // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021. T. 12. № 2. C. 2117–2127.
39. Gregorčič P., Šetina-Batič B., Hočevar M. Controlling the stainless steel surface wettability by nanosecond direct laser texturing at high fluences // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process*. 2017. T. 123. № 12. C. 1–8.
40. He A. и др. Nanosecond laser ablated copper superhydrophobic surface with tunable ultrahigh adhesion and its renewability with low temperature annealing // *Appl. Surf. Sci*. 2018. T. 434. C. 120–125.
41. Hejazi V., Moghadam A. D., Rohatgi P., Nosonovsky M. Beyond Wenzel and Cassie-Baxter: Second-order effects on the wetting of rough surfaces // *Langmuir*. 2014. T. 30. № 31. C. 9423–9429.
42. Hołyst R., Litniewski M., Jakubczyk D. A molecular dynamics test of the Hertz-Knudsen equation for evaporating liquids // *Soft Matter*. 2015. T. 11. № 36. C. 7201–7206.
43. Hu D., Wu H. Numerical study and predictions of evolution behaviors of evaporating pinned droplets based on a comprehensive model // *Int. J. Therm. Sci*. 2015. T. 96. C. 149–159.
44. Hu D., Wu H., Liu Z. Effect of liquid-vapor interface area on the evaporation rate of small sessile droplets // *Int. J. Therm. Sci*. 2014. T. 84. C. 300–308.
45. Hu H., Larson R. G. Evaporation of a sessile droplet on a Substrate // *J. Phys. Chem. B*. 2002. T. 106. C. 1334–1344.
46. Hu Y., Zhao B., Lin S., Deng X., Chen L. Evaporation and particle deposition of bi-component colloidal droplets on a superhydrophobic surface // *Int. J. Heat Mass Transf*. 2020. T. 159. C. 120063.

47. Jagdheesh R., García-Ballesteros J. J., Ocaña J. L. One-step fabrication of near superhydrophobic aluminum surface by nanosecond laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* 2016. T. 374. C. 2–11.
48. Kabov O. A., Gatapova E. Y., Semenov A. A., Jutley M., Ajaev V. V., Kirichenko E. O., Feoktistov D. V., Kuznetsov G. V., Zaitsev D. V. Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate // *Interfacial Phenom. Heat Transf.* 2018. T. 6. № 4. C. 421–435.
49. Kaya D., Belyi V. A., Muthukumar M. Pattern formation in drying droplets of polyelectrolyte and salt // *J. Chem. Phys.* 2010. T. 133. № 11. C. 114905.
50. Kietzig A. M., Hatzikiriakos S. G., Englezos P. Patterned superhydrophobic metallic surfaces // *Langmuir.* 2009. T. 25. № 8. C. 4821–4827.
51. Kietzig A., Mirvakili M. N. Laser-Patterned Super- Hydrophobic Pure Metallic Substrates : Cassie to Wenzel Wetting Transitions // *J. Adhes. Sci.* 2012. № July 2013. C. 2789–2809.
52. Kubiak K. J., Wilson M. C. T., Mathia T. G., Carras S. Dynamics of contact line motion during the wetting of rough surfaces and correlation with topographical surface parameters // *Scanning.* 2011. T. 33. № 5. C. 370–377.
53. Kuzma-Kichta Y. A., Lavrikov A. V., Shustov M. V., Chursin P. S., Chistyakova A. V., Zvonarev Yu A., Zhukov V. M., Vasil'Eva L. T. Studying heat transfer enhancement for water boiling on a surface with micro- and nanorelief // *Therm. Eng.* 2014. T. 61. № 3. C. 210–213.
54. Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova . G., Misyura S. Y., Morozov V. S., Islamova A. G. Evaporation modes of LiBr, CaCl₂, LiCl, NaCl aqueous salt solution droplets on aluminum surface // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. T. 126. C. 161–168.
55. Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova E. G., Batishcheva K., Ilenok S. S. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment // *Appl. Surf. Sci.* 2019. T. 469. № November 2018. C. 974–982.

56. Kuznetsov G. V., Orlova E. G., Feoktistov D. V., Islamova A. G., Zhuikov A. V. Droplet Spreading and Wettability of Abrasive Processed Aluminum Alloy Surfaces // *Met. Mater. Int.* 2020a. T. 26. № 1. C. 46–55.
57. Kuznetsov G. V., Ponomarev K. O., Feoktistov D. V., Orlova E. G., Ouerdane H., Lyulin Yu V. New approach to the heat transfer modeling in the coolant layer on the lower cover of a thermosyphon // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020b. T. 163. C. 120555.
58. Lecoq L., Flick D., Laguerre O. Study of the water evaporation rate on stainless steel plate in controlled conditions // *Int. J. Therm. Sci.* 2017. T. 111. C. 450–462.
59. Li Y., Zhang Z., Guan Y. Thermodynamics analysis and rapid solidification of laser polished Inconel 718 by selective laser melting // *Appl. Surf. Sci.* 2020. T. 511. № January. C. 145423.
60. Lian Z., Xu J., Yu P., Yu Z., Wang Z., Yu H. Oil-repellent and corrosion resistance properties of superhydrophobic and superoleophobic aluminum alloy surfaces based on nanosecond laser-textured treatment // *Met. Mater. Int.* 2019. T. 26. C. 1603–1610.
61. Liu C., Yu H. Evaluation and Optimization of a Two-Phase Liquid-Immersion Cooling System for Data Centers // *Energies.* 2021. T. 14. № 1395. C. 1–21.
62. Zhang K., Liu H., Zhang S., Mi M. Experimental study on the interfacial heat transfer of sessile droplet evaporation using temperature-sensitive paint // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2021. T. 128. № February. C. 110436.
63. Liu T. L., Kim C. J. Contact angle measurement of small capillary length liquid in super-repelled state // *Sci. Rep.* 2017. T. 7. № 1. C. 1–8.
64. Long J., Zhong M., Zhang H., Fan P. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of picosecond laser microstructured aluminum in ambient air // *J. Colloid Interface Sci.* 2015. T. 441. C. 1–9.
65. Malla L. K., Bhardwaj R., Neild A. Analysis of profile and morphology of colloidal deposits obtained from evaporating sessile droplets // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2019. T. 567. № November 2018. C. 150–160.

66. Malla L. K., Bhardwaj R., Neild A. Colloidal deposit of an evaporating sessile droplet on a non-uniformly heated substrate // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2020. T. 584. № September 2019. C. 124009.
67. Margerit J., Colinet P., Lebon G., Iorio C. S., Legros J. C. Interfacial nonequilibrium and Bénard-Marangoni instability of a liquid-vapor system // *Phys. Rev. E - Stat. Physics, Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top.* 2003a. T. 68. № 4. C. 1–14.
68. Margerit J., Colinet P., Lebon, G., Iorio C. S., Legros J. C. Interfacial nonequilibrium and Bénard-Marangoni instability of a liquid-vapor system // *Phys. Rev. E.* 2003b. T. 68. № 4. C. 1–14.
69. Milne A. J. B., Amirfazli A. The Cassie equation: How it is meant to be used // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2012. T. 170. № 1–2. C. 48–55.
70. Misyura S. Y., Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Volkov R. S., Morozov V. S., Orlova E. G. The influence of the surface microtexture on wettability properties and drop evaporation // *Surf. Coatings Technol.* 2019. T. 375. № July. C. 458–467.
71. Moon J. H., Lee S. M., Choi C. K., Lee S. H. Modeling of the evaporation rate of liquid droplets on anodized heated surfaces // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2018. T. 98. № September. C. 209–215.
72. Morales V. L., Parlange J. Y., Wu M., Pérez-Reche F. J., Zhang W., Sang W., Steenhuis T. S. Surfactant-mediated control of colloid pattern assembly and attachment strength in evaporating droplets // *Langmuir.* 2013. T. 29. № 6. C. 1831–1840.
73. Mower T. M., Long M. J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials // *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. T. 651. C. 198–213.
74. Može M., Senegačnik M., Gregorčič P., Hočevar M., Zupančič M., Golobič I. Laser-engineered microcavity surfaces with a nanoscale superhydrophobic coating for extreme boiling performance // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2020. T. 12. № 21. C. 24419–24431.
75. Murkute P., Pasebani S., Isgor O. B. Production of corrosion-resistant 316L stainless steel clads on carbon steel using powder bed fusion-selective laser melting // *J. Mater. Process. Technol.* 2019. T. 273. № March. C. 116243.

76. Ngo C. V., Chun D. M. Fast wettability transition from hydrophilic to superhydrophobic laser-textured stainless steel surfaces under low-temperature annealing // *Appl. Surf. Sci.* 2017. T. 409. C. 232–240.
77. Ozturk T., Erbil H. Y. Evaporation of water-ethanol binary sessile drop on fluoropolymer surfaces: Influence of relative humidity // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2018. T. 553. № March. C. 327–336.
78. Patankar G., Weibel J. A., Garimella S. V. Patterning the condenser-side wick in ultra-thin vapor chamber heat spreaders to improve skin temperature uniformity of mobile devices // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. T. 101. C. 927–936.
79. Picknett R. G., Bexon R. The evaporation of sessile or pendant drops in still air // *J. Colloid Interface Sci.* 1977. T. 61. № 2. C. 336–350.
80. Poling, Bruce E., John M. Prausnitz J. P. O. *The properties of gases and liquids.* : MGH, 2000.
81. Prakash J., Sikarwar B. S. Modeling of Sessile Droplet Evaporation on Engineered Surfaces // *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 2019. T. 11. № 6.
82. Qin F., Su M., Zhao J., Mazloomi Moqaddam A., Carro L. D., Brunschwiler T., Kang. Q. Song Y., Derome D., Carmeliet J. Controlled 3D nanoparticle deposition by drying of colloidal suspension in designed thin micro-porous architectures // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. T. 158. C. 120000.
83. Sarshar M. A., Jiang Y., Xu W., Choi C. H. Depinning force of a receding droplet on pillared superhydrophobic surfaces: Analytical models // *J. Colloid Interface Sci.* 2019. T. 543. C. 122–129.
84. Sazan H., Piperno S., Layani M., Magdassi S., Shpaisman H. Directed assembly of nanoparticles into continuous microstructures by standing surface acoustic waves // *J. Colloid Interface Sci.* 2019. T. 536. C. 701–709.
85. Semenov A. A., Feoktistov D. V., Zaitsev D. V., Kuznetsov G. V., Kabov O. A. Experimental investigation of liquid drop evaporation on a Heated Solid Surface // *Thermophys. Aeromechanics.* 2015. T. 22. № 6. C. 771–774.

86. Semenov S., Trybala A., Rubio R. G., Kovalchuk N., Starov V., Velarde M. G. Simultaneous spreading and evaporation: Recent developments // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2014. T. 206. C. 382–398.
87. Semenov S., Starov V. M., Rubio R. G. Evaporation of pinned sessile microdroplets of water on a highly heat-conductive substrate: Computer simulations // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2013. T. 219. № 1. C. 143–154.
88. Shen Y., Kang F., Cheng Y., Zhang K., Sui Y. Numerical and theoretical analysis of fast evaporating sessile droplets with coupled fields // *Int. J. Therm. Sci.* 2022. T. 172. № PA. C. 107284.
89. Sobac B., Brutin D. Triple-Line Behavior and Wettability Controlled by Nanocoated Substrates : Influence on Sessile Drop Evaporation // 2011. C. 14999–15007.
90. Sobac B., Brutin D. Pure Diffusion // *Droplet Wetting and Evaporation* / под ред. D. Brutin. : Elsevier Inc., 2015. C. 101–114.
91. Soolaman D. M., Yu H. Z. Water microdroplets on molecularly tailored surfaces: Correlation between wetting hysteresis and evaporation mode switching // *J. Phys. Chem. B.* 2005. T. 109. № 38. C. 17967–17973.
92. Syrodoy S. V., Kuznetsov G. V., Gutareva N. Yu, Nigay (Ivanova) N. A. Mathematical modeling of the thermochemical processes of sequestration of SO_x when burning the particles of the coal and wood mixture // *Renew. Energy.* 2022. T. 185. C. 1392–1409.
93. Ta D. V., Dunn A., Wasley T. J., Kay R. W., Stringer J., Smith P. J., Connaughton C., Shephard J. D. Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications // *Appl. Surf. Sci.* 2015. T. 357. C. 248–254.
94. Ta V. D., Dunn A., Wasley T. J., Li J., Kay R. W., Stringer J., Smith P. J., Esenturk E., Connaughton C., Shephard J. D. Laser textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition // *Appl. Surf. Sci.* 2016. T. 365. C. 153–159.

95. Tadmor R. Open problems in wetting phenomena: pinning retention forces // *Langmuir*. 2021. T. 37. C. 6357–6372.
96. Temmler A., Liu D., Luo J., Poprawe R. Influence of pulse duration and pulse frequency on micro-roughness for laser micro polishing (L μ P) of stainless steel AISI 410 // *Appl. Surf. Sci.* 2020. T. 510. № October 2019. C. 145272.
97. Tsai P., Lammertink R. G. H., Wessling M., Lohse D. Evaporation-triggered wetting transition for water droplets upon hydrophobic microstructures // *Phys. Rev. Lett.* 2010. T. 104. № 11. C. 2–3.
98. Villa F., Marengo M., Coninck J. De. A new model to predict the influence of surface temperature on contact angle // *Sci. Rep.* 2018. T. 8. № 1. C. 1–10.
99. Wang W., Wang Q., Zhang K., Wang X., Riaud A., Zhou J. On-demand contact line pinning during droplet evaporation // *Sensors Actuators, B Chem.* 2020. T. 312. № March. C. 127983.
100. Wang Y., Ke. C., Wu T., Zhao X., Wang R. Nanosecond laser texturing with hexagonal honeycomb micro-structure on Titanium for improved wettability and optical properties // *Optik (Stuttg)*. 2019. T. 192. № June. C. 162953.
101. Wiedenheft K. F., Guo H. A., Qu X., Boreyko J. B., Liu F., Zhang K., Eid F., Choudhury A., Li Z., Chen C. H. Hotspot cooling with jumping-drop vapor chambers // *Appl. Phys. Lett.* 2017. T. 110. № 14. C. 141601.
102. X. T. Tong. *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*. New York: Springer, 2011. 1–616 c.
103. Xia Z., Fang F., Ahearne E., Tao M. Advances in polishing of optical freeform surfaces: A review // *J. Mater. Process. Tech.* 2020. C. 116828.
104. Xiao C., Zhou L., Sun Z., Du X., Yang Y. Near-wall fluid flow near the pinned contact line during droplet evaporation // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016. T. 72. C. 210–217.

105. Xu X., Wang X. Recent Mathematical Analysis of Contact Angle Hysteresis // *Advances in Contact Angle, Wettability and Adhesion* / под ред. K. L. Mittal. Canada: Willey, 2015. C. 111–127.
106. Yan Z., Jin M., Li Z., Zhou G. Shui L. Droplet-based microfluidic thermal management methods for high performance electronic devices // *Micromachines*. 2019. T. 10. № 2. C. 1–16.
107. Yang C., Chao J., Zhang J., Zhang Z., Liu X., Tian Y., Zhang D., Chen F. Functionalized CFRP surface with water-repellence, self-cleaning and anti-icing properties // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2020. T. 586. № November 2019. C. 124278.
108. Ye S., Zhang L., Wu C. M., Li Y. R., Liu Q. S. Experimental investigation of evaporation dynamic of sessile droplets in pure vapor environment with low pressures // *Int. J. Therm. Sci.* 2020. T. 149. № November 2019. C. 106213.
109. Yildirim Erbil H. Control of stain geometry by drop evaporation of surfactant containing dispersions // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. T. 222. C. 275–290.
110. Yu D. I., Kwak H. J., Doh S. W., Kang H. C., Ahn H. S., Kiyofumi M., Park H. S., Kim M. H. Wetting and evaporation phenomena of water droplets on textured surfaces // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. T. 90. C. 191–200.
111. Zahiri B., Sow P. K., Kung C. H., Mérida W. Understanding the wettability of rough surfaces using simultaneous optical and electrochemical analysis of sessile droplets // *J. Colloid Interface Sci.* 2017. T. 501. C. 34–44.
112. Zaitsev D. V., Batishcheva K. A., Kuznetsov G. V., Orlova E. G. Prediction of water droplet behavior on aluminum alloy surfaces modified by nanosecond laser pulses // *Surf. Coatings Technol.* 2020. T. 399. № July. C. 126206.
113. Zaitsev D. V., Batishcheva K. A., Kuznetsov G. V., Kabov O. A., Orlova E.G. Effect of mechanical polishing of aluminum alloy surfaces on wetting and droplet evaporation at constant and cyclically varying pressure in the chamber // *J. Mater. Sci.* 2021. T. X. № X. C. X.

114. Zang D., Tarafdar S., Tarasevich Y. Y., Dutta C., Dutta T. Evaporation of a droplet: from physics to applications // *Phys. Rep.* 2019. T. 804. С. 1–56.
115. Zhang C., Zhu X., Zhou L. Morphology tunable pinning force and evaporation modes of water droplets on PDMS spherical cap micron-arrays // *Chem. Phys. Lett.* 2011. T. 508. № 1–3. С. 134–138.
116. Zhang X., Zhao J., Mo J., Sun R., Li Z., Guo Z. Fabrication of superhydrophobic aluminum surface by droplet etching and chemical modification // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2019. T. 567. № January. С. 205–212.
117. Zhang Y., Chen H., Liu D., Deng H. High efficient polishing of sliced 4H-SiC (0001) by molten KOH etching // *Appl. Surf. Sci.* 2020. T. 525. № February. С. 146532.
118. Zhu J. L., Shi W. Y., Feng L. Bénard-Marangoni instability in sessile droplet evaporating at constant contact angle mode on heated substrate // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. T. 134. С. 784–795.
119. Аль-Музайкер М., Есенбаев Т. Е., Кубочкин Н. С., Горева М. Д., Иванова Н. А. Влияние смачиваемости подложки и влажности воздуха на самосборку наночастиц при испарении капель коллоидных растворов // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика.* 2019. Т. 5. № 3. С. 83–96.
120. Батищева К. А., Вымпина Ю. Н. Влияние способа обработки алюминиево-магниевого сплава на структуру кольцевых осадков, формирующихся при испарении капель коллоидных растворов // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева.* 2021. Т. 77. № 1. С. 15–18.
121. Батищева К. А., Вымпина Ю. Н., Орлова Е. Г. Влияние лазерной обработки поверхности алюминиево-магниевого сплава на «самосборку» наночастиц при испарении капель коллоидных растворов // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика.* 2021. Т. 7. № 1. С. 26–43.

122. Батищева К. А., Нурпейис А. Е. Испарение капель воды в изолированной от внешней среды камере // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 3. С. 8–22.
123. Бойнович Л. Б. Супергидрофобные покрытия – новый класс полифункциональных материалов // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 1. С. 10–22.
124. Бойнович Л. Б., Емельяненко А. М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // 2008. Т. 77. № 7. С. 619–638.
125. Вережников В. Н. Избранные главы коллоидной химии / под ред. Г. В. Славинская. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011.
126. Дмитриев А. С., Макаров П. Г. Об испарении жидкости из капель коллоидных растворов наночастиц SiO₂ и Fe₂O₃ // Коллоидный Журнал. 2015. Т. 77. № 2. С. 144–151.
127. Домантовский А. Г., Емельяненко А. М., Бойнович Л. Б. Текстурированные материалы с экстремальным смачиванием для сбора воды из аэрозолей // Доклады академии Наук, Физическая химия. 2019. Т. 489. № 5. С. 478–482.
128. Емельяненко А. М., Домантовский А. Г., Емельяненко К. А., Бойнович Л. Б. Получение износостойких супергидрофобных покрытий с применением лазерного микро- и нанотекстурирования // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10. № 7–8. С. 62–68.
129. Емельяненко А. М., Бойнович Л. Б. Супергидрофобные защитные покрытия на сплаве алюминия // Вестник Дальневосточного Отделения Российской Академии Наук. 2014. № 2. С. 52–61.
130. Занавескин М. Л., Миронова А. А., Попов А. М. Микрофлюидика и ее перспективы в медицине // Молекулярная медицина. 2012. № 5. С. 1–8.

131. Захаренков М. Н. Граничные условия дальнего поля при установившемся обтекании профиля вязкой несжимаемой жидкостью // Математическое моделирование. 1990. Т. 2. № 2. С. 3–18.
132. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. Москва: Химия, 1974. 416 с.
133. Кабов О. А., Зайцев Д. В. Влияние гистерезиса смачивания на растекание капли под действием гравитации // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 451. № 1. С. 37–40.
134. Климков Ю. М., Майоров В. С., Хорошев М. В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / под ред. Ф. В. Лебедев, Е. Ф. Ищенко. Москва: Министерство образования и науки Российской Федерации Московский государственный университет геодезии и картографии, 2014. 108 с.
135. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности // Силовая электроника. 2010. Т. 3. С. 62–66.
136. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности / под ред. А. В. Герасимов, В. Н. Барашков. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. 1–172 с.
137. Кучма А. Е., Щёкин А. К., Есипова Н. Е., Татьянаенко Д. В., Ицков С. В., Савин А. В. Три стадии испарения микрокапли воды на гидрофобизированной поверхности: сравнение стационарной теории с экспериментом // Коллоидный Журнал. 2017а. № 3. С. 297–303.
138. Кучма А. Е., Есипова Н. Е., Михеев А. А., Щёкин А. К., Ицков С. В. Динамика испарения бинарной сидячей капли: теория и сравнение с экспериментом для капли раствора серной кислоты // Коллоидный Журнал. 2017б. Т. 79. № 6. С. 747–755.
139. Молчанов С. П., Ролдугин В. И., Чернова-Хараева И. А., Юрасик Г. А., Сенчихин И. Н. Факторы, определяющие динамику формирования и структуру кольцевых осадков, образующихся при капиллярной самосборке частиц // Коллоидный Журнал. 2018. Т. 80. № 1. С. 63–77.

140. Назаров В. Г., Столяров В. П. Модифицированные полимерные подложки для формирования ансамблей субмикронных частиц из коллоидного раствора // Коллоидный журнал. 2016. Т. 78. № 1. С. 59–67.
141. Накоряков В. Е., Мисюра С. Я., Елистратов С. Л. Особенности испарения капель воды на нагреваемой поверхности // Доклады Академии Наук. 2013. Т. 448. № 3. С. 293–296.
142. Пашинин А. С., Емельяненко А. М., Бойнович Л. Б. Супергидрофобные композиционные покрытия на поверхности магниевого сплава // Вестник Дальневосточного Отделения Российской Академии Наук. 2013. № 5. С. 3–11.
143. Саверченко В. И., Фисенко С. П., Ходыко Ю. А. Кинетика испарения бинарной пиколитровой капли на подложке при пониженном давлении // Коллоидный Журнал. 2015. Т. 77. № 1. С. 79–84.
144. Степанов-Лебедев П. В., Кадушников Р. М., Молчанов С. П., Иванов А. А., Митрохин В. П., Власов К. О., Рубин Н. А., Юрасик Г. А., Назаров В. Г., Алфимов М. В. Самосборка наночастиц в микрообъеме коллоидного раствора: физика, моделирование, эксперимент // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 5–23.
145. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физикохимические основы смачивания и растекания. Москва: Химия, 1976. 116 с.